

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física**

Camilla Zacché da Silva

**Uso da perfilagem geofísica gama-gama e gama natural na mineração: suas aplicações,
vantagens e limitações.**

**Trabalho de Conclusão de
Curso de Física – Universidade
Federal do Rio Grande do Sul –
como requisito para obtenção
do título de Bacharel em Física.
Enfase: Bacharelado.**

**Orientadora: Vlândia Cristina
de Souza**

**Porto Alegre
2010**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Vlória de Souza pela oportunidade de aprendizado e pela paciência durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Ao engenheiro Breno, pela saída de campo que me proporcionou uma experiência em perfilagem e conhecimentos acerca dos procedimentos de lavra.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelos ensinamentos, aos professores do Instituto de Física desta Universidade, que ao longo dos anos me concederam seu tempo e conhecimento, para que eu tivesse uma ótima formação.

Agradeço à minha mãe pelo apoio e amor incondicional, que deram forças para prosseguir nesta caminhada.

Agradeço a Deus pela vida.

SUMÁRIO

	3
RESUMO	4
ABSTRACT	4
CAPITULO 1	5
1. Introdução	5
1.1 Meta	5
1.2 Objetivos específicos	6
1.3 Organização do Trabalho	6
CAPITULO 2	
2. Perfilagem Geofísica	7
2.1 Por que se faz perfilagem?	8
CAPITULO 3	
3. Fundamentos Teóricos	9
3.1 Radiação Gama	9
3.2 Interações da Radiação com a matéria	9
3.2.1 Efeito Compton	9
3.2.2 Efeito Fotoelétrico	10
3.2.3 Produção de Pares	11
3.3 Perfilagem Geofísica Gama-Gama	11
3.4 Perfilagem Geofísica Gama Natural e Resistividade	12
3.5 Fatores Importantes para Perfilagem	14
CAPITULO 4	
4. Carvão Mineral	16
4.1 Carvão Mineral no Brasil	18
4.2 Formação Geológica e Características dos depósitos Brasileiros	18
4.3 Importância dos parâmetros de qualidade	19
4.4 Geologia dos depósitos estudados	19
CAPITULO 5	
5. Metodologia	21
5.1 Trabalhos de Campo	21
5.2 Ensaio de densidade e cinzas	22
CAPITULO 6	
6. Resultados e Discussão	25
6.1 Reconhecimento das assinaturas geológicas	25
6.2 Estimativa dos parâmetros de qualidade	29
CAPITULO 7	
7. Conclusões	30
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	32
ANEXO	34

RESUMO

O trabalho visa estudar as ferramentas geofísicas aplicadas à engenharia e perfilagem, a qual consiste em introduzir sondas ao longo de furos de sondagem (poços) para obter informações em subsuperfície. Estas informações, geralmente, dizem respeito à descrição geológica geral da área estudada. No entanto, podem ir além, por exemplo, estudos de prospecção para encontrar depósitos minerais ou, ainda, determinar a geometria e qualidade de um minério em termos de processamento e aplicação do produto final nos estágios seguintes dos empreendimentos mineiros.

Palavras-Chave

Perfilagem – Geofísica – Qualidade.

Abstract

The work aims to study the geophysical tools applied to engineering and logging, which consists in inserting a probe through a borehole to obtain under surface information. These information, generally, are about geological description of the studied area, but, they can go further, for example, prospection studies to find mineral deposits, or, in addition, to determine the geometry and quality of ore in terms of processing and final application of the product in the following mining stages.

Key-Words

Logging – Geophysics – Quality.

Capítulo 1

1. Introdução

Existe uma demanda energética no mundo hoje por fontes alternativas. O carvão mineral é um dos recursos naturais não renováveis dos quais se podem gerar energia que tem maior abundância no planeta.

Para que se possa avaliar a possibilidade de uso para tal fim deste minério, são realizadas pesquisas de campo, onde se coletam dados dos depósitos referentes à qualidade do carvão. Carvão rico em cinzas tem baixa qualidade, pois seu poder calorífico é menor.

Os processos de coleta de dados, na maioria das vezes são feitos a partir de sondagens com recuperação de testemunho. Este procedimento exige perfuração e pode levar dias para constituir a malha de sondagem, tendo um custo bastante elevado.

Um método alternativo a este é o de perfilagem geofísica, que tem um custo muito mais baixo, quando pode ser dispensado o testemunho (em caso de furos de desmonte, por exemplo), sendo, também, mais rápido.

O trabalho avalia o uso da perfilagem geofísica como fonte de dados confiáveis na estimativa da qualidade de depósitos de carvão. A partir de dados coletados de processos de perfilagem geofísica, procuramos relações matemáticas que possam nos levar ao teor de cinzas que possui o carvão do depósito analisado, de forma que se consiga prever os resultados laboratoriais.

Este relatório consiste em 7 capítulos, onde são explanados os tópicos fundamentais para o entendimento do assunto aqui versado.

1.1 Meta

Obter o título de Bacharel em Física, aplicando as teorias físicas aprendidas durante o curso no trabalho proposto. Dominando o assunto, os conhecimentos poderão ser utilizados em estudos de pós-graduação na área de Engenharia de Minas para, posteriormente, poder atuar neste setor do mercado de trabalho.

1.2 Objetivos Específicos

- Aprender/acompanhar os procedimentos de campo de perfilagem junto à sondagem com recuperação de testemunho;
- Aprender os mecanismos de funcionamento das sondas gama-gama (com fonte radioativa) e gama natural (sem fonte radioativa); sobre suas limitações, vantagens e diferenças.
- Aprender as aplicações em engenharia, especificamente, na mineração do carvão.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho de conclusão de curso é composto por, inicialmente, estudos teóricos sobre perfilagem geofísica aplicada à mineração e funcionamento das sondas utilizadas.

Foram realizadas saídas de campo, para acompanhar os procedimentos de perfilagem e coleta de dados.

Ainda, foi realizado o processamento e interpretação de dados dos perfis geofísicos, com o reconhecimento das assinaturas das litologias presentes.

Cada etapa será explicitada da seguinte forma:

Capítulo 2 - Apresenta o método estudado no trabalho e os seus propósitos.

Capítulo 3-Explica os fundamentos teóricos e os detalhes dos processos de perfilagem geofísica de gama natural, resistividade e gama-gama.

Capítulo 4 - Expõe as características geológicas dos depósitos de carvão brasileiro.

Capítulo 5 - Apresenta a metodologia do trabalho.

Capítulo 6 - Apresenta os resultados obtidos com o estudo.

Capítulo 7 - Expõe as conclusões.

Capítulo 2

2. Perfilagem Geofísica

A perfilagem geofísica é um método de amostragem muito utilizado na mineração que mede as propriedades físicas e geoquímicas das rochas. Esta prática surgiu no final da década de 20, aplicada a extração de petróleo e, depois, passou a ser usada na mineração de carvão.

Em mineração, é muito importante fazer um levantamento das litologias presentes no campo antes da operação de lavra. Ainda, este levantamento deve ser capaz de distinguir o minério das rochas estéreis, determinar suas características e quantidade presente na área destinada à lavra.

A perfilagem geofísica é muito útil, pois tem menor custo quando comparada com outros métodos de amostragem, pois pode ser realizada em furos que são destinados ao desmonte e em malhas de amostragem pouco adensadas [Webber, 2008].

A prática é relativamente simples: aproveitando-se os furos de sondagem, de onde são retiradas amostras (testemunhos) ou de desmonte, são colocadas sondas capazes de detectar certas propriedades físicas das rochas, conforme mostra a Fig. 2.1. Estas sondas são levadas até a profundidade máxima do furo, a partir da onde são içadas. Durante a subida, as propriedades (resistividade, radiação gama natural ou retro-espalhada) vão sendo registradas, o que permitirá a diferenciação dos materiais em subsuperfície.

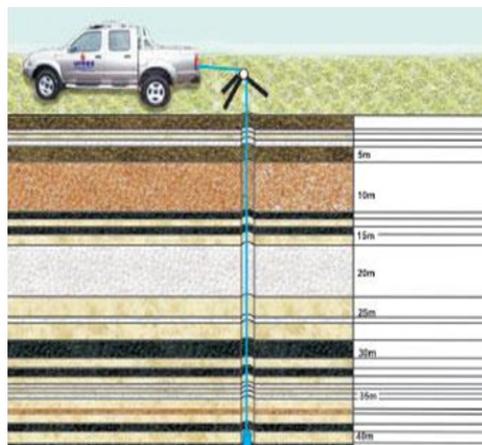


Fig 2.1 Execução da perfilagem geofísica (Webber, 2008)

2.1 Por que se faz perfilagem

A perfilagem geofísica é realizada para ser obtida uma avaliação rápida de depósito de carvão. Posteriormente, as informações fornecidas por ela dão a possibilidade de modelar o depósito, isto é, definir a geometria em “3D” e, também, de estimar por meio de métodos geoestatísticos a qualidade e a espessura em diversos pontos da área minerada. Em realidade, são informações suplementares àquelas fornecidas pelos testemunhos. A Fig. 2.1.1 mostra que um empreendimento mineiro inicia na busca pelo minério (exploração mineral), passa pela modelagem e estimativa do depósito e continua, sucessivamente, até a sua comercialização, neste caso até a queima numa termoeletrica. A perfilagem geofísica pode contribuir desde o início da exploração até a lavra e beneficiamento.

Quando realizando uma pesquisa de campo para avaliar um depósito de carvão, os resultados laboratoriais de uma sondagem com testemunho podem levar até semanas para serem obtidos, o que não é interessante para planejamento de lavra à curto prazo. Neste caso, convém aplicar a perfilagem geofísica, pois ela permitiria prever os resultados laboratoriais das características físico-químicas do minério em apenas algumas horas.

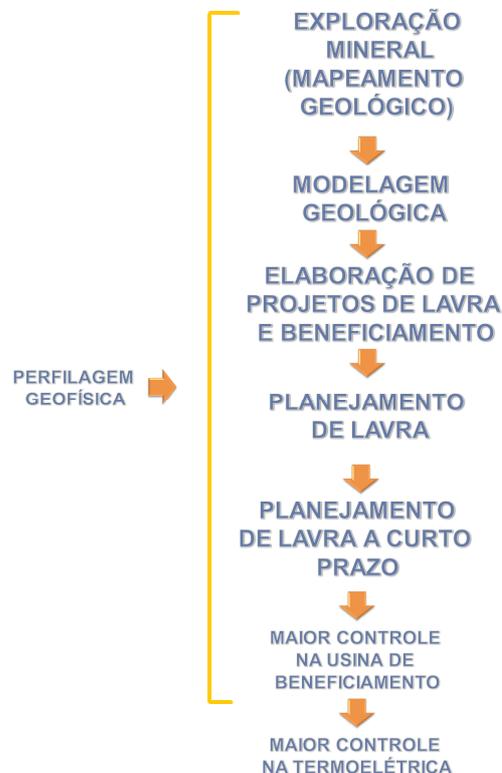


Fig 2.1.1 Esquema do uso da perfilagem geofísica nos estágios da mineração de carvão.

Capítulo 3

3. Fundamentos Teóricos

3.1 Radiação Gama

Existem vários tipos de decaimentos nucleares, mas aqui discutiremos dois que são de nosso interesse: o decaimento β e o decaimento γ . No que tange o decaimento β , há três tipos; um relaciona o núcleo com o número atômico Z , que após emitir um elétron carregado negativamente, transforma-se em um núcleo com número atômico $Z+1$, outro em que o núcleo captura um elétron atômico carregado negativamente e no terceiro tipo, o núcleo emite um pósitron carregado positivamente. Nos dois últimos casos o número atômico decresce de uma unidade. [Eisberg & Resnick, 1979].

“[...] Raios γ são fótons de radiação eletromagnética que liberam a energia excedente quando os núcleos efetuam transições, por estados excitados para estados de mais baixa energia.” [Eisberg & Resnick, 1979]

Um decaimento γ ocorre quando um decaimento β anterior produz um núcleo em vários estados de energia da ordem de 8 MeV e que são gerados a partir da captura de um nêutron pelo núcleo. As energias dos raios γ podem ser medidas através de efeito Compton.

3.2 Interações da radiação com a matéria

3.2.1 Efeito Compton

Em 1923 Compton realizou um experimento que consistia em um feixe de raios X incidindo em uma folha de grafite, realizando várias medidas da intensidade dos raios X para diferentes ângulos de espalhamento θ , em função do comprimento de onda λ . Verificou que a

intensidade tinha dois valores máximos, para valores de λ distintos, um em que o λ era igual ao comprimento de onda incidente e outro que era maior por um fator $\Delta\lambda$ – variando de acordo com ângulo de espalhamento do raio.

Para explicar este efeito Compton fez três suposições importantes:

- os raios eram compostos por fótons, “pacotes” de energia, diferente do que supunha a teoria eletromagnética clássica;
- que o espalhamento que ocorria era devido aos fótons e aos elétrons do alvo;
- os elétrons estavam em repouso e livres.

A partir destas suposições Compton explicou o efeito e chegou à equação do *deslocamento Compton* seguindo o seguinte raciocínio:

“Um fóton com energia total relativística E_0 colide com um elétron livre em repouso com energia $m_e c^2$. Na colisão, o fóton é espalhado e o elétron recua. Aplicando a conservação de momento e energia, ele conseguiu chegar a uma relação que prevê este deslocamento do comprimento de onda”.

A técnica para determinação da energia dos raios γ consiste no processo acima descrito. O espectro de energia dos raios γ emitidos em transições de estados é usado para se obter informações sobre o átomo.

3.2.2 Efeito fotoelétrico

Quando se observa uma corrente elétrica ao irradiar um metal com luz, com intensidade proporcional a intensidade da radiação que atinge o metal, se denomina este fenômeno como “efeito fotoelétrico”.

Antes mesmo de Einstein observar o efeito fotoelétrico, Heinrich Hertz já havia realizado um experimento em que constatou que a descarga elétrica entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando se incide uma luz ultravioleta em um deles [Eisberg & Resnick, 1979].

Havia aspectos do efeito fotoelétrico que não podiam ser explicados pela teoria eletromagnética clássica. A partir daí surgiram duas teorias: uma em que a quantização da energia era limitada à emissão de radiação do corpo negro (Plank) e outra que considerava que a radiação era composta por pequenos pacotes de energia (Einstein) [Eisberg & Resnick, 1979]. Einstein concluiu que a velocidade dos elétrons emitidos não depende da intensidade da luz, somente de sua frequência: o que dependerá da intensidade da luz será a *quantidade* de

elétrons emitidos [Messiah, 1999].

3.2.3 Produção de pares

Quando um fóton altamente energético perde toda a sua energia “ $h\nu$ ” em uma colisão com um núcleo, é criado um par elétron-pósitron. Pósitron é uma partícula com as mesmas características de elétron, porém com carga e momento magnético de sinal opostos. O recuo do núcleo na colisão é desprezível devido a sua grande massa. O princípio de conservação de carga é respeitado, pois o fóton não possui carga e o par produzido como um todo também não possui [Messiah, 1999].

3.3 Perfilagem Geofísica Gama-Gama

A perfilagem geofísica gama-gama ou gama retro-espalhada está baseada no fato de a radiação interagir com a matéria no seu entorno, conforme explicado anteriormente, por isso é muito utilizada para se obter as densidades dos materiais em subsuperfície.

A sonda de gama retro-espalhada possui uma fonte radioativa, geralmente, de césio (^{132}C) e um cintilômetro. A sonda emite radiação gama e de acordo com a densidade da matéria (de elétrons presentes) esta é desviada. O cintilômetro mede a quantidade de radiação espalhada pelo meio, tal que quanto mais denso ele for menor a quantidade espalhada.

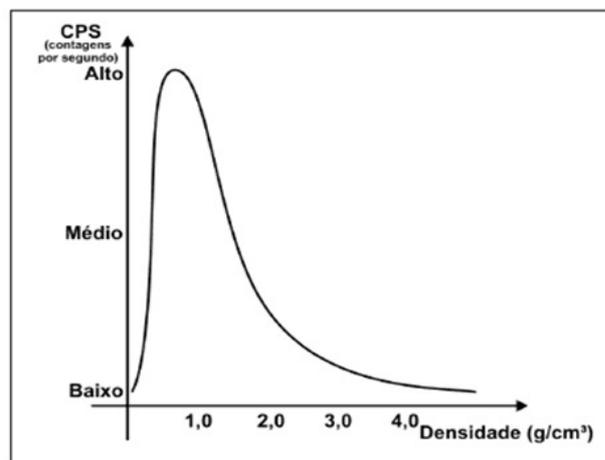


Fig.3.3.1 Função resposta densidade (g/cm^3) versus contagem por segundo (CPS). [Webber, 2008]

A determinação da densidade real de um material será obtida a partir do cálculo da densidade de elétrons presentes em um composto. Sendo Z o número de prótons e de elétrons presentes em um átomo e A o número de prótons e de nêutrons no núcleo de um átomo. A

relação Z/A nos dará a densidade de elétrons em um átomo. A função resposta da sonda será de acordo com esta densidade. [Borsaru, 1985; Borsaru 2007; Webber, 2008]

Uma vez que o perfil de densidade é obtido, é possível identificar as camadas de carvão, pois este apresenta uma densidade razoavelmente menor do que as rochas vizinhas. O arenito que é uma rocha bastante comum nos depósitos de carvão que temos no Rio Grande do Sul tem a densidade maior que a do carvão. Assim, salienta-se que a sonda gama-gama possibilita a diferenciação entre arenitos e carvões, o que a sonda gama natural e resistividade muitas vezes não conseguem [Borsaru, 1985].

Ainda, nas sondas de gama retro espalhada, há um dispositivo chamado *caliper* que é um braço calibrador o qual mede o diâmetro do furo e a rugosidade da parede. Ele é importante, pois podem ser necessárias correções nas medidas dos parâmetros estudados em função da variação do diâmetro do poço. O diâmetro do poço influencia na identificação litológica [Nery, 1999]. Folhelhos que se incorporam à lama ou desmoronam aumentam o diâmetro do poço, o qual, teoricamente, deveria ser igual ao diâmetro nominal da broca. Arenitos e demais rochas permeáveis, diminuem o diâmetro (estrangulam) pela gradual deposição do material sólido que compõe a lama, formando o reboco interno às paredes do poço, enquanto que a parte líquida, o filtrado, penetra as camadas permeáveis adentro. Rochas duras ou cristalinas permanecem praticamente com o mesmo diâmetro com que foram perfuradas, ou então, aumentam assimetricamente, quando fraturadas. Por conseguinte, o *caliper* pode ser considerado como uma resposta à resistência mecânica das rochas. Neste trabalho, por isso, foram considerados somente os perfis ou trechos deles em que não houve variação significativa do diâmetro do furo. No caso de depósitos de carvão, não ocorrem tantas litologias friáveis, sendo menor esta preocupação, quando comparados a outros depósitos tais como depósitos de ferro (itabiritos friáveis).

3.4 Perfilagem Geofísica Gama Natural e Resistividade

As rochas emitem naturalmente radiação, em função basicamente de 3 elementos: o isótopo do potássio ^{40}K , urânio e tório devido a sua abundância e meia vidas próximas a idade da Terra. Além da emissão gama natural, as rochas também possuem valores de resistividade característicos. Cada rocha tem uma maneira própria de condução elétrica, que depende da porosidade da rocha e da salinidade que esta apresenta.

As rochas sedimentares podem ser classificadas de acordo com a sua radioatividade e sua resistividade [Bond et al., 1971; Kayal & Das, 1981]:

- **Rochas altamente radioativas e baixa resistividade:** folhelhos e argilitos;
- **Rochas medianamente radioativas e resistivas:** siltitos e arenitos argilosos;
- **Rocha de baixa radioatividade e alta resistividade:** arenitos, conglomerados e carvões.

A diferenciação entre o carvão e as rochas no seu entorno, deve-se ao fato dele possuir elevada resistividade e baixa radiação gama [kayal & Das, 1981; Kayal & Christoffel, 1989], tal como mostrado na figura abaixo [Souza, 2010].

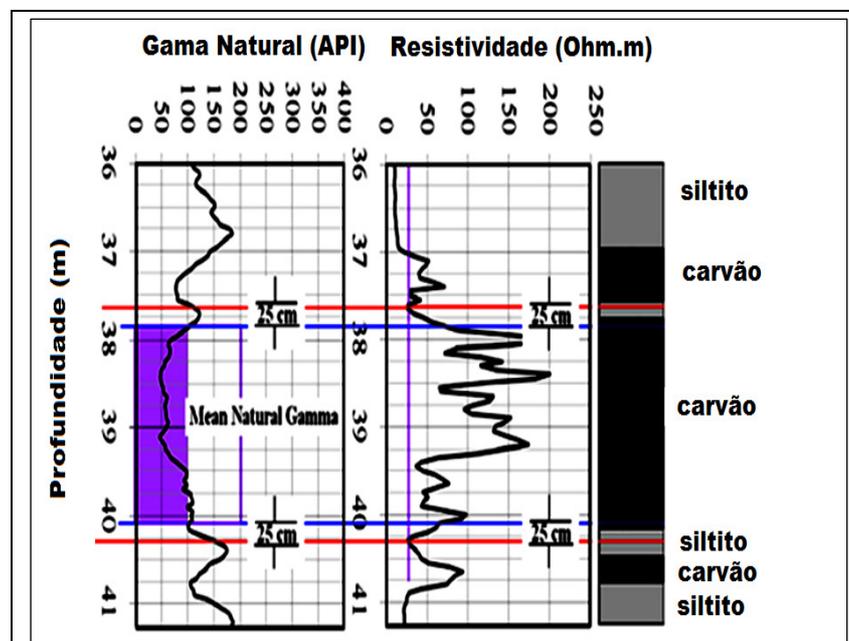


Figura 3.4.1: Perfis de gama natural e resistividade de um furo de sondagem [Souza, 2010].

A perfilagem geofísica de gama natural é mais simples que a gama-gama, pois não possui fonte radioativa na sonda, apenas se faz a contagem da emissão natural das rochas. Os detectores que são usados nas sondas são os cintilômetros e os contadores Geiger-Müller.

Um cintilômetro funciona da seguinte forma: um cristal ionizado produz luz visível, esta luz é detectada por um foto multiplicador que produz um pulso elétrico com amplitude proporcional à energia da partícula detectada pelo cintilômetro.

Um contador Geiger-Müller é um tubo preenchido com um gás inerte que é ionizado

pela radiação incidente no caso radiação gama. As partículas ionizadas tornam o gás condutor, o tubo amplifica a condução do gás que emite um pulso elétrico proporcional a energia da partícula ionizante que pode ser traduzido através do painel de leitura do contador.

A sonda de gama natural é usada em combinação com a sonda de resistividade, que por sua vez possui um eletrodo (o eletrodo de corrente). Passa uma corrente elétrica entre o eletrodo, a litologia e o fluido inserido no poço (água). A sonda mede a diferença de potencial entre o eletrodo de corrente e o eletrodo aterrado. Essa diferença é proporcional à soma das resistências de todas as litologias presentes no furo que são determinadas por meio da lei de Ohm: $R=V/I$, onde V é a diferença de potencial e I a corrente elétrica. A partir da resistência, podemos obter a resistividade do material, usando: $R=\rho \cdot l/A$, onde R é a resistência, ρ é a resistividade, l a corrente e A a área da seção do volume de investigação, conforme mostra a Figura 3.4.2.

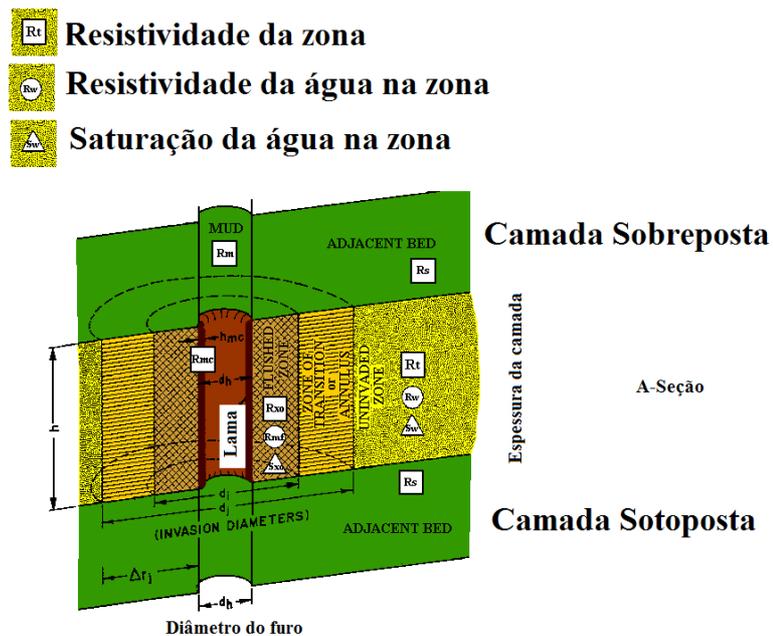


Fig. 3.4.2 Esquema mostrando a determinação da resistividade ao longo do furo.

3.5 Fatores importantes para perfilagem

Para melhor entendimento das técnicas de perfilagem é necessário que sejam apresentados alguns conceitos básicos, tais como: Profundidade de investigação, volume de investigação, colimação, resolução vertical e efeito de poço.

- **Volume de investigação**

É um campo imaginário onde a sonda irá analisar o material que está contido neste campo. O formato do volume de investigação pode ser cônico, esférico, elipsoidal ou em disco e o tamanho do campo depende do tipo de sonda.

- **Profundidade de Investigação**

Profundidade de investigação é a distância alcançada pela sonda a uma direção perpendicular ao eixo do poço.

- **Colimação**

É o ajuste do feixe de radiação em relação ao fluxo e direção do mesmo, a fim de coletar informações sobre as litologias. Ele pode influenciar o volume e a profundidade de investigação.

- **Resolução Vertical**

Maior a resolução vertical implica em maior capacidade de distinguir camadas pouco espessas.

- **Efeito de Poço**

Efeito de poço é quando o padrão do poço é alterado, ou seja, muda seu diâmetro, as paredes ou até mesmo quando algum fluido usado no processo penetra nas paredes e muda as propriedades químicas dos materiais ali contidos.

Capítulo 4

4. Carvão Mineral

Existem dois tipos de carvão: vegetal e mineral. O carvão vegetal provém da carbonização da lenha enquanto que o mineral se dá pela fossilização de matéria orgânica que ocorre ao longo de milhares de anos. O carvão mineral contém carbono, oxigênio, hidrogênio entre outros componentes químicos associados às rochas como o arenito e o silito.

O carvão mineral é classificado de acordo com a sua qualidade, ou seja, seu poder calorífico (que é medido em kcal/kg). Isto está ligado com a quantidade de carbono que o carvão possui, classificando-os em turfa, linhito, carvão betuminoso e antracito. O carvão betuminoso ou hulha é o carvão mais utilizado como combustível e contém cerca de 75% a 85% de C. O carvão vem sendo muito utilizado na produção de energia devido à sua distribuição geográfica e a sua qualidade.

O processo de formação do carvão se dá ao longo de milhares de anos e exige condições geográficas e biológicas específicas. A região deve ser pantanosa com vasta vegetação, pois quando a celulose é mantida na água sua decomposição é desacelerada e após alguns milhares de anos ela se transforma em turfa: o primeiro estágio do carvão. A turfa por ser úmida e ainda conter muitos talos e raízes, por isso não pode ser aproveitada como combustível.

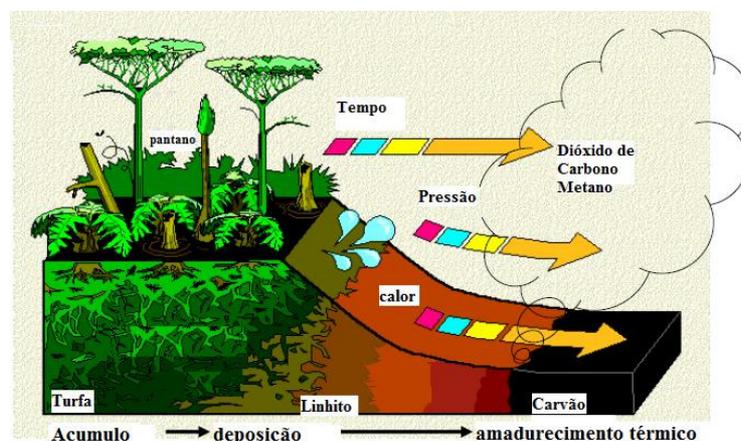


Fig. 4.1 Processo de formação do carvão [Esterle, 2010]

Ao longo dos anos a turfa então se transforma em linhito, que mais compactado e com maiores teores de C, é empregado na siderurgia. A partir do linhito se forma a hulha (carvão betuminoso e sub-betuminoso), que contém teores de C bem mais altos e é empregado na geração de energia elétrica. Sucessivamente, a hulha passa por transformações até chegar a um material denominado antracito, o qual é pobre em elementos inflamáveis dificultando a sua queima, sendo então empregado como redutor na metalurgia [Aramis et al., 2003].

O carvão é constituído também por macerais, componentes classificados em três grupos: vitrinita, inertinita e exinita. A vitrinita é composta basicamente por celulose e linhito, sua evolução é anaeróbia. A inertinita tem os mesmo constituintes que a vitrinita, porém sua evolução é aeróbia. E a exinita é composta por botânicos estruturados como: pólen, resinas e algas, sendo sua evolução também anaeróbia [Fernandes, 2004].

A vitrinita é usado para determinar a subclassificação do carvão em termos de qualidade, segundo a *Australian Standard* (AS2519/1993) como: BR, brilhante (vitrênio > 90%); BB, brilhante com bandas foscas (entre 60% e 90% de vitrênio); BD, intercalações de bandas brilhantes e foscas (entre 40 e 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%).



Fig. 4.2 Classificação do carvão de acordo com seu estágio evolutivo. [Esterle, 2010]

4.1 Carvão mineral no Brasil

O carvão mineral no Brasil foi descoberto em 1795 por Vicente Wenceslau Gomes em Minas de Leão no estado do Rio Grande do Sul. Depois foram encontrados depósitos próximos à laguna em SC. Em 1876 se iniciou o processo de mineração do carvão que com a construção da ferrovia Dona Tereza Cristina passou a abastecer o sudeste do país com o minério.

Com a Primeira Guerra Mundial o carvão estrangeiro se inseriu no cenário nacional, forçando as empresas do país a buscarem um novo mercado. No Rio Grande do Sul, as carboníferas passaram a controlar duas empresas porto-alegrenses FIAT LUX e FORÇA E LUZ que deram origem a primeira usina térmica a carvão do país, a usina do Gasômetro. Em 1928 Porto Alegre contava com gás encanado do carvão e com bondes elétricos.

No governo de Getúlio Vargas, foram criadas leis que obrigavam o consumo do carvão, o que levou a um aumento da produção nacional do energético.

Em 1954, foi criado o Plano Nacional do Carvão que visava aperfeiçoar o uso do minério, mostrando que era viável o seu uso na geração de energia, levando a construção da usina termelétrica de Candiota. Logo após foram implantadas outras usinas. O carvão mineral hoje no Brasil representa somente 1,7% da produção energética nacional, isso porque o Brasil tem a tendência ao uso de fontes hídricas de energia e o carvão que possuímos é de baixa qualidade. Há projetos para diversificar a matriz energética nacional, o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (PDEE 2006/2015) auspicia um aumento no uso do carvão nacional, de forma que o governo destinou 58 milhões do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) para beneficiamento do carvão e melhoria das tecnologias limpas (*clean coal technologies*), como recuperação do solo e redução da emissão de gases, como nitrogênio, enxofre e CO₂. O desenvolvimento, neste aspecto, espera-se, permitirá que o carvão seja quase totalmente usado na sua forma bruta [Aramis et al, 2003].

4.2 Formação Geológica e Características dos Depósitos Brasileiros

Os depósitos brasileiros de carvão se localizam na Formação Rio Bonito que faz parte da bacia sedimentar do Paraná. Essa formação é bastante estável, ou seja, tem poucos movimentos tectônicos. É uma formação ampla e bastante homogênea, o que leva a uma distribuição de pequena espessura dos depósitos e pouca concentração de matéria orgânica. A

maioria das jazidas brasileiras apresenta as linhas de afloramento de camadas de carvão próximas à borda da bacia e são sobrepostas a derrames basálticos. A profundidade das camadas varia de nula até 1200m.

O carvão foi depositado em uma costa com ondas e influência das marés. Os teores de enxofre (bastante altos em SC) foram favorecidos pela incursão da água salubre nas turfeiras.

A heterogeneidade vertical e horizontal das camadas resulta em baixas concentrações de matéria orgânica quando comparadas com outras bacias, como as do hemisfério norte e alguns depósitos na África.

4.3 Importância dos parâmetros de qualidade do carvão

É importante para estimar a qualidade do carvão, considerar a quantidade de cinza, pirita e voláteis [Costa et al., 2001]. A pirita (FeS_2) é um material duro e denso que é prejudicial ao beneficiamento e à queima do carvão, além de causar danos ao meio ambiente, tais como os problemas com drenagem ácida, contaminação de lençóis freáticos e solos [Costa et al. 2000]. Ainda, ela pode danificar o maquinário durante o processo de moagem, causando desgaste das peças. Devido ao alto teor em nossos depósitos (1% a 6%), precisa ser quantificada e monitorada ao longo de todos os processos de mineração do carvão [Costa et al., 2001].

Os voláteis determinam o poder de combustão do minério, tal que, dentro da fornalha, a temperaturas muito altas, grandes quantidades de voláteis podem ocasionar explosões e incêndios.

Por fim, o teor de cinzas é um dos parâmetros mais importantes do carvão mineral, pois este está diretamente ligado ao poder calorífico do energético. Quanto mais cinza, menor poder calorífico. Portanto, para uso na siderurgia o ideal são carvões com baixos teores de cinza. No Brasil, o carvão chega a um teor de até 60% de cinza, o produto é de baixa qualidade; por isso na siderurgia são usados minérios importados [Wall et al., 2001].

4.4 Geologia dos depósitos estudados

Foram estudados dois depósitos: o primeiro é formado por seis camadas denominadas CA, S1, S2, S3, M, I1, tendo sido obtida a maior parte das amostras nas camadas S1, S2, S3 e

M. O segundo é formado por quatro camadas de carvão M1,M2,S,I1 e foram usadas apenas amostras das camadas M1, M2 e S.

A classificação das camadas foi feita com base na correlação estratigráfica pelo geólogo responsável por meio da descrição dos testemunhos de sondagem. O reconhecimento dos litotipos está baseado na análise visual da textura, estrutura e composição dos mesmos. No caso de carvões, o geólogo descreveu, inclusive, pormenorizadamente, as características qualitativas, tais como, o conteúdo de vitrinita, seguindo o padrão da *Standards Association of Australia* [Anon, 1993]. Quando há intercalações dentro da camada de carvão, o geólogo ainda descreve quais os tipos de impurezas presentes.

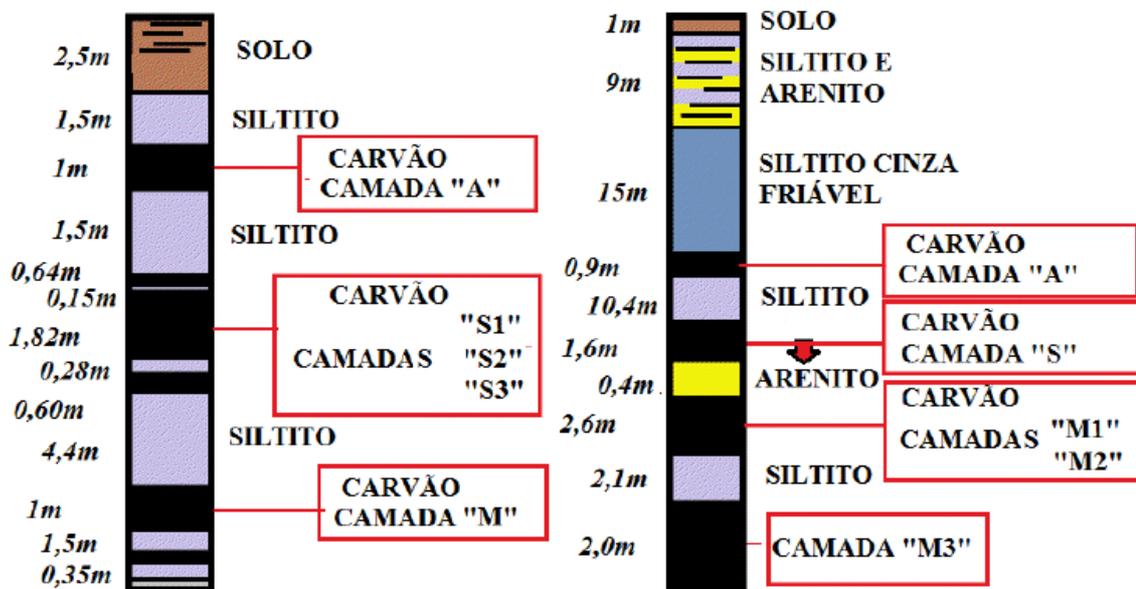


Fig 4.3.1- Coluna litologia do depósito 1 (a) e coluna litológica depósito 2 (b).

Capítulo 5

5. Metodologia

5.1 Trabalhos de campo

O trabalho de campo consistiu na perfilagem de 16 furos no depósito 1 e 14 furos no depósito 2. Os furos interceptam as principais camadas de carvão dos depósitos estudados (Figura 4.3.1). Um Banco de dados foi montado a partir das perfilações geofísicas realizadas nos dois depósitos, utilizando também os resultados de análises laboratoriais para cinza e densidade.

Foram desprezados nos registros de perfilagem os 25cm iniciais e finais de cada camada. Esta medida foi adotada em função do volume de investigação das sondas e interferências sobre as leituras geofísicas dos litotipos estéreis adjacentes às camadas de carvão que estavam sendo investigadas. As assinaturas geofísicas são obtidas a partir das descrições e das correlações com os testemunhos de sondagem.



Fig. 5.1.1 Furo de sondagem

A perfilagem geofísica em cada depósito foi realizada com duas sondas distintas. No

depósito 1 se utilizou uma sonda GLOG que é responsável pela obtenção dos perfis de resistividade e gama natural. No depósito 2 foi utilizada uma sonda SWDS que é responsável pela obtenção do perfil gama retro espalhado.

A sonda GLOG tem 2,76m de comprimento, 38 mm de diâmetro e 8 Kg de massa.

A sonda SWDS tem 2,89 m de comprimento, 50 mm de diâmetro e 20kg de massa. Ela pesa tão mais que as outras sondas pois possui uma fonte radioativa de Césio 137 com atividade de 3,7mCi. Esta possui também o *caliper*, um braço calibrador que mede o diâmetro do furo analisado [Webber, 2008].



Fig. 5.1.2 Sonda sendo inserida no furo de sondagem

5.1 Ensaios de densidade e cinzas

As análises químicas foram realizadas pela Copelmi Mineração, a qual deu o suporte para realização dos furos de sondagem e execução da perfilagem também. A seguir será descrita a metodologia utilizada pela empresa para realização das análises de cinza e densidade.

A determinação da densidade é realizada segundo procedimentos descritos na norma **ISO 7936** (1992) e, também, podem ser acessados por meio do trabalho de Webber (2008): primeiramente se faz uma secagem do material, para que posteriormente seja mais fácil a homogeneização da amostra. São preparadas misturas com densidades intermediárias as dos carvões e materiais estéreis a partir de água e bromofórmio (CHBr_3), as quais compõem os

chamados “meios densos”. Os materiais a serem ensaiados são colocados em uma cuba contendo este meio denso. Geralmente, é o carvão, com densidade menor a do meio, que flutua, sendo então retirado com cuidado, secado e pesado.



Fig. 5.2.1 Preparação do meio denso.



Fig. 5.2.2 – Retirada do material flutuante no meio denso.

O ensaio de cinzas é realizado segundo a **NBR 8289** (1987), a qual determina que cerca de 1g de carvão, provindo do ensaio de densidade, seja calcinado em um forno a 775 °C. As amostras são posicionadas na entrada do forno por dois minutos, depois levadas ao fundo

do forno por 60 min. Passado este tempo é observado se houve combustão do material, caso não tenha havido combustão completa do material, as amostras são levadas novamente ao forno por mais 30 min. Quando retiradas do forno, são colocadas sobre uma placa de amianto para que esfrie. Atingindo a temperatura ambiente, os resíduos das amostras são pesados, e a taxa de cinzas é obtida a partir da proporção entre a massa inicial da amostra e massa do resíduo [Webber, 2008].



Fig. 5.2.3- Pesagem das amostras.



Fig. 5.2.4- Colocação das amostras no forno.

Capítulo 6

6. Resultados e discussão

6.1 Reconhecimentos das assinaturas geofísicas

O presente trabalho busca estabelecer relações matemáticas a partir dos dados coletados nos depósitos, para que seja possível inferir o conteúdo de cinza sem análise laboratorial ou como uma forma de antecipação. Para analisar a relação entre os parâmetros químicos do carvão e aqueles resultantes da perfilagem geofísica, visando posterior modelagem das variáveis de qualidade ao longo do depósito de carvão, é necessário analisar estatisticamente as diferenças entre as distintas camadas do depósito. O carvão possui uma emissão gama natural muito baixa e uma resistividade alta, portanto quando combinados os perfis é possível identificá-lo, desde que não existam arenitos ou conglomerados em seu entorno [Hoffman et al., 1982]. No caso, o depósito 1 possui intercalações de siltito com carvão basicamente, enquanto o depósito 2 possui arenitos e conglomerados. Assim, foram utilizadas as sondas de resistividade e gama natural para fazer perfilagem no primeiro depósito e gama-gama no segundo.

É possível, também, obter a espessura das camadas, especialmente, a partir dos perfis de resistividade, onde os limites delas (base e topo) são assinalados pela curvas de anomalia, coincidindo aproximadamente com seus pontos de inflexão [Hoffman et al., 1982], conforme mostra a Figura “3.4.1”.

Analisando a tabela Resumo A podemos ver que o depósito 1 apresenta em suas camadas uma relação entre teor de cinzas e resistividade, bem como com gama natural. Quando o teor de cinza é baixo a resistividade se apresenta mais acentuada. Na camada M se tem uma taxa média de cinza de 52% e resistividade de 72 Ohm.m, enquanto que na camada S a cinza é mais baixa, média de 38% e resistividade de 112 Ohm.m.

Vemos também a partir da Tabela A que no depósito 1, a medida que o teor de cinza aumenta, aumenta também a radiação gama, enquanto diminui a resistividade de um modo geral. Ainda, quando observadas as largas faixas de variação de gama natural, percebe-se que as camadas estão respondendo não somente aos teores de cinzas, mas, também, a distintos conteúdos radiométricos. De qualquer forma, existe uma boa correlação entre a variação do

conteúdo de cinzas e a de gama natural.

Tabela A- Resumo estatístico dos parâmetros de interesse das camadas de carvão para depósito 1.

Descrição	Cinzas (%)			Gama Natural (API)			Resistividade (Ohm.m)			Numero de Amostras
	Intervalo	Média	D*	Intervalo	Média	D*	Intervalo	Média	D*	
M	45-64	52	5	28-114	84	22	43-94	73	12	13
S1	34-56	42	7	47-85	58	13	44-151	81	42	6
S2	28-46	37	6	39-84	57	12	84-167	113	23	8
S3	32-61	46	8	30-105	76	22	41-123	73	23	9

*D é o desvio padrão.

A Figura 6.1.1 mostra a correlação entre cinzas e resistividade ($R^2=0,4$). Apesar de apresentar fraca correlação, podemos observar uma tendência: onde o conteúdo de cinzas diminui com o aumento da resistividade. A grande dispersão existe porque a resistividade é uma resposta a muitos parâmetros, não somente a cinzas, tais como: grau de saturação e porosidade.

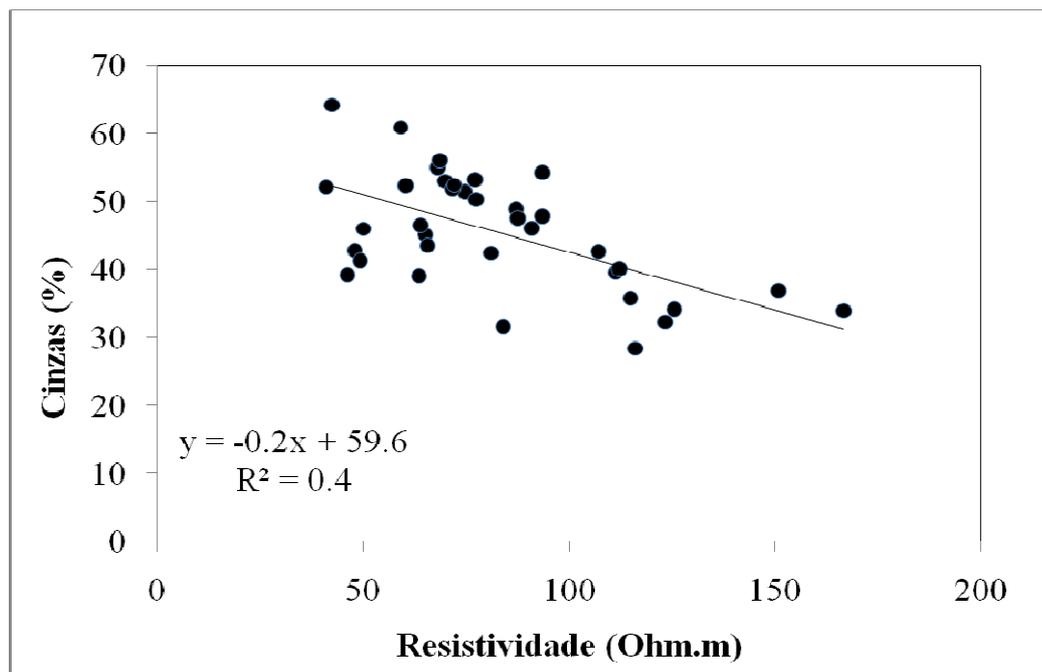


Fig. 6.1.1 – Gráfico de Cinzas versus Resistividade do depósito 1.

A Figura 6.1.2 mostra a correlação entre cinzas e gama natural ($R^2=0,8$). Existe uma forte correlação, sendo que o conteúdo de cinzas aumenta proporcionalmente com o gama natural (GN). Isto ocorre porque quando existe um maior conteúdo de cinzas, existem, também, um maior conteúdo de radiométricos, em especial, do potássio (presente nos feldspatos e argilo minerais) das litologias estéreis no entorno da camada (arenitos argilosos e

siltitos).

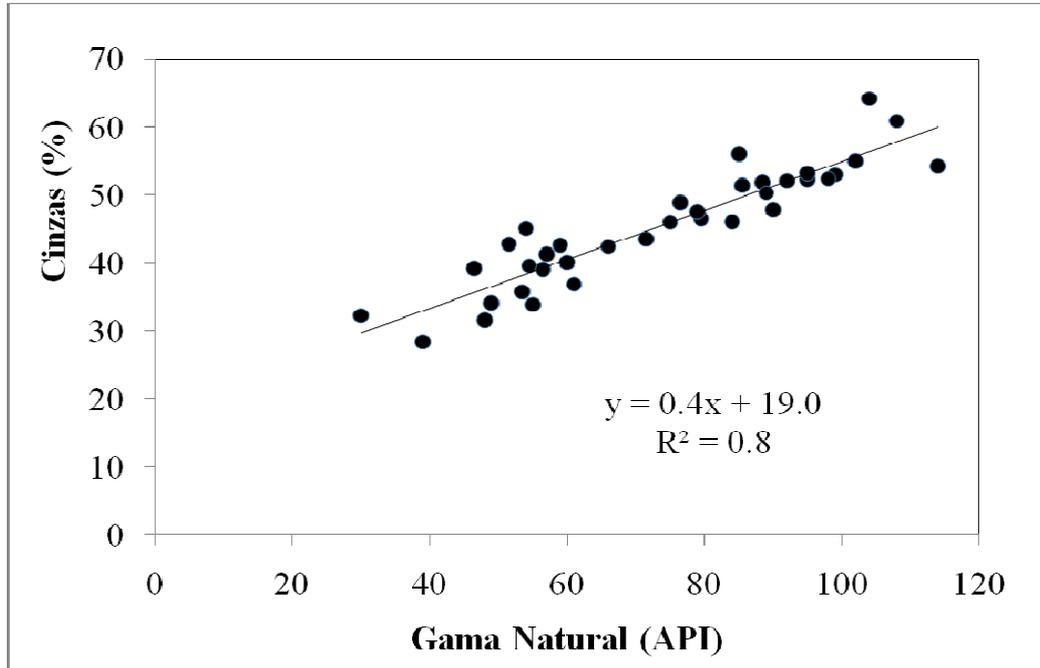


Fig. 6.1.2 Gráfico de Cinzas versus emissão Gama Natural do depósito 1.

Na Tabela B podemos ver que o teor de cinza mais baixo corresponde à camada menos densa e, também, à média de radiação gama retro espalhada mais alta, de acordo com o que vemos na literatura. A camada S do depósito 2 é a menos densa, esta apresenta média de $1,65\text{g/cm}^3$ e gama-gama médio de 2.007 CPS.

Tabela B- Resumo estatístico dos parâmetros de interesse das camadas de carvão depósito 2.

Descrição	Cinzas (%)			Gama-gama -LSD (CPS)			Densidade (g/cm^3)			Numero de Amostras
	Intervalo	Média	D*	Intervalo	Média	D*	Intervalo	Média	D*	
S	36-51	44	5	1460-2660	2007	328	1,56-1,77	1,65	0,08	9
M1	38-76	51	12	778-2592	1666	639	1,57-2,05	1,78	0,17	10
M2	31-68	51	12	722-2939	1742	730	1,52-2,08	1,75	0,18	10

*D é o desvio padrão.

A camada M1 é a mais densa das camadas apresentadas (Tabela B). Ela tem densidade média de $1,78\text{g/cm}^3$ e gama-gama médio de 1.666 CPS. Ainda, as camadas S e M1 têm 44% e 51% de cinzas e densidades médias de $1,65\text{g/cm}^3$ e $1,78\text{g/cm}^3$ respectivamente.

A Figura 6.1.3 mostra a correlação entre cinzas e gama retro espalhado ($R^2=0,8$), baseado no detector LSD (o mais distante dos três localizados nesta sonda). Existe uma forte correlação, sendo que o conteúdo de cinzas diminui proporcionalmente ao aumento do gama retro espalhado. Isto ocorre porque quando existe um maior conteúdo de cinzas, mais denso é

o carvão e quanto mais denso menor a quantidade de radiação retro espalhada, conforme, também, pode ser observado na Figura 6.1.4.

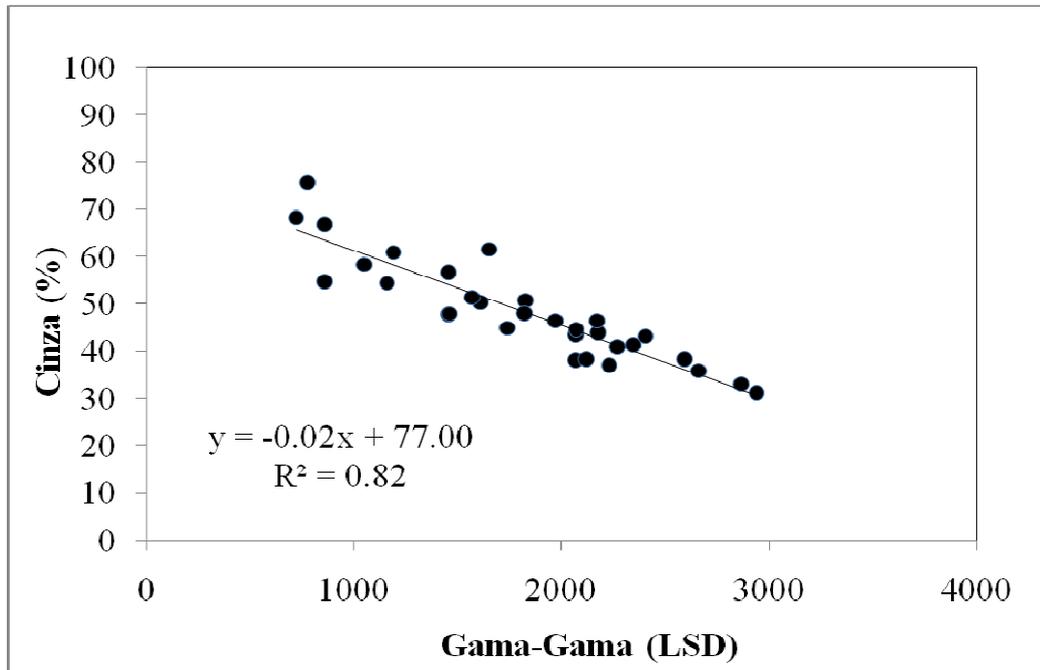


Fig. 6.1.3 – Gráfico de Cinzas versus gama retro espalhado do depósito 2.

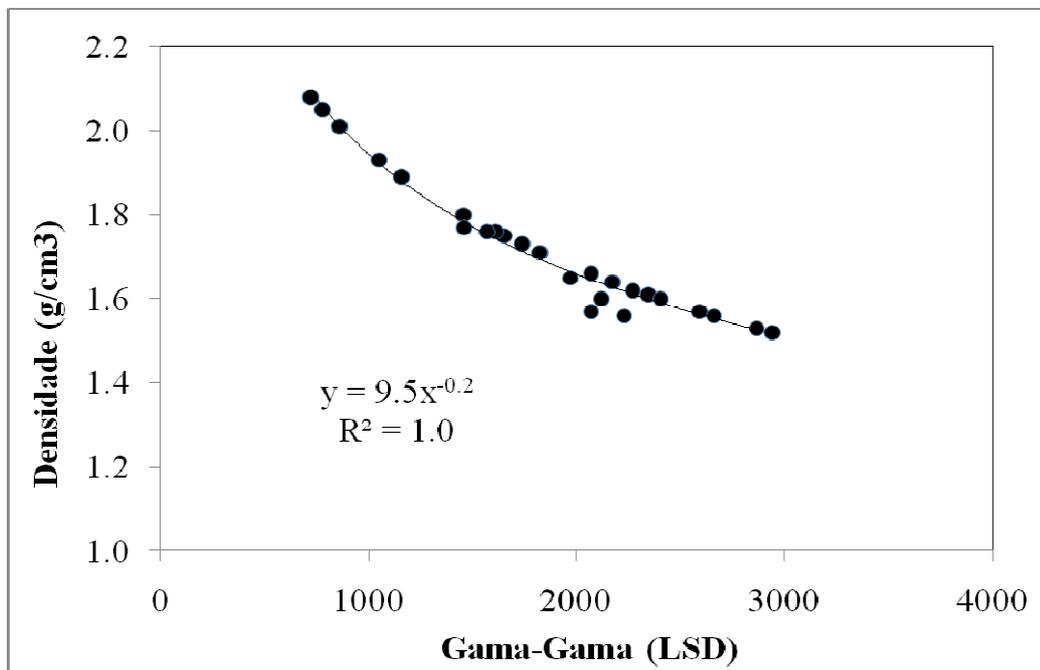


Fig. 6.1.4 – Gráfico da Densidade versus Gama-Gama do depósito 2.

6.2 Estimativa dos parâmetros de qualidade

Com base no banco de dados mostrado em anexo (Tabela C), foi possível constatar que existe, neste depósito, uma correlação linear alta ($R = 0,84$) entre o gama natural e o teor de cinzas. A Figura 6.1.2 mostra esta correlação e a equação linear de ajuste correspondente. O erro médio relativo foi de $\pm 5,8\%$, com a previsão de cinzas dada pela equação linear **$Cz(\%) = 0,36 * GN + 19$** .

Na Tabela em anexo (Tabela C), também, são mostrados os valores de teor de cinza previstos pelo modelo baseado no gama natural e diferenças encontradas (resíduos) com relação aos valores determinados em laboratório (erros absolutos e relativos). As análises de correlação e os cálculos de erro para determinados intervalos de confiança foram feitos baseando-se em Montgomery & Runger (1999).

A Tabela D mostra os resultados para gama retro espalhado, GG (baseando-se na contagem do detector LSD), e cinzas no depósito 2. O erro médio relativo foi de $\pm 6,7\%$, com a previsão de cinzas dada pela equação linear **$Cz(\%) = -0,02 * GG + 77$** , com o coeficiente $R^2 = 0,82$.

A equação proposta para prever densidade, baseando-se no gama retro espalhado é: **$Dens.(g/cm^3) = 9,5 * GG^{0,2}$** , com fator $R^2 = 1$ e erro relativo médio de apenas $\pm 1\%$, conforme mostra a figura 6.1.4.

Ainda, quando observados os dados das Tabelas C e D, em anexo, nota-se que o intervalo de confiança para estimativas do conteúdo de cinzas, com erro relativo menor que $\pm 5\%$, é bem menor para o modelo baseado no gama natural: cai de 95% para 55%.

Capítulo 7

7. Conclusões

Nos depósitos estudados, não se obteve uma boa correlação entre resistividade e cinzas, apesar dos resultados sugerirem uma tendência de redução da resistividade, quando o teor de cinzas aumenta, conforme era esperado. Isto ocorre, pois a resistividade das rochas depende, também, do seu grau de fraturamento e saturação (quão mais fraturadas as rochas e maior o conteúdo de água, mais condutivas elas se tornam).

Por outro lado, foi verificada a existência de uma boa correlação entre teor de cinzas de camadas de carvão e os registros de gama natural, para depósito 1 e uma boa correlação entre gama retro espalhado e cinza e, também, densidade no depósito 2.

Podemos então prever o teor de cinzas com o uso de perfilagem de gama natural ou de gama retro espalhada. No entanto, é necessário observar que o intervalo de confiança para estimativas com erro relativo menor que $\pm 5\%$, baseando-se na contagem de gama natural do depósito 1 é baixo, apenas 55%. Ainda, deve ser salientado que são depósitos diferentes e que, portanto, não se podem comparar os erros de estimativa por gama natural com gama retro espalhado. Não se procurou neste trabalho comparar as técnicas ou ferramentas utilizadas, mas a sua aplicabilidade em distintos depósitos de carvão nas estimativas das cinzas. Com isso, espera-se que, em breve, sejam mais bem compreendidos os motivos que levaram a uma maior dispersão nos valores de gama natural em função das cinzas obtidos para o depósito 2.

Ainda, salienta-se que, em função da limitação de resolução das sondas utilizadas, tendo em vista a pequena espessura das camadas em certos pontos dos depósitos, existe um erro adicional aos de estimativas de cinza e densidade previstos neste trabalho: camadas com espessura menor que 50cm apresentam maior dificuldade de reconhecimento das assinaturas e as leituras tornam-se imprecisas. Isto é comum ocorrer em depósitos de carvão do Sul do Brasil.

De qualquer forma, as duas técnicas servem bem ao propósito de antecipar os resultados de análises químicas do carvão, contido nos testemunhos de sondagem. Também, podem ser utilizadas em furos de desmonte, os quais implicam em menores custos e maiores produtividades. As informações advindas da perfilagem geofísica ajudam, pois, sobremaneira

na estimativa das espessuras e conteúdo de cinzas nos pontos que não puderam ser amostrados.

Referências Bibliográficas

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8289:1983 (versão Corrigida: 1987) -Carvão mineral - Determinação do teor de cinzas*. 1983. 4p. (Essa norma prescreve o método para determinar o teor de cinzas em carvão mineral).
- INTERNATIONAL STANDARDS FOR BUSINESS, GOVERNMENT AND SOCIETY. *ISO 7936:1992- Hard coal - Determination and presentation of float and sink characteristics*. 1992. 19p. (General directions for apparatus and procedures)
- ANON, AUSTRALIAN STANDARD (STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA). *AS2519: Guide to the technical evaluation of higher rank coal deposits*. Australian Standard. Committee MN/1 coal and coke, 1993. 119p.
- ARAMIS, J. P. G., CRUZ, P. R., BORGES, L.P. *Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio*. 2003.
- BOND, L.O., ALGER, R.P., SCHMIDT, A.W. Well log interpretation in coal mining and rock mechanics. *Soil Mech. Eng., Trans.*, v. 250, p.355-362, 1971.
- BORSARU, M., CHARBUCINSKI, J., EISLER, P. L., YOUL, S. F. Determination of ash content in coal by borehole logging in dry boreholes using gamma-gamma methods. *Geoexploration*, v. 23, n.4, p.503-518, 1985.
- BORSARU, M., ASFAHANIA, J. Low-activity spectrometric gamma-ray logging technique for delineation of coal/rock interfaces in dry blast holes. *Applied Radiation and Isotopes*, v.65, n.6, p.748-755, 2007.
- COSTA, J. F. C. L., KOPPE, J. , CORREA, K. Redução da geração de drenagem ácida de mina em depósitos de rejeitos de mineração de carvão. *REM - Revista da Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 53, n. 3, p. 187-192, 2000.
- COSTA, J. F. C. L. , SOUZA, L. E., KOPPE, J. , PILGER, G. Predicting the spatial distribution of pyrite concretions and its influence in continuous coal mining. *Mineral Resources Engineering*, London, v. 10, n. 4, p. 415-425, 2001.
- EISBERG, R., RESNICK R. Física Quântica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Ed. Campus, 1979. 928 p.
- ESTERLE, J. Introduction to coal and coal bearing systems - *Anotações de aula* (University of Queensland). Acessado em novembro de 2010: <http://www.earthsciences.uq.edu.au>.
- FERNANDES P. Evolução da matéria orgânica: da original aos carvões e petróleos. In: V ENCONTRO DE PROFESSORES DE GEOCIÊNCIAS DO ALGARVE. Vila real de santo Antônio, 2004.

- HOFFMAN, G.L., JORDAN, G. R., WALLIS, G.R. *Geophysical borehole logging handbook for coal exploration*. The Coal Mining Research Centre, Edmonton, Alberta, Canada, 1982. 270p.
- KAYAL, J.R., DAS, L.K. A method of estimating ash content of coal from combined resistivity and gamma-ray logs. *Geoexploration*, v. 19, n.3, p.193-200, 1981.
- KAYAL, J.R., Christoffel, D. A. Coal Quality from Geophysical Logs: Southland Lignite Region, New Zealand. *The Log Analyst* , v.30, n.5, p.343-352, 1989.
- MESSIAH, A. *Quantum Mechanics*. Dover Edition, 1999. 1136p.
- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. (3.ed.). New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. Chapter 11, p.372-410. NERY, G. G. Perfilagem geofísica aplicada à água subterrânea, RJ, 1999.
- SOUZA, V. C. G. de, Notas de aula: UFRGS, Disciplina de Prospecção Geofísica, 2010.
- WALL, T., ELLIOTT, L., SANDERS, D., CONROY, A. *A review of the state-of-the-art in coal blending for power generation final report - project 3.16* (Technology assessment report 14). Cooperative research centre for black coal utilization Established and supported under the Australian Government's Cooperative Research Centers Program. Advanced Technology Centre, The University of Newcastle. 2001. 93p.
- WEBBER, T. *Estimativa de qualidade do carvão usando krigagem dos indicadores aplicados a dados obtidos por perfilagem geofísica*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, 2008. 233p. (Dissertação de Mestrado).

ANEXO

Tabela C – Depósito 1

Furo	Camada	Dados experimentais				Cinza Estimada (%)		
		Espessura	Resist.	Gama Natural	Cinza Laboratório	Cz (%) =0,36*GN+19	Erro Absoluto	Erro Relativo
		(m)	(Ohm/m)	(API)	(%)		(%)	(%)
CAL10	M	1,0	65,1	54,0	45,1	38,4	-6,7	-14,8%
CAL10	S1	1,0	48,0	51,5	42,8	37,5	-5,3	-12,3%
CAL1	M	1,4	42,5	104,0	64,2	56,4	-7,8	-12,1%
CAL12	S1	0,6	68,7	85,0	56,1	49,6	-6,5	-11,6%
CAL16	S1	0,6	46,2	46,5	39,2	35,7	-3,5	-8,9%
CAL14	S3	0,9	123,4	30,0	32,3	29,8	-2,5	-7,8%
CAL16	S2	2,5	107,1	59,0	42,6	40,2	-2,4	-5,6%
CAL21	S3	0,9	59,2	105,0	60,9	57,9	-3,0	-5,0%
CAL9	S1	0,7	43,9	57,0	41,3	39,5	-1,8	-4,4%
CAL14	M	1,2	74,7	85,5	51,4	49,8	-1,6	-3,2%
CAL24	S2	2,6	111,3	54,5	39,6	38,6	-1,0	-2,5%
CAL19	M	1,4	71,7	88,5	51,9	50,8	-1,1	-2,0%
CAL24	M	1,1	77,4	89,0	50,3	51,0	-0,7	-1,4%
CAL23	M	1,0	87,5	79,0	47,6	47,4	-0,2	-0,4%
CAL9	S3	1,1	50,1	75,0	46,0	46,0	0,0	0,0%
CAL24	S3	1,0	77,2	95,0	53,2	53,2	0,0	0,0%
CAL3	S3	0,7	41,0	92,0	52,1	52,1	0,0	0,0%
CAL12	S3	0,6	63,6	56,5	39,1	39,3	0,2	0,6%
CAL1	S3	0,8	81,0	66,0	42,4	42,7	0,3	0,8%
CAL9	S2	0,5	112,2	60,0	40,1	40,6	0,5	1,2%
CAL15	M	1,8	68,1	102,0	55,0	55,7	0,7	1,3%
CAL22	M	1,5	69,3	95,0	52,3	53,2	0,9	1,7%
CAL16	M	1,0	64,0	79,5	46,5	47,6	1,1	2,4%
CAL16	S3	0,5	65,7	71,5	43,5	44,7	1,2	2,8%
CAL13	M	1,4	70,0	99,0	53,0	54,6	1,6	3,1%
CAL21	M	0,8	72,1	28,0	52,4	54,3	1,9	3,5%
CAL12	M	0,9	87,2	76,5	48,9	46,5	2,4	4,9%
CAL13	S2	3,4	90,9	84,0	46,1	49,2	3,1	6,8%
CAL21	S2	2,1	114,9	53,5	35,8	38,2	2,4	6,8%
CAL6	S3	0,6	93,5	90,0	47,9	51,4	3,5	7,3%
CAL13	S1	0,8	125,5	49,0	34,1	36,6	2,5	7,4%
CAL8	M	0,7	93,5	114,0	54,3	60,0	5,7	10,5%
CAL14	S1	0,5	150,8	61,0	36,9	40,9	4,0	10,9%
CAL14	S2	2,5	166,6	55,0	33,9	38,8	4,9	14,4%
CAL1	S2	1,9	84,1	48,0	31,6	36,3	4,7	14,7%
CAL15	S2	1,1	116,0	39,0	28,4	33,0	4,6	16,3%
						Média (%)	±2,5	±5,8%

Tabela D – Depósito 2

Furo	Camada	Dados Experimentais			Densidade Estimada (g/cm ³)			Cinza Estimada (%)		
		Gama-Gama LSD (CPS)	Dens. Lab. (g/cm ³)	Cinza Lab. (%)	Dens.(g/cm ³)=9,5*GG ^{-0,23}	Erro Absoluto (g/cm ³)	Erro Relativo (%)	Cz (%)=-0,02*GG+77	Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
B3-01	M2	1190	---	60,9	1,86	---	---	58,2	-2,7	-4,5%
B3-01	S	2270	1,62	40,9	1,60	-0,02	-1,23%	41,2	0,3	0,7%
B3-02	M1	2069	1,66	38,1	1,64	-0,02	-1,20%	44,3	6,2	16,3%
B3-02	S	1740	1,73	44,9	1,71	-0,02	-1,16%	49,5	4,6	10,3%
B3-04	M1	1456	1,80	47,8	1,78	-0,02	-1,11%	54,0	6,2	12,9%
B3-04	M2	1160	1,89	54,4	1,87	-0,02	-1,06%	58,7	4,3	7,8%
B3-06	M1	778	2,05	75,7	2,05	0,00	0,00%	64,7	-11,0	-14,5%
B3-06	M2	1050	1,93	58,3	1,92	-0,01	-0,52%	60,4	2,2	3,7%
B3-06	S	1570	1,76	51,4	1,75	-0,01	-0,57%	52,2	0,8	1,6%
B3-08	M1	860	2,01	54,8	2,01	0,00	0,00%	63,4	8,6	15,7%
B3-08	M2	722	2,08	68,3	2,09	0,01	0,48%	65,6	-2,6	-3,9%
B3-08	S	1460	1,77	48,0	1,78	0,01	0,56%	53,9	6,0	12,5%
B3-10	M2	1651	1,75	61,6	1,73	-0,02	-1,14%	50,9	-10,6	-17,3%
B3-14	M1	2345	1,61	41,4	1,59	-0,02	-1,24%	40,0	-1,5	-3,5%
B3-14	M2	2866	1,53	33,0	1,52	-0,01	-0,65%	31,7	-1,3	-4,0%
B3-14	S	2120	1,60	38,4	1,63	0,03	1,87%	43,5	5,2	13,5%
B3-15	M2	2404	1,60	43,2	1,58	-0,02	-1,25%	39,0	-4,2	-9,7%
B3-16	M1	860	2,01	66,9	2,01	0,00	0,00%	63,4	-3,5	-5,2%
B3-16	M2	1825	1,71	50,7	1,69	-0,02	-1,17%	48,2	-2,5	-5,0%
B3-16	S	2170	1,64	46,4	1,62	-0,02	-1,22%	42,7	-3,7	-8,0%
B3-17	M1	2592	1,57	38,4	1,56	-0,01	-0,64%	36,1	-2,3	-6,0%
B3-17	M2	1610	1,76	50,3	1,74	-0,02	-1,14%	51,6	1,2	2,5%
B3-17	S	1970	1,65	46,5	1,66	0,01	0,61%	45,9	-0,6	-1,3%
B3-19	M1	2175	1,64	43,4	1,62	-0,02	-1,22%	42,7	-0,8	-1,7%
B3-19	S	2230	1,56	37,0	1,61	0,05	3,21%	41,8	4,8	12,9%
B3-20	S	2660	1,56	35,9	1,55	-0,01	-0,64%	35,0	-0,9	-2,4%
B3-21	M2	2939	1,52	31,2	1,51	-0,01	-0,66%	30,6	-0,6	-2,0%
B3-21	S	2070	1,57	44,6	1,64	0,07	4,46%	44,3	-0,3	-0,6%
B3-22	M1	1456	1,80	56,6	1,78	-0,02	-1,11%	54,0	-2,6	-4,6%
B3-22	S	1820	1,71	48,0	1,69	-0,02	-1,17%	48,3	0,2	0,5%
B3-01	M1	2069	1,66	43,5	1,64	-0,02	-1,20%	44,3	0,8	1,9%
						Média	±1,08%		Média	±6,7%