

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



Maiquel Kochhann Lunkes

**O CARVÃO DAS CAMADAS SUPERIORES E
INFERIORES DA JAZIDA DE CANDIOTA – RS: UMA
CONTRIBUIÇÃO PARA SUA CARACTERIZAÇÃO
QUÍMICA, PETROLÓGICA E TECNOLÓGICA VISANDO
SEU POTENCIAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Porto Alegre, dezembro/2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



**O CARVÃO DAS CAMADAS SUPERIORES E INFERIORES DA JAZIDA DE
CANDIOTA – RS: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA SUA CARACTERIZAÇÃO
QUÍMICA, PETROLÓGICA E TECNOLÓGICA VISANDO SEU POTENCIAL
NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

MAIQUEL KOCHHANN LUNKES

ORIENTADOR

Prof. Dr. Wolfgang Dieter Kalkreuth

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Osório

M. Sc. Geól. Janáina Hugo Levandowski

COMISSÃO DOS PROJETOS TEMÁTICOS

Prof. Dr. Andrea Ritter Jelinek

Prof. Dr. Rualdo Menegat

Prof. Dr. Marcus V. D. Remus

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Geólogo.

Porto Alegre, dezembro de 2010

Lunkes, Maiquel Kochhann

O carvão das camadas superiores e inferiores da jazida da Candiota – RS: uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica. / Maiquel Kochhann Lunkes. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2010.

[81 f.] il.

Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Curso de Geologia. Porto Alegre, RS - BR, 2010.

Orientação: Prof. Dr. Wolfgang Dieter Kalkreuth

1. Carvão. 2. Candiota. 3. Permiano. 4. Termoeletricidade. 5. Caracterização. I. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca Geociências - UFRGS
Miriam Alves CRB 10/1947

“Que ninguém se engane, só se consegue a simplicidade através de muito trabalho.”

Clarice Lispector

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao cara lá de cima, que me ajudou nas horas mais difíceis.

Aos meus pais por sempre estarem dispostos a me ajudar com qualquer coisa, e nunca deixarem faltar nada na minha vida.

A Fanny e o Alex, que foram grandes amigos, nunca cobraram nada e sempre estavam dispostos a me ajudar em qualquer coisa que eu precisasse.

À Camila, que foi o que de melhor aconteceu ao longo da minha vida inteira. A pessoa mais importante que eu conheci ao longo do curso.

Aos pais dela, que possibilitaram que eu me sentisse em casa mesmo estando longe da minha família de verdade.

Ao meu orientador, Prof. Kalkreuth, pelo tempo investido em mim e por tudo que me ensinou.

A toda a galera do Lab. de Análises de Carvão, em especial a Carol, Rodrigo, Janaína, Matthew e Joseane, que me deram toda a ajuda que eu precisei para realizar meu trabalho de conclusão.

Ao pessoal do Centro de Tecnologia, em especial à Gelsa, Karime, André e Prof. Eduardo Osório, que me auxiliaram nas análises indisponíveis no Instituto de Geociências.

Ao Geólogo Rui Osório, da CRM pelo apoio técnico na obtenção das amostras de carvão.

Aos melhores parceiros de campo, Rodrigo, Arthur e Matheus.

À Carina e ao Matheus novamente, sem eles eu ainda estaria no quarto semestre.

À todos que de alguma forma, possibilitaram que esse trabalho acontecesse.

Muito obrigado!

RESUMO

A jazida de Candiota, no Estado do Rio Grande do Sul é o maior depósito de carvão do país, com reserva medida em 1,7 bilhões de toneladas. Atualmente são exploradas duas camadas de carvão com aproximadamente 2,5m de espessura cada, denominadas de “Camada Candiota Superior” e “Camada Candiota Inferior”. Estas duas camadas são mineradas pela estatal CRM. As outras camadas do depósito, S1-S9 e BL (camadas superiores) e I1-15 (camadas inferiores), não são exploradas e ainda não foram completamente caracterizadas para o uso termelétrico. Em Candiota localiza-se a usina termelétrica Presidente Médici, com capacidade de 446MW. Com a conclusão da construção da fase C da usina, que terá capacidade para 350MW a atual fornecedora de carvão para a usina terá que ampliar sua produção de carvão, que atualmente é de 1,6 milhão de toneladas/ano, sendo assim, é necessário um conhecimento de todas as camadas de carvão que constituem a jazida. Para o andamento do estudo, foram utilizadas amostras de carvão de quatro furos de sondagem realizados pela CRM em 2008. Foram identificadas 52 camadas de carvão nestes quatro furos com espessuras variando entre 0,08-1,52m, as análises petrológicas revelaram que o maceral com maior abundância é a vitrinita, com teores variando entre 4,2-56,6%, seguido pela inertinita (11,2-50%) e liptinita (2-23%). O valor médio da reflectância da vitrinita ($R_{\text{random}}(\%)$) indicou um valor de 0,41Rr(%) classificando o carvão como sub-bituminoso, tipo B. Os resultados da análise imediata revelaram que 46% das amostras são classificadas conforme a norma internacional da Comissão Econômica para a Europa das Nações Unidas como carvões de categoria inferior a muito inferior (teores de cinza entre 20-50%). O teor de umidade variou de 4,1-10%. A matéria volátil apresentou resultados que variam entre 33,4-63,4% (d.a.f). A análise elementar revelou resultados de carbono (% em peso) variando entre 12,3-47,3%, hidrogênio variando entre 1,9-4,8%, nitrogênio variando entre 0,25-1,5% e enxofre variando entre 0,32-9,8%. O poder calorífico recalculado em uma base seca e livre de cinzas varia entre 3550-6786 cal/g, classificando o carvão como sub-bituminoso, tipo A. Baseado na análise de difratometria de raios x, os minerais mais abundantes no carvão são quartzo, caulinita, illita e k-feldspato. A análise termogravimétrica em três amostras mostrou que a temperatura de início da combustão varia entre 326-331°C, com a temperatura de máxima reação variando entre 443-453°C. No processo de combustão para produção de energia elétrica são requeridos baixos teores de cinzas e umidade, baixo teor de enxofre e alto poder calorífico dos carvões. Todos os parâmetros das análises realizadas nos carvões estão em níveis perfeitamente aceitáveis para a geração de termoeletricidade.

ABSTRACT

The Candiota coalfield, located in the State of Rio Grande do Sul, is the largest coal deposit in the country, with measured reserve of 1.7 billion tons. Currently two coal seams, labeled "Candiota Superior" and "Candiota Inferior" with approximately 2.5 m thick each are exploited. These two seams are mined by government CRM. The other seams of the deposit, S1-S9 and BL (upper seams) and I1-I5 (lower seams), are largely unexplored and has not been fully characterized for use thermoelectric. In Candiota is located the Presidente Medici power plant with capacity of 446MW. With the completion of phase C, which will have capacity to 350MW, the current supplier of coal to the plant will have to expand its production, which is currently at 1.6 million tons / year, so knowledge of all the coal seams that constitute the deposit is necessary. In the present study, coal samples were taken from four drill holes made by the CRM in 2008. We identified 52 coal seams in these four holes with thicknesses ranging from 0.08 to 1.52 m, the petrological analysis revealed that the most abundant maceral is vitrinite, with levels ranging from 4.2 to 56.6%, followed by inertinite (11.2 to 50%) and liptinite (2-23%). The average value of vitrinite reflectance ($R_{\text{random}}\%$) is 0.41 Rr (%), a rank of sub-bituminous, type B. The results of proximate analysis revealed that 46% of the samples are classified according to international standard by the Economic Commission for Europe of the United Nations as, low grade to very low grade (ash content 20-50%). The moisture content ranged from 4.1 to 10%. The volatile matter showed results ranging from 33.4 to 63.4% (d.a.f). The ultimate analysis results revealed carbon (wt%) ranging from 12.3 to 47.3%, hydrogen ranging from 1.9 to 4.8%, nitrogen ranging from 0.25 to 1.5% and sulfur content ranging from 0.32 to 9.8%. The calorific value, recalculated on a dry ash free basis, varies between 3550-6786 cal / g, ranking as sub-bituminous coal, type A. Based on analysis of x-ray diffraction, the most abundant minerals in coal are quartz, kaolinite, illite and K-feldspar. Thermogravimetric analysis of samples of seam I2 showed that the onset temperature of combustion ranges from 326-331 °C, with the maximum reaction temperature ranging between 443-453 °C. In the combustion process to produce electric power, low levels of moisture and ash, low sulfur content and high calorific value of coal are required. Results of the tests performed indicated all parameters of the coal are within acceptable levels for generating thermoelectricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das principais jazidas de carvão do Brasil.	15
Figura 2 - Exemplo da distribuição vertical das camadas de carvão da jazida de Candiota e as litologias associadas referente ao furo F-371.	16
Figura 3 - Classificação do rank dos carvões de acordo com a norma norte americana (ASTM).	20
Figura 4 - Área de estudo com a localização dos quatro furos alvo deste trabalho.	25
Figura 5 - Mapa geológico detalhado da região de Candiota/RS.	26
Figura 6 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná. O retângulo vermelho demarca as unidades Permianas-Triássicas observadas na área de Candiota.	28
Figura 7 - Acompanhamento da perfuração do furo F-369 realizado pela CRM.	31
Figura 8 - Descrição de testemunho referente ao furo F-371.	32
Figura 9 - Fluxograma de processamento das amostras.	33
Figura 10 - Variação em algumas propriedades do carvão com o avanço do grau de carbonificação (rank).	36
Figura 11 - Diagrama funcional do equipamento de análise elementar.	39
Figura 12 - Partes do cilindro e bomba calorimétrica com o cilindro acoplado.	40
Figura 13 - Incidência de um feixe de raios-x sobre um mineral.	42
Figura 14 - Esquema mostrando os principais componentes da termobalança.	43
Figura 15 - Exemplo do gráfico gerado através da análise termogravimétrica da amostra 09-187, camada I2 do furo F-371 com as temperaturas inicial, máxima e final de reação expressas pelos símbolos T_i , T_p e T_f respectivamente.	44
Figura 16 - Identificação das camadas de carvão dos furos F-369, F-370, F-371 e F-372.	47
Figura 17 - Distribuição da camada I2 mostrando a sua espessura em metros nos quatro furos.	49
Figura 18 - Diagrama ternário mostrando a composição petrográfica dos grupos de macerais das amostras de carvão.	50
Figura 19 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos macerais, da matéria mineral e a reflectância da vitrinite ($R_{random}(\%)$) no furo F-369.	51
Figura 20 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos macerais, da matéria mineral e a reflectância da vitrinite ($R_{random}(\%)$) no furo F-370.	52

Figura 21 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos macerais, da matéria mineral e a reflectância da vitrinita (Rrandom(%)) no furo F-371.	53
Figura 22 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos macerais, da matéria mineral e a reflectância da vitrinita (Rrandom(%)) no furo F-372.	55
Figura 23 - Classificação segundo o percentual de cinzas.	58
Figura 24 - Variação nos teores de enxofre conforme o aumento da profundidade das camadas de carvão, média de todas as camadas dos quatro furos estudados.	59
Figura 25 - Comparação entre os valores de poder calorífico (d.a.f) e os percentuais de cinzas, vitrinita, inertinita e liptinita nas amostras de carvão.	60
Figura 26 - Classificação média de todas as camadas de carvão dos quatro furos estudados neste trabalho utilizando como parâmetros a reflectância da vitrinita (Rrandom(%)), o teor em peso (%) da matéria volátil (d.a.f) e o poder calorífico (d.a.f), acordo com a norma norte americana (ASTM).	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimos, máximos e médios das espessuras de carvão encontradas nas diferentes camadas dos quatro furos estudados neste trabalho.	49
Tabela 2 - Percentual de médio dos grupos macerais de cada furo e seus percentuais ponderados pela espessura das camadas.....	56
Tabela 3 - Percentuais médios de Vitrinita, Liptinita, Inertinita e matéria mineral encontrados nas diferentes camadas dos quatro furos estudados neste trabalho.	56
Tabela 4 - Valores mínimos, máximos e médios das espessuras de carvão encontradas nas diferentes camadas dos quatro furos estudados neste trabalho.	57
Tabela 5 - Valores em peso (%) da análise elementar dos carvões dos quatro furos.	58
Tabela 6 - Temperaturas de início (Ti), de reatividade máxima (Tp) e final (Tf) da combustão das amostras de carvão analisadas neste trabalho.	61
Tabela 7 - Classificação dos macerais.....	73
Tabela 8 - Identificação detalhada da ocorrência de carvão nos furos estudados.....	73
Tabela 9 - Análise petrológica detalhada do furo F-369, valores em percentagem.	75
Tabela 10 - Análise petrológica detalhada do furo F-370, valores em percentagem. ..	76
Tabela 11 - Análise petrológica detalhada do furo F-371, valores em percentagem. ..	77
Tabela 12 - Análise petrológica detalhada do furo F-372, valores em percentagem. ..	78
Tabela 13 - Resultados das análises imediata das amostras de carvão.	79
Tabela 14 - Resultados da análise elementar das amostras de carvão. Resultados em percentagem em peso.	80
Tabela 15 - Resultados do poder calorífico das amostras de carvão. Resultados em cal/g.....	81
Tabela 16 - Resultados da difração de raios x das amostras de carvão.....	82

LISTA DE ABREVIações

D.A.F – *Dry, ash free*, seco e livre de cinzas

DRX – Difração de raios x

S1, S2, S3... – Camadas superiores 1, 2, 3...

BL – Camada Banco Louco

I1, I2, I3... – Camadas inferiores 1, 2, 3...

Char – Material sólido remanescente das fases iniciais da queima do carvão devido a sua desvolatilização

CT – Central termelétrica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	14
1.1. INTRODUÇÃO	14
1.2. OBJETIVOS	17
1.3. ESTADO DA ARTE	18
1.3.1. Definição de Carvão	18
1.3.2. Formação do Carvão	18
1.3.3. Rank do Carvão	19
1.3.4. Constituintes Microscópicos do Carvão	20
1.3.5. Principais Trabalhos Relacionados à Caracterização do Carvão de Candiota	21
CAPÍTULO 2 – LOCALIZAÇÃO	24
2.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	24
2.2. GEOLOGIA REGIONAL	25
2.3. GEOLOGIA LOCAL	29
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIAS	31
3.1. METODOLOGIA	31
3.2. ANÁLISES PETROLÓGICAS	33
3.2.1 Preparação das Amostras para Análise Microscópica	34
3.2.2 Reflectância da Vitrinita Rrandom(%)	34
3.2.3 Análise dos Macerais	34
3.3 ANÁLISES QUÍMICAS	35
3.3.1 Preparação das Amostras	35
3.3.2 Análise Imediata	35
3.3.2.1 Percentual de Umidade	36
3.3.2.2 Percentual de Cinzas	37
3.3.2.3 Percentual de Matéria Volátil	37
3.3.2.4 Percentual de Carbono Fixo	38
3.3.3 Análise Elementar	38
3.3.4 Poder Calorífico	39
3.3.5 Difração de Raios X (DRX)	40
3.4 REATIVIDADE EM TERMOBALANÇA	42
3.4.1 Preparação das Amostras	42
3.4.2 Termogravimetria – TGA	42
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	46
4.1. IDENTIFICAÇÃO DAS CAMADAS	46
4.2. ANÁLISES PETROLÓGICAS	50
4.2.1 Análise de Macerais e Matéria Mineral	50
4.2.2 Reflectância da Vitrinita (Rrandom%)	57
4.3. ANÁLISES QUÍMICAS	57
4.3.1 Análise Imediata	57
4.3.2 Análise Elementar	58
4.3.3 Poder Calorífico	60

4.3.4 Difração de Raios x	61
4.4 REATIVIDADE EM TERMOBALANÇA	61
CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO	62
5.1 O PAPEL DOS PARÂMETROS QUÍMICOS, PETROLÓGICOS E DE REATIVIDADE NA COMBUSTÃO DO CARVÃO	62
5.1.1 O papel da Petrologia Orgânica	62
5.1.2 O papel da Química	63
5.1.3 O papel da Reatividade	65
5.2 GRAU DE CARBONIFICAÇÃO DO CARVÃO (<i>RANK</i>)	65
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS	69
ANEXO A – Tabelas	73

CAPÍTULO 1

1.1. Introdução

O carvão mineral foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas em larga escala pelo homem. Sua aplicação na geração de vapor para movimentar as máquinas foi um dos pilares da Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII. Já no fim do século XIX, o vapor foi aproveitado na produção de energia elétrica. Ao longo do tempo, contudo, o carvão perdeu espaço na matriz energética mundial para o petróleo e o gás natural, com o desenvolvimento dos motores a explosão. (ANEEL, 2008).

O interesse reacendeu-se na década de 70, em consequência, sobretudo, do choque do petróleo, e se mantém em alta até hoje.

A combustão para produzir vapor para geração de eletricidade representa o principal uso do carvão mundial em tempos presentes e para um futuro próximo (SUAREZ-RUIZ, 2008). No Brasil, o minério representa, no entanto, pouco mais de 1,3% da matriz da energia elétrica. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

Segundo Aneel (2008), as maiores jazidas brasileiras situam-se nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. As menores, no Paraná e São Paulo. As reservas brasileiras ocupam o 10º lugar no *ranking* mundial, mas totalizam 32,3 bilhões de toneladas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009), correspondendo a menos de 1% das reservas totais mundiais.

Do volume de reservas, o Rio Grande do Sul responde por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. Somente a Jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional. Mas o minério é pobre do ponto de vista energético e na maioria das vezes não admite beneficiamento nem transporte, em função do elevado teor de impurezas. Isto faz com que sua utilização seja feita sem beneficiamento e na boca da mina. (ANEEL, 2008).

A região onde o carvão de Candiota ocorre cobre uma área de aproximadamente 2000 km² (SILVA; KALKREUTH, 2005) figura 1.

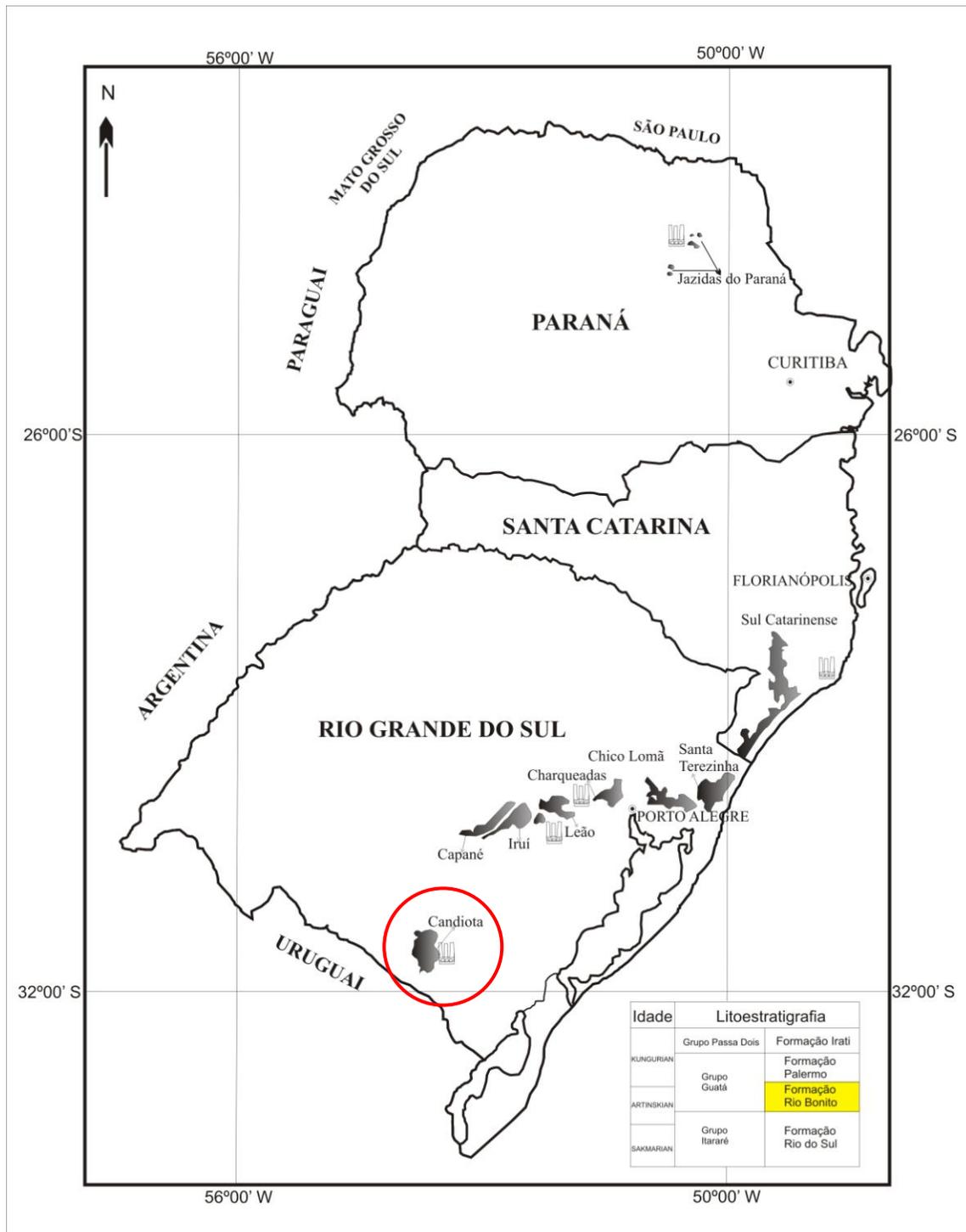


Figura 1 - Localização das principais jazidas de carvão do Brasil, idades e litoestratigrafia associadas.

Fonte: Dados da Pesquisa

As ocorrências de carvão estão atribuídas à Formação Rio Bonito, composta de arenitos fluviais a marinhos, siltitos carbonosos e a folhelhos de idade Permiano Inferior (Artinskian-Kungurian) (SCHNEIDER et al., 1974).

Desenvolvem-se até 17 camadas de carvão denominadas de Camadas Inferiores 1-5, Camada Candiota Inferior, Camada Candiota Superior, Camada Banco Louco e Camadas Superiores 1-9. Esporadicamente, podem ocorrer camadas

menores que não tem uma lateralidade contínua, estas são denominadas camadas Leito. A figura 2 ilustra como é a disposição das principais camadas de carvão na jazida de Candiota utilizando-se dados do furo F-371 da malha MVII da Companhia Rio-Grandense de Mineração.

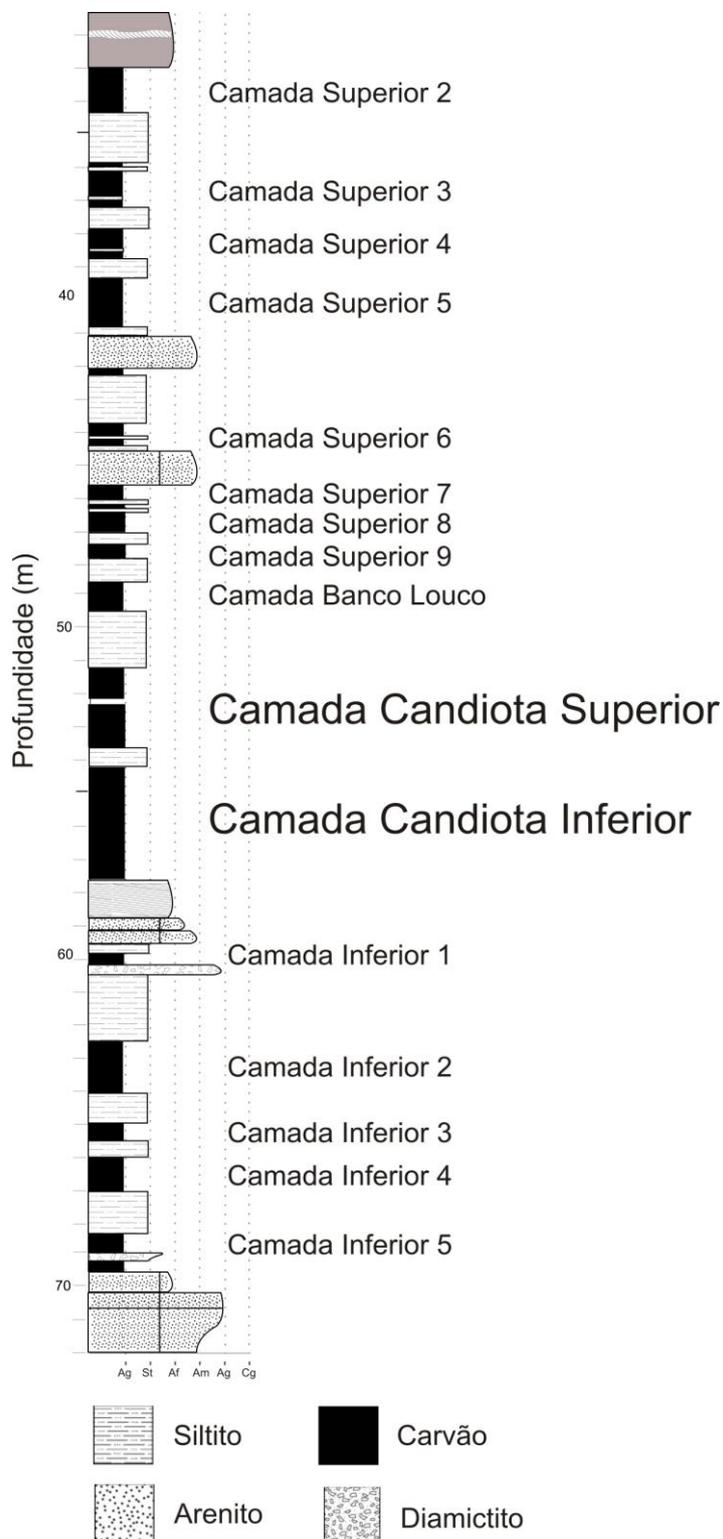


Figura 2 - Exemplo da distribuição vertical das camadas de carvão da jazida de Candiota e as litologias associadas referente ao furo F-371.
 Fonte: Dados da Pesquisa

Dois bancos de carvão (Camada Candiota Inferior, Camada Candiota Superior), com aproximadamente 2 metros de espessura cada, intercalados por uma camada de argilito de 80 cm, são atualmente minerados pela CRM. (PACHECO, 2008).

Acredita-se que o intervalo das camadas Inferior 1 até Inferior 5, localizadas abaixo das camadas Candiota Superior e Candiota Inferior, tem uma área de aproximadamente 32 km² com espessura cumulativa de até 8m (HOLZ & KALKREUTH, 2004). Como, no momento da exploração das camadas de carvão de Candiota, o terreno é recuperado com a reposição de parte da cobertura retirada e da cobertura vegetal, as camadas Superiores e Inferiores não estão sendo aproveitadas, diminuindo, assim, drasticamente as reservas totais do jazimento.

1.2. Objetivos

O objetivo geral desta monografia é estudar os aspectos geológicos e tecnológicos das camadas superiores, banco louco e inferiores do carvão da jazida de Candiota/RS visando seu aproveitamento econômico na produção de energia elétrica utilizando-se dados de quatro furos de sondagem realizados pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM) no ano de 2008 denominados de F-369, F-370, F-371 e F-372. Neste sentido, permeiam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) identificação e mensuração de todas as camadas encontradas nos quatro furos alvo deste trabalho.
- b) caracterizar quimicamente e petrologicamente as camadas de carvão utilizando diversos métodos.
- c) utilizar-se de um método tecnológico para contribuir com a caracterização do carvão.
- d) avaliar seu potencial para a geração de energia elétrica.

Além disso, a presente monografia visa contribuir para uma caracterização total de todas as camadas de carvão que ainda não são utilizadas para fins energéticos na jazida de Candiota, haja vista que a atual demanda pelo carvão da jazida de Candiota irá aumentar com a conclusão da construção da Fase C da Termelétrica Presidente Médici que acrescentará 350 MW de geração de energia aos atuais 446 MW.

1.3. Estado da Arte

1.3.1. Definição de Carvão

Segundo Schopf (1956) o carvão é uma rocha combustível que contém mais de 50 por cento do peso e mais de 70 por cento do volume de material carbonáceo, formada por compactação ou endurecimento de plantas remanescentes similar aos depósitos de turfa. Diferenças nos tipos de planta, no grau de carbonificação (*rank*), e escala de impureza são características das variedades de carvão.

1.3.2. Formação do carvão

Existem dois tipos de depósitos de carvões húmicos (bandados), que representam cerca de 90% dos carvões mundiais, segundo Gammidge (2001): os parálicos e os límnicos. Os depósitos parálicos dão a entender que havia uma conexão de hidrológica com o mar no tempo da deposição da turfa. Estes podem ser encontrados ao longo de planícies litorâneas, lagunas de barreira, estuários e deltas. Os depósitos limnicos, segundo Bustin *et al.*, (1983), são os carvões depositados nas regiões entre montanhas, onde o nível de água era controlado através de condições locais em vez de regionais.

Os carvões sapropélicos são compostos por esporos, polens ou algas, depositadas como lama no fundo de lagos e lagunas. Possuem uma textura homogênea (não bandada), amorfa, são duros e quebram de maneira conchoidal, representam cerca de 10% dos depósitos de carvão do mundo.

A transformação do material vegetal em carvão é chamada de carbonificação, e é composta por dois estágios conforme Gammidge (2001): Primeiro estágio chamado carbonificação bioquímica. A carbonificação bioquímica consiste da ação de bactérias que vivem na água de pântanos, onde a matéria orgânica está sendo depositada. Estes organismos atacam as substâncias mais facilmente degradáveis, os carboidratos, e, posteriormente, os mais resistentes, tais como as cascas, cutículas, resinas e ceras. A matéria vegetal, na fase inicial, decompõe-se na presença de uma certa quantidade de oxigênio e pelas bactérias aeróbicas. À medida que a matéria orgânica é acumulada e soterrada, a degradação ocorre em condições de ausência de oxigênio, e o papel principal é exercido pelas bactérias anaeróbicas. A carbonificação bioquímica termina quando atinge o *rank* de carvão sub-betuminoso e quando substâncias húmicas polimerizam. O segundo estágio é chamado de

carbonificação físico-química. O início desta fase é caracterizado pela subsidência gradual da matéria orgânica degradada, onde ocorre um aumento na temperatura e pressão. A influência destes dois parâmetros no carvão é a perda de voláteis e um aumento percentual de carbono. As características e as propriedades de um carvão dependem da matéria orgânica, da maneira como transcorreram os processos bioquímicos e físico-químicos e da sua duração após o soterramento da matéria prima.

1.3.3. Rank do carvão

O grau de diagênese e metamorfismo que o carvão foi submetido pelo soterramento e efeitos tectônicos determinam o grau de carbonificação (rank). Após o soterramento, processos geoquímicos convertem turfa em linhito, e mais tarde a carvão sub betuminoso e antracito. Os parâmetros principais para se medir os estágios do grau de carbonificação de um carvão envolvem: umidade, poder calorífico, matéria volátil, carbono fixo total, teor de hidrogênio e reflectância da vitrinita. Esses estágios são referidos como níveis de carbonificação, que indicam o nível do *rank* de carvão.

Segundo Bustin *et al*, (1983), a classificação do carvão nunca foi uma tarefa simples, devido à complexidade das propriedades químicas e físicas e seus usos variados.

Uma das classificações é a norte americana ASTM, que é baseada nos estágios de carbonificação e este nas propriedades físicas e químicas do carvão, conforme a figura 3.

Rank		Refl. Vitrin. Rr%	Matér. Volátil %	Carb. Fixo (d.a.f)	Umidade %	Poder Calor. btu/lb (kcal/kg)	Applicability of Different Rank Parametres		
GERMAN	USA								
TORF	PEAT	0.2							
		0.3		Ca. 60	Ca. 75				
WEICH	BRAUNKOHLE	0.3				7200 (4000)			
MATT		LIGNITE	0.4						
		0.4		Ca. 71	Ca. 25	9900 (5500)			
GLANZ	HIGH VOL. BIT.	0.5							
FLAMM		C	0.6	Ca. 77	Ca. 8.10	12600 (7000)			
		B	0.7						
GASFLAMM		A	0.8						
			0.9						
GAS	STEINKOEHLE	1.0							
FETT		MED. VOL. BIT.	1.2	Ca. 87		15500 (8650)			
			1.4						
ESS		LOW. VOL. BIT.	1.6						
MAGER	SEMI ANTHR.	2.0							
ANTHRAZIT	ANTHR.	3.0		Ca. 91		15500 (8650)			
META-ANTHR.	META-A.	4							

Figura 3 - Classificação do rank dos carvões de acordo com a norma norte americana (ASTM)

Fonte: Stach *et al.*, 1982 Modificado

1.3.4. Constituintes microscópicos do carvão

Os carvões são constituídos de uma mistura complexa de componentes microscópicos orgânicos chamados macerais e de material inorgânico. Macerais

segundo ICCP (1971) são remanescentes de plantas carbonificadas as quais representam forma e/ou estrutura ainda preservada no estágio do carvão betuminoso (grau de evolução térmica) ou ainda produtos da degradação os quais a origem vegetal não pode mais ser reconhecida.

Há três grupos básicos de macerais, que são: a vitrinita derivada da carbonificação do tecido da madeira. A liptinita é derivada de resinas, esporos, cutículas e partes enceradas de vegetais. E a inertinita, que tem mesma origem da vitrinita, mas sofreu oxidação antes da deposição.

Os constituintes inorgânicos são constituídos principalmente por silicatos, argilo-minerais, carbonatos e sulfetos. A tabela 7, anexo A mostra os principais grupos macerais que foram utilizados para as análises deste trabalho.

1.3.5. Principais trabalhos relacionados á caracterização do carvão de Candiota

A sucessão de camadas de carvão do Permiano Inferior da Bacia do Paraná na jazida de Candiota, no sul do Brasil, está ligada a uma sequência deposicional de terceira ordem, onde as mais importantes camadas ocorrem no início do trato de sistemas transgressivo. Segundo Holz & Kalkreuth (2004), na área de Candiota, a principal zona de carvão consiste de 17 camadas, que foram analisadas por propriedades petrográficas. E comparados com uma estratigrafia de sequências que melhorou o entendimento dos controles estratigráficos e de formação das camadas de carvão, incrementando guias para uma exploração ótima do recurso energético. Os resultados mostram que mudanças locais nas tendências de acomodação e alto influxo de sedimentos impossibilitam a formação de carvão nos tratos de sistemas de níveis alto e baixo, enquanto que o maior desenvolvimento de camadas de carvão ocorreu em tratos de sistema transgressivo. A distribuição das camadas e a espessura das mesmas é diretamente controlada pelos eventos de inundação. A principal variação na espessura e extensão ocorreu na, ou perto da, superfície limite de parasequências. Os mais importantes carvões, que tem mais de 2,5m de espessura, ocorreram no início do trato de sistema transgressivo (HOLZ & KALKREUTH, 2004).

Os carvões da Bacia do Paraná foram formados por sistemas deposicionais de tratos diferentes: deltaicos de trato de nível baixo e lagunar/estuarinos de trato de nível transgressivo. O carvão explorado atualmente em Candiota é o formado pelo sistema lagunar/estuarino, sendo que o carvão deltaico nunca teve grande importância até agora, por isso não era explorado. Iniciou um estudo sobre as Camadas de Carvão

Inferiores de Candiota, propondo uma análise estratigráfica com implicações para seu aproveitamento econômico (RODRIGUES, 2008).

As camadas de carvão presentes neste sistema deposicional são: a Camada Candiota Superior e Camada Candiota Inferior e o Conjunto Superior de Camadas, situando-se na porção inferior deste intervalo deposicional. Estas litologias resultaram da constituição de sistemas deposicionais estabelecidos sobre uma baixa planície fluvial, costeira, constituída a partir de restingas evoluídas de cordões litorâneos, em linha de costa progradante. Estes cordões, quando emersos, teriam se constituído em verdadeiras cadeias costeiras, que balizaram e protegeram da ação do mar, em sua retaguarda, extensos lagos rasos estagnantes e as grandes turfeiras a eles associadas (Camada Candiota), as quais constituíram as mais extensas e espessas camadas de carvão conhecidas no Brasil (ABICHÉQUER, 2007).

Segundo Simão (2007), análises petrológicas de amostras dos carvões da termoelétrica Presidente Médici em Candiota mostraram que o maceral mais abundante é a colotelinita, do grupo das vitrinitas, a reflectância das vitrinitas mostrou valores entre 0,41 e 0,49 Rrandom, que caracterizaram o *rank* como Sub-betuminoso. As análises químicas constataram que entre os elementos maiores, a maior ocorrência é de SiO₂ e Al₂O₃. Nos elementos traços, as maiores ocorrências constadas foram de Ba e Zr.

O carvão mineral é uma importante fonte de energia, a qual é obtida mediante a queima do mesmo, gerando grande quantidade de cinzas. Mas, o aproveitamento destas cinzas é crescente, principalmente em bioremediação de solos contaminados e na construção civil (produção de blocos de concreto e cimento). Em análises químicas de carvões da região sul do Brasil observou-se que os carvões da região de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o qual se encontra a jazida de Candiota, foram encontradas concentrações semelhantes dos elementos Ag, As, Au, B, Ba, Be, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, Hg, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Pt, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Tl, U, V, Zn, Zr, Y, Al, Ca, Fe, Na, Mg, K, P, S, Si e Ti em níveis mundialmente encontrados (KALKREUTH *et al.*, 2006; DEPOI, 2007).

É sugerido um modelo deposicional de turfa para a formação de carvão como se fosse um pântano aberto, com elevados conteúdos de material detrítico orgânico e argilominerais. Resultados de análises geoquímicas mostraram que a matéria orgânica terrestre foi predominante, pois é indicada pelos índices de hidrogênio e oxigênio, como também pelos índices de distribuição de carbono (SILVA 1994, 1999, 2005).

Kalkreuth *et al.* (2006) caracterizaram quimicamente e petrograficamente os carvões permianos da Bacia do Paraná (Jazidas de Santa Teresinha, Leão-Butiá e Candiota, RS). Para isto, realizaram análises de reflectância da vitrinita e análises de

macerais além de análises químicas para identificar o conteúdo de matéria mineral, a distribuição de elementos-traço e elementos maiores no carvão. Esse estudo encontrou um carvão rico em matéria mineral, com predominância de SiO_2 e Al_2O_3 , além de concentrações de elementos maiores e traços, como Fe, B e S controlados por padrões deposicionais, com valores aumentando em camadas de carvões cobertos por estratos marinhos.

Kalkreuth *et al.* (2001) estudaram o carvão permiano no RS, suas características químicas e petrográficas. Para alcançar o objetivo do trabalho, os autores realizaram análises petrográficas, como análise de macerais e reflectância da vitrinite e análises químicas, *ICP-AES*, *ICP-MS* (para identificação de elementos-traços), além de análise imediata, análise elementar, poder calorífico e teor de enxofre. Os autores identificaram carvão subbetuminoso em Candiota e betuminoso alto volátil em Santa Teresinha. Predominam macerais do grupo da vitrinite e inertinita. Além disso, as análises químicas mostraram um alto conteúdo de cinzas, em torno de 48.5 wt%, e 1,66 wt% de enxofre.

Silva (1999) e Silva & Kalkreuth (2005) estudaram a petrografia dos carvões nas jazidas do Leão e Candiota, RS, Permiano Inferior, da Bacia do Paraná. Para tanto se aplicou as análises petrográficas – reflectância da vitrinite e análise de macerais - além das análises químicas, tais como análise elementar e poder calorífico. Os estudos obtiveram como resultados, na camada inferior do Leão carvão para-betuminoso e nas camadas Candiota carvão subbetuminoso. Além disso, encontrou-se uma tendência de deposição em pântanos de águas abertas para todas as camadas em estudo.

CAPÍTULO 2

2.1. Localização da área

A área do trabalho localiza-se na cidade de Candiota, ao extremo sul do Estado do Rio Grande do Sul (figura 4). A usina termelétrica Presidente Médici pertence à Eletrobrás – Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica S.A. (CGTEE), e é abastecida pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM), que possui reservas de $1.419,41 \times 10^6$ toneladas (CRM, 2010) e uma produção de 1.600.000 toneladas por ano de minério para atender às necessidades da usina.

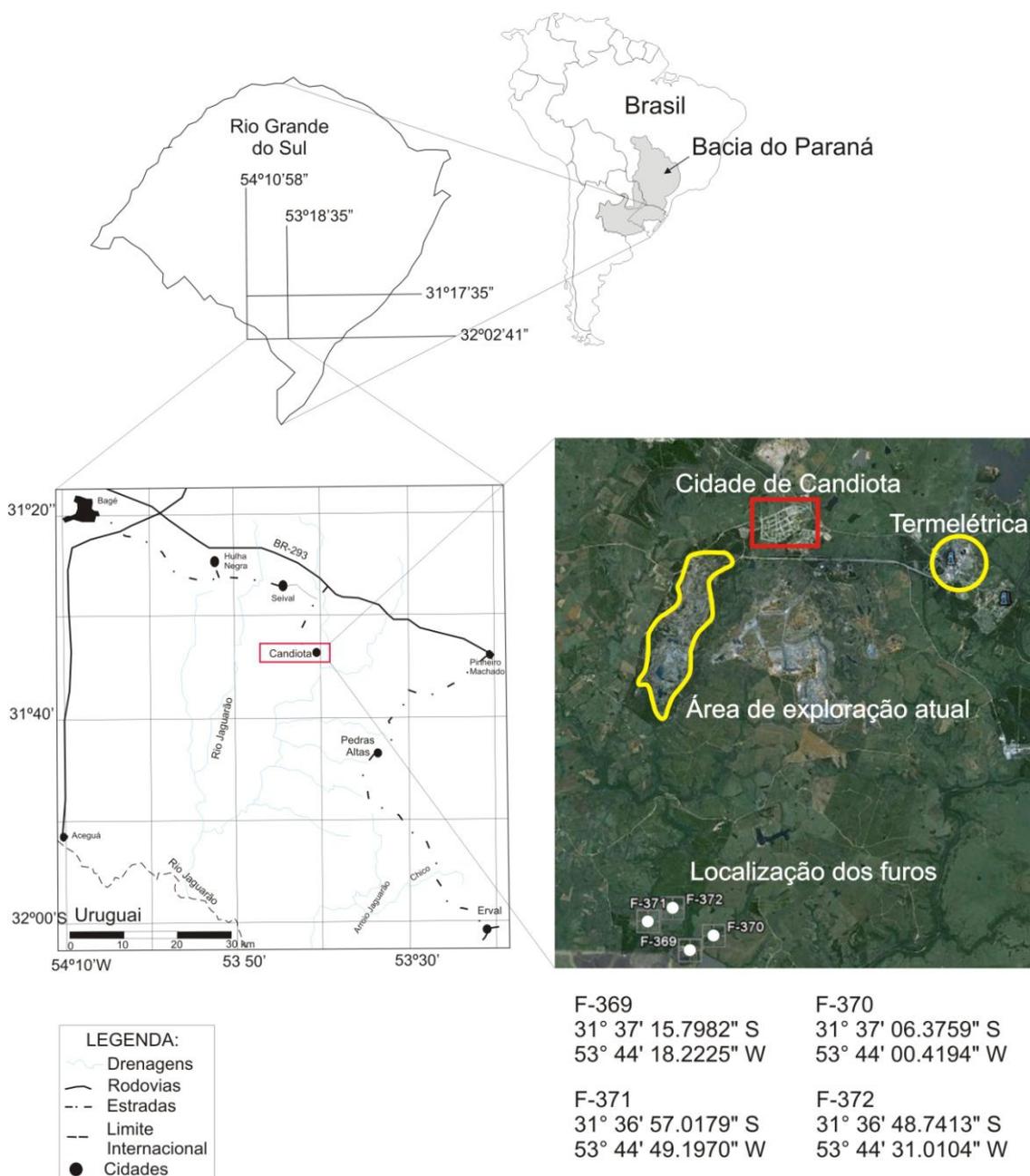


Figura 4 - Área de estudo com a localização dos quatro furos alvo deste trabalho.
Fonte: Dados da Pesquisa

2.2. Geologia Regional

O embasamento pré-cambriano na região de Candiota está representado, na porção nordeste da área, pelas rochas metamórficas do Grupo Porongos e unidades sedimentares eo-paleozóicas dos Grupos Bom Jardim (Formação Arroio dos Nobres) e Camaquã (Formação Guaritas). O embasamento cristalino ocorre nas porções extremo noroeste e sudeste da região, e está representado, respectivamente, por gnaisses do Complexo Cambaí. As demais unidades lito-estratigráficas observadas na Região de Candiota pertencem aos pacotes sedimentares de idade Permiana da Bacia do Paraná (figura 5).

A bacia do Paraná é uma bacia intracratônica desenvolvida sobre a crosta continental e preenchida com rochas sedimentares e vulcânicas, com idades variando do Ordoviciano ao Cretáceo (ZALAN *et al.* 1990). Esta bacia está situada na parte centro-leste do Continente Sul-Americano e ocupa cerca de 1.100.000 km² de área brasileira, além de mais de 300.000 km² distribuídos entre os territórios do Uruguai, Paraguai e Argentina. Segundo Milani *et al.* (1994) o pacote sedimentar-magmático da bacia do Paraná constitui-se de seis grandes seqüências deposicionais (figura 6) limitadas por discordâncias regionais: ordovicio-siluriana, devoniana, carbonífera-eotriássica, neotriássica, jurássica e neocretácea. O carvão em estudo pertence à Formação Rio Bonito, da seqüência carbonífera-eotriássica. Sobre a estratigrafia de seqüências, Milani *et al.* (1994) conclui que as três seqüências mais antigas relacionam-se a ciclos transgressivos-regressivos paleozóicos e as três seqüências mais jovens a pacotes sedimentares continentais e de rochas ígneas.

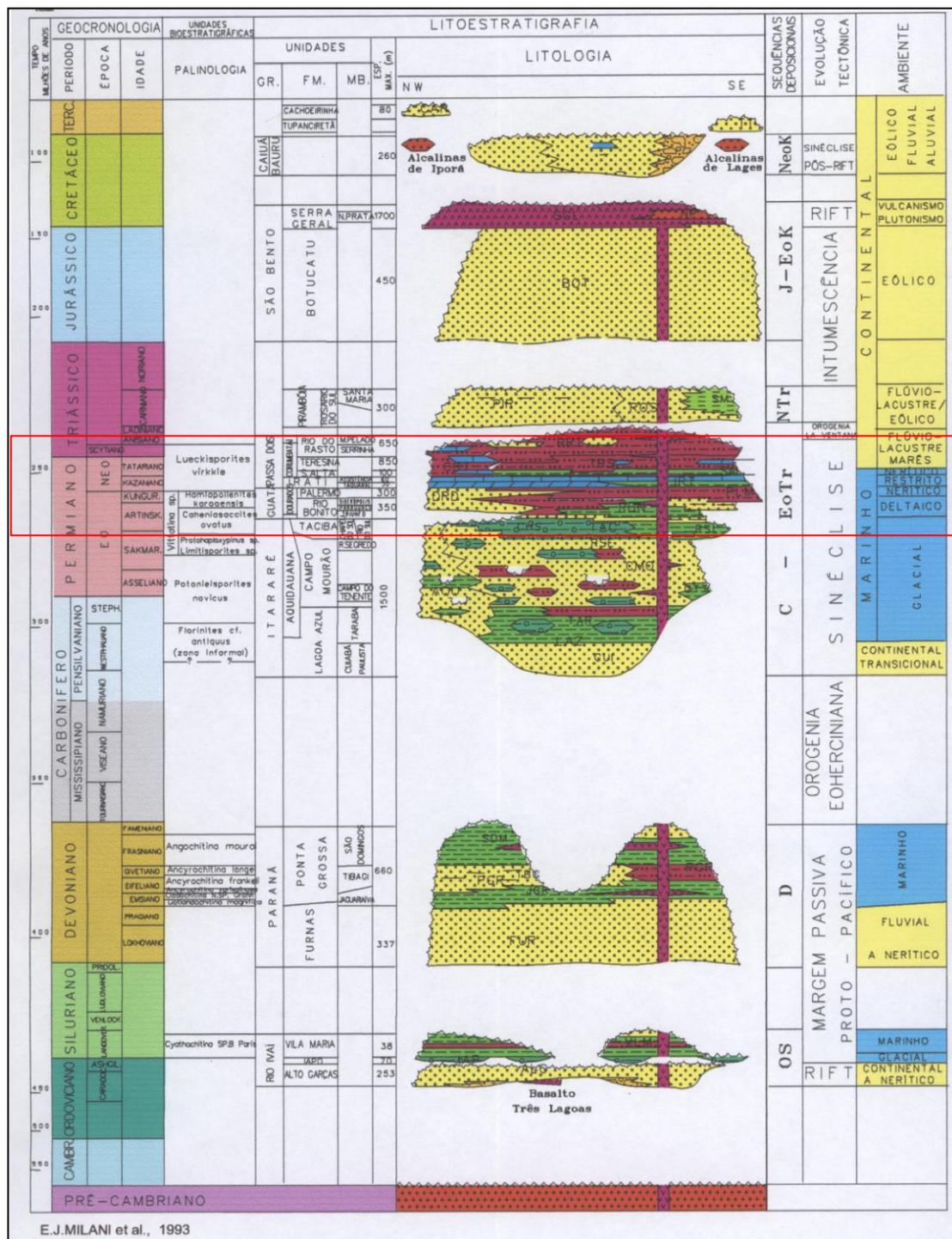


Figura 6 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná. O retângulo vermelho demarca as unidades Permianas-Triássicas observadas na área de Candiotá.

Fonte: Milani et al., 1994 Modificado

A Formação Rio Bonito constitui-se de cunhas arenosas que quebraram momentaneamente a tendência transgressiva da sedimentação carbonífera-permiana no Artinskiano/Kunguriano. ZALÁN et al. (1990) atribuiu tal episódio de reativação de áreas fonte a Orogenia Tardiherciana na margem ativa do continente. Arenitos

associados a leitos de carvão, siltitos e folhelhos, localmente carbonosos formam um contexto de sedimentação deltáica.

2.3. Geologia Local

A área em questão localiza-se na Depressão Periférica, uma faixa aflorante de rochas sedimentares da bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul, com ocorrências de carvão na Formação Rio Bonito, sendo-lhe atribuída a idade de Permiano Inferior.

Segundo Teixeira *et al.* (2004), na área da Mina de Candiota, a geologia é representada por uma sequência sedimentar subdividida em três intervalos litológicos distintos, pertencentes à Formação Rio Bonito ocorrendo, no intervalo basal rochas compostas, basicamente, por arenitos e arenitos conglomeráticos sem ocorrências de carvão. Sua formação é interpretada a partir da deposição num sistema fluvial pertencente a uma planície aluvial médio-distal. A porção mediana é caracterizada pela ocorrência de camadas de carvão com intercalações de argilitos, folhelhos e, subordinadamente, siltitos formadas em ambiente de turfeira, relacionado à existência de uma laguna ou lagoa rasa protegida, inclusive de ingressões de água salobra, por barreira litorânea em processo de assoreamento. A dinâmica de oscilação do nível d'água teria propiciado o desenvolvimento de turfeiras durante a evolução geológica da região. O intervalo superior da sequência sedimentar caracteriza-se pela ocorrência de quartzito arenito médio a fino, por vezes grosseiro, possivelmente representante de depósitos sedimentares associados a uma paleobarreira, com intercalações de argilitos cinza claro a esbranquiçado. Os argilitos seriam depósitos lagunares ocorridos em período de migração da barreira, de possível caráter transgressivo, uma vez que os arenitos assentam-se sobre o intervalo carbonoso intermediário da sequência.

A Formação Rio Bonito registra inicialmente um Trato de Sistemas de Mar Baixo seguido por um Trato de Sistemas Transgressivo, no qual as mais importantes camadas de matéria orgânica que posteriormente formaram o carvão foram depositados. O Trato de Sistemas Transgressivo pode ser dividido em quatro para-sequências: a primeira composta por arenitos que estão em *onlap* sobre o Trato de Sistemas de Mar Baixo, a segunda, recobrando a primeira, formada por tempestitos de um sistema de ilha barreira-laguna onde a os carvões das camadas inferiores foram formados, a terceira, que recobre o sistema de ilha barreira-laguna com conjuntos de ciclos tempestíticos, formou as camadas Superior 9, Camada Banco Louco e Camada Candiota Superior e Camada Candiota Inferior, na quarta para-sequência não houve a

deposição de turfa suficiente para a formação de carvão. (DELIA-FÁVERA, 1995), (HOLZ & KALKREUTH, 2004).

O mergulho regional das camadas, suave com caimento para sul-sudoeste, e os falhamentos relativamente abundantes, desempenham importante papel na distribuição das áreas com possibilidades de mineração a céu aberto. Estas zonas, conjugadas com locais onde ocorrem as maiores espessuras de minérios e melhor relação estéril/minério, definem zoneamento preferencial da jazida, estabelecendo prioridades de exploração do minério em condições econômicas favoráveis.

CAPÍTULO 3

3.1. Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho constitui-se de três etapas: a etapa pré-campo, etapa campo e etapa pós-campo.

A Primeira Etapa ou Etapa Pré – Campo constitui-se de uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos relacionados à geologia e petrologia da área de Candiota, bem como sobre o carvão lá encontrado e minerado.

Na Segunda Etapa ou Etapa de Campo foi realizado o acompanhamento da perfuração de um furo de sondagem (figura 7), com a discussão com o Geólogo Rui Osório da CRM sobre os problemas durante a perfuração e os meios para o transporte das caixas contendo os testemunhos para Porto Alegre.



Figura 7 - Acompanhamento da perfuração do furo F-369 realizado pela CRM em 23 de setembro de 2008.

Fonte: Dados da Pesquisa

A terceira Etapa ou Etapa Pós-Campo envolveu a descrição dos testemunhos com a identificação das camadas de carvão, o processamento das amostras e a realização de Análises Químicas e Petrográficas das amostras em questão. A descrição dos testemunhos (figura 8) ocorreu com o intuito de identificar as camadas superiores e inferiores de carvão e separá-las das rochas sedimentares que não fazem parte do estudo deste trabalho. O processo de descrição dos testemunhos também tinha a função de separar as camadas com espessura superior a 20 cm das com espessura inferior a 20 cm, por ser necessária a grande quantidade, em peso, de amostras para a realização de testes de beneficiamento.



Figura 8 - Descrição de testemunho referente ao furo F-371.

Fonte: Dados da Pesquisa.

O processamento de cada amostra obedeceu ao fluxograma como mostra a figura 9.

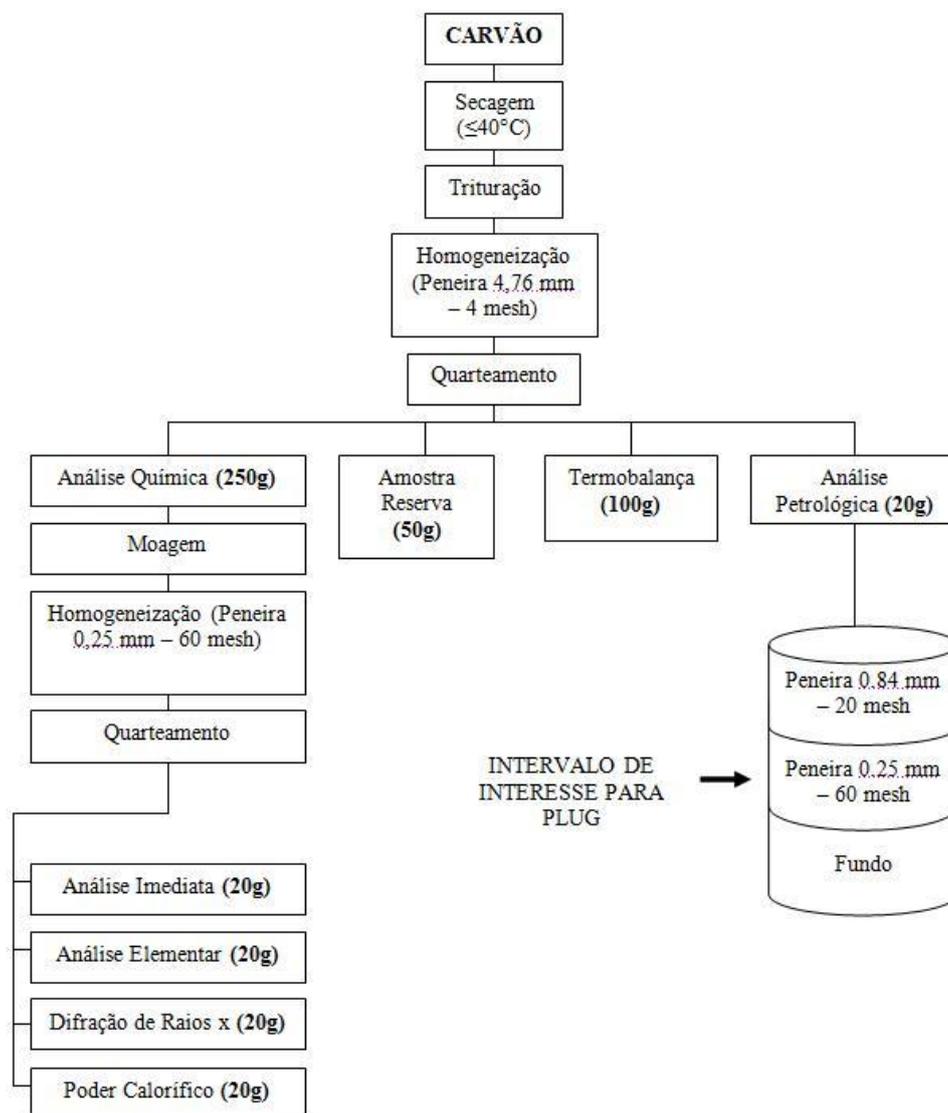


Figura 9 - Fluxograma de processamento das amostras.
Fonte: Dados da Pesquisa

Para alcançar o objetivo proposto na disciplina de Projeto Temático em Geologia III para esse trabalho, foram realizadas as análises químicas, petrológicas e reatividade em termobalança listados a seguir:

3.2. Análises petrológicas

Foram realizadas análises petrográficas a fim de caracterizar e classificar os carvões das camadas superiores e inferiores dos quatro furos descritos, através da análise quantitativa dos grupos de macerais e determinação do Grau de Carbonificação (*rank*) utilizando a técnica da reflectância da vitrinita, para isto, foram confeccionadas seções polidas das amostras.

3.2.1 Preparação das Amostras para Análise Microscópica

As amostras foram reduzidas a uma granulometria inferior a 0,84mm e superior a 0,25mm para a confecção de seções polidas em grão. Estas amostras destinadas à confecção das seções polidas foram preparadas com uma mistura de resina do tipo Epoxi (Araldite CYD248) e endurecedor (HYD951), (20% do conteúdo de Araldite). Após o endurecimento, as seções foram submetidas a desbaste de uma das faces com lixadeira automática rotativa da marca *Buehler*, modelo *Ecomet 4* e *Automet 2* com lixas de placas de diamante de 45 μ m e 9 μ m, em ordem decrescente de granulometria. Após o lixamento, foi feito o polimento em politriz automática da marca *Buehler* com suspensão de aluminas de granulometria de 0,3 μ m e 0,05 μ m, usando *pellon polishing cloth* e *silk cloth*, respectivamente, com banhos em jatos de água seguidos de intervalos de 2 minutos em ultra som, para lavagem e eliminação de cada tipo de alumina.

3.2.2 Reflectância da Vitrinita Rrandom(%)

Existe uma nítida relação entre o poder refletor de um maceral e seu teor de carbono e/ou matéria volátil, significando que o *rank* de um carvão pode ser determinado medindo-se sua reflectância em uma superfície polida (Stach *et al.* 1992).

O método para definição do poder refletor de uma amostra de carvão consiste na realização de 100 medidas para comparação do poder refletor das vitrinitas desta amostra com padrões de reflectância conhecidos e assim determinar o grau de carbonificação (*rank*) do carvão analisado. O equipamento utilizado é um Microscópio *Leica DM6000 M* de luz refletida, objetiva de 20X, em óleo de imersão *Immersion Oil For Microscopy*, com índice de refração de 1,518 e oculares de 20X com uma câmera digital acoplada a um monitor e conectado a um computador utilizando o programa *Diskus Fossil*. As análises serão realizadas no Laboratório de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo. O Padrão utilizado foi de Yttrium – Aluminium – Garnet, com reflectância nominal de 0,895 Rrandom % (ISO 7404/5, 1994).

3.2.3 Análise dos Macerais

A análise dos macerais baseia-se na contagem de 500 pontos (ISO-7404/3, 1984) para a identificação e quantificação dos diferentes macerais e matéria mineral contidos na amostra. É realizada em luz branca refletida e em luz de fluorescência através de excitação do filtro azul, a qual ajuda na identificação dos macerais do grupo liptinita. Os resultados da análise petrográfica são expressos em Vol%. O equipamento e o *software* utilizado é o mesmo para a determinação da reflectância da vitrinita.

3.3 Análises Químicas

Foram realizadas as seguintes análises químicas: 1 – Análise imediata para determinação dos teores de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. 2 – Análise elementar para determinação dos principais elementos da matéria orgânica presentes no carvão, ou seja, carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio. 3 – Difração de raios-x para a caracterização e identificação da matéria mineral e orgânica do carvão. 4 – Poder calorífico para determinação da energia produzida pela combustão de uma amostra de carvão.

3.3.1 Preparação das Amostras

As amostras foram reduzidas em moinho a uma granulometria inferior a 0,25mm, quarteadas e separadas em potes plásticos contendo a quantidade necessária de amostra para a análise.

3.3.2 Análise Imediata

As medidas dos teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo tem sido usadas em larga escala ao longo de 160 anos. (SUAREZ-RUIZ, 2009). No entanto, ela é falha como indicador para a determinação do *rank* (figura 10), porque podem ocorrer uma variação significativa entre os valores de matéria volátil, que podem ser influenciados pelo conteúdo mineral contido em cada amostra. Segundo Alpern *et al.* (1984), carvões com elevados conteúdos de minerais, ao serem submetidos a temperaturas elevadas, como ocorre nas análises imediatas (>700°C), provocam resultados de matéria volátil superestimados. Isto ocorreria em função da transformação de minerais, como argilas, carbonatos e os sulfetos, quando submetidos a tais temperaturas.

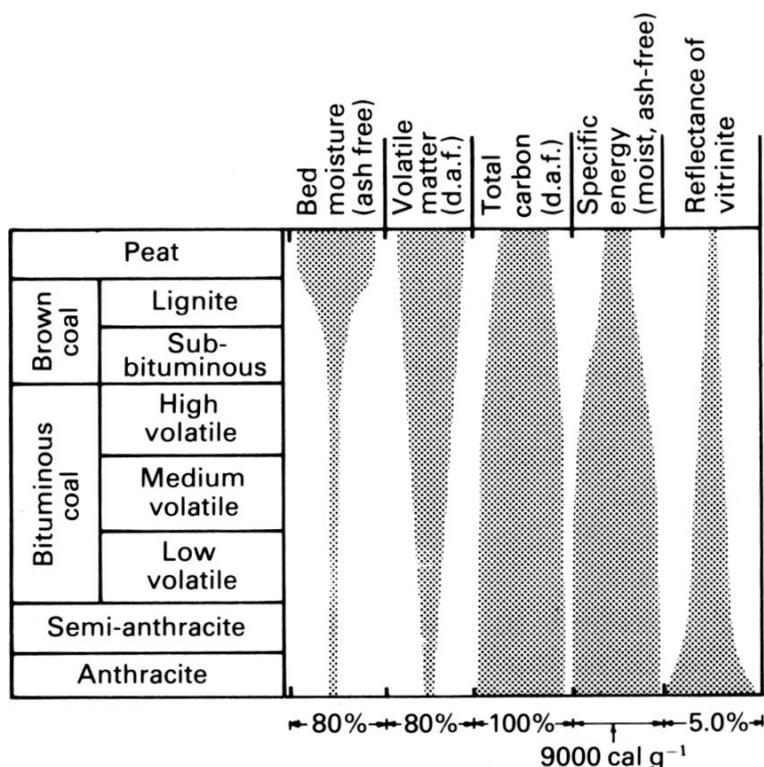


Figura 10 - Variação em algumas propriedades do carvão com o avanço do grau de carbonificação (rank).

Fonte: Coal Geology and Coal Technology, 1984 Modificado

3.3.2.1 Umidade

Essencialmente água, é determinada de acordo com a norma ASTM D 3173-87, e consiste no cálculo da perda de peso da amostra, quando esta é aquecida sob condições rígidas de controle de temperatura, tempo e atmosfera. É utilizada principalmente para recalcular os outros resultados analíticos em uma base livre de umidade (base seca). O procedimento consiste em pesar 1,0g de amostra em um cadinho de vidro e levar para um forno pré-aquecido a uma temperatura entre 104°C-110°C, durante uma hora aplicando-se um fluxo de ar seco. Ao final, pesa-se novamente a amostra e calcula-se o teor de umidade através da equação:

$$\text{Percentual de Umidade} = [(A-B)/A] \times 100$$

Onde "A" = massa da amostra em gramas (1,0g). E "B" a massa da amostra usada após o aquecimento.

3.3.2.2 Conteúdo de Cinzas

Os resíduos inorgânicos que permanecem após a ignição da combustão do carvão são denominados de cinzas. Para a determinação do teor de cinza em uma dada amostra é necessária a pesagem dos resíduos após a queima do carvão sob condições rígidas de controle de peso da amostra, de temperatura, tempo e atmosfera de acordo com a norma ASTM D 3174. Para esta determinação, pesa-se 1,0g da amostra em um cadinho de porcelana, leva-se para um forno de mufla em temperatura ambiente. Inicia-se o aquecimento do forno gradualmente até 500°C durante a primeira hora, e até 750°C no final da segunda hora, após, mantém-se esta temperatura por mais duas horas. Durante o aquecimento, é mantido uma taxa de fluxo de ar de 2-4 mudanças do volume do ar dentro do forno, por minuto. Após as quatro horas de aquecimento, a amostra é resfriada e então pesada. O percentual de cinzas é calculado pela expressão abaixo:

$$\text{Percentual Cinza} = [(A-B)/C] \times 100$$

Onde “A” = soma da massa do cadinho com os resíduos das cinzas (peso depois do aquecimento). “B” é a massa do cadinho vazio. E “C” é a massa da amostra utilizada antes da queima (1,0g).

3.3.2.3 Matéria Volátil

Este método determina o percentual de produtos gasosos o qual é liberada sob condições de aquecimento controladas seguindo a norma ASTM D 3175. Para determinação, pesa-se 1,0g da amostra em um cadinho de platina com tampa, leva-se para um forno de mufla pré-aquecido a uma temperatura de 950°C por 7 minutos. Após este tempo, retira-se o cadinho do forno e deixa-se esfriar até a temperatura ambiente, para então pesar novamente a amostra. O percentual de matéria volátil é calculado em duas etapas pelas expressões abaixo:

$$\text{Percentual de Perda de Peso} = [(A-B)/A] \times 100$$

Onde “A” = massa da amostra utilizada (1,0g). “B” = massa da amostra após o aquecimento (peso depois do aquecimento).

Então o percentual de matéria volátil é dado pela expressão:

$$\text{Percentual de Matéria Volátil} = C - D$$

Onde “C” = % Perda de Peso. E “D” = % de Umidade, determinado pela norma ASTM D 3173-87 descrita anteriormente.

3.3.2.4 Carbono Fixo

Expressa a quantidade de matéria orgânica não volátil no carvão. É um valor calculado pela soma dos percentuais de umidade, cinza e matéria volátil, subtraído de 100, como mostra a expressão abaixo:

$$\text{Percentual de Carbono Fixo} = 100 - (\% \text{ Umidade} + \% \text{ Cinza} + \% \text{ Matéria Volátil})$$

3.3.3 Análise Elementar

A análise elementar é um termo usado na determinação dos principais elementos presentes na matéria orgânica do carvão, isto é carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio. O procedimento analítico pode ser encontrado na norma ASTM D-5373 (figura 11). Ela baseia-se em que cada amostra de carvão é individualmente queimada em ambiente oxidante ao passar por dois fornos, um de combustão e outro de oxidação, com temperaturas 1150°C e 850°C respectivamente. Os gases produzidos na combustão então são carregados por uma corrente de gás hélio até um terceiro forno de redução, onde são formados os gases N₂, CO₂, H₂O e SO₂ passíveis de uma quantificação, juntamente com o gás hélio que carrega estes outros gases formados. Essa mistura de gases é então direcionada para três colunas, onde são detectados os valores de condutividade térmica (TCD). Os resultados são dados em porcentagem dos elementos C, H, N e S, o teor de oxigênio é dado pela soma dos quatro elementos citados mais o teor de cinzas, subtraído por 100. As análises elementares dos carvões foram realizadas em equipamento da marca *Elementar* modelo *Vario MACRO* do Laboratório de Siderurgia – LASID do Centro de Tecnologia da UFRGS – CT.

Functional diagram vario MACRO in CHNS version

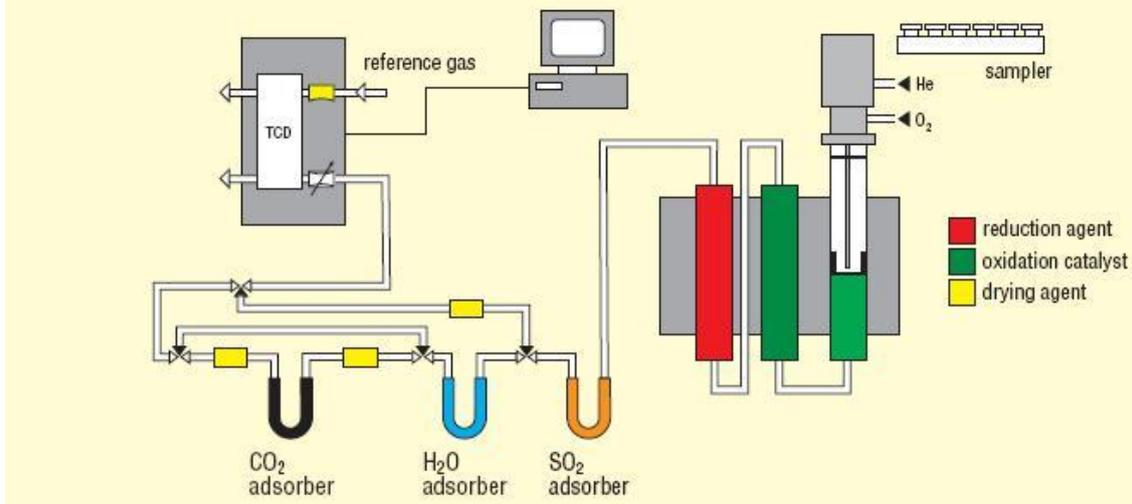


Figura 11 - Diagrama funcional do equipamento de análise elementar.
Fonte: Vario MACRO, 2004 Modificado

3.3.4 Poder Calorífico

O poder calorífico indica a quantidade de calor liberado por uma determinada massa de carvão durante sua queima e é de fundamental importância na fixação de preços de determinados carvões para aplicações em combustão. Os valores de poder calorífico de uma determinada amostra de carvão dependem principalmente da composição macerática e da composição mineralógica (SUAREZ-RUIZ, 2009).

O poder calorífico, expresso em cal/g, em uma base seca e livre de cinzas (d.a.f), é usado como parâmetro do *rank* para *ranks* menores que médio volátil betuminoso (SUAREZ-RUIZ, 2009).

Segundo ASTM D 2015 (1991), tem-se a determinação do calor produzido pela combustão de uma quantidade unitária de uma substância sob condições específicas. O método baseia-se na combustão de uma amostra sob atmosfera de oxigênio em um aparelho chamado Bomba Calorimétrica onde um cilindro é colocado em uma quantidade de água conhecida e com uma temperatura pré-definida, posteriormente é monitorado o acréscimo da temperatura dessa água pela parede da bomba calorimétrica, tendo-se o valor de acréscimo da temperatura causada pela combustão. O valor real é então comparado com uma amostra de referência (ácido benzóico) e expresso em cal/g. Para otimizar o processo de combustão, o cilindro (figura 12) é preenchido com oxigênio puro (99,95%) em uma pressão de 30 bar.

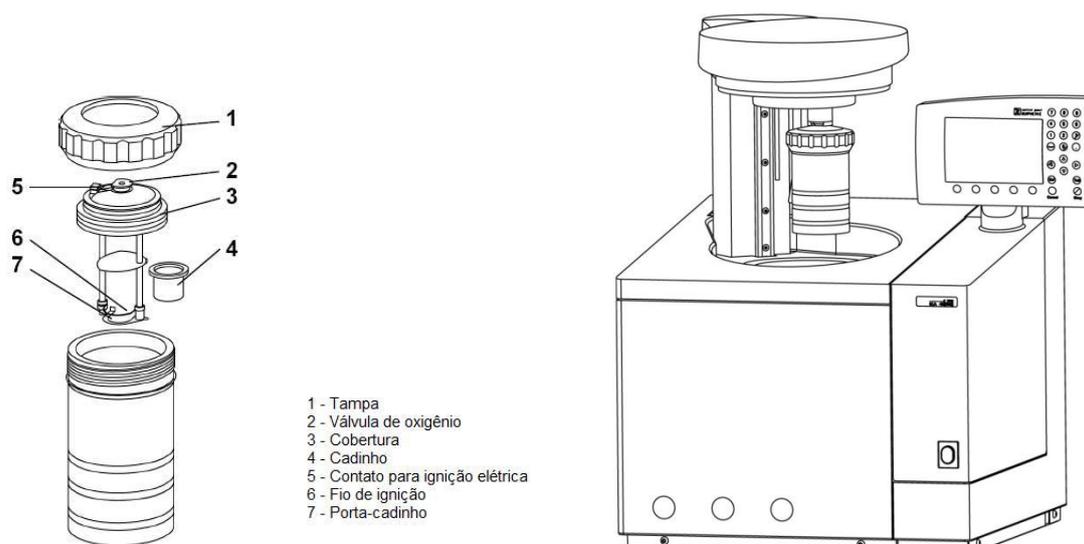


Figura 12 - Partes do cilindro e bomba calorimétrica com o cilindro acoplado.
Fonte: IKA – WERKE, 2007 Modificado

O valor do poder calorífico de uma determinada amostra é dado então pelo cálculo do acréscimo da temperatura da água no interior da bomba depois que a ignição da combustão da amostra ocorre dentro do cilindro. Pela seguinte equação:

$$C = \frac{H_{ob}.m}{\Delta T}$$

Onde: C = Poder Calorífico da amostra.

H_{ob} = Poder calorífico do ácido benzóico.

m = massa da amostra.

ΔT = Aumento da temperatura durante a combustão da amostra.

Para este trabalho foram realizadas análises de poder calorífico em todas as camadas (amostras) que continham espessura maior que 20cm, totalizando 34 análises. Os resultados expressos em cal/g e recalculados em uma base seca e livre de cinzas (d.a.f). O equipamento utilizado foi uma Bomba Calorimétrica da marca *IKA* modelo *C2000 Basic* do Laboratório de Análises de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo.

3.3.5 Difração de Raios X (DRX)

A identidade dos minerais cristalinos no carvão pode ser estimada pela técnica da difração de raios x (SUAREZ-RUIZ, 2009).

O conteúdo mineral do carvão é a fração inorgânica não combustível, ela é constituída de minerais detríticos ou autigênicos introduzidos no carvão na primeira ou segunda fase de carbonificação (DNPM, 1987).

Os minerais detríticos são aqueles transportados ao pântano ou brejo pelo ar ou pela água. Uma grande quantidade de minerais pode ser encontrada no carvão; são principalmente dominados pelo quartzo, carbonato, ferro e minerais de argila, com uma suite variada de minerais acessórios que pode ser relacionada às rochas da área fonte.

Minerais autigênicos são aqueles que são introduzidos na turfeira durante ou após a deposição do carvão ou durante a carbonificação. Os produtos comuns da mineralização são os minerais de cálcio e ferro tais como calcita, ankerita, siderita e pirita e como sílica na forma de quartzo.

O método consiste em direcionar um feixe de radiação monocromática em um material cristalino e observar a reflexão e difração dos raios-x em vários ângulos com relação ao feixe primário (figura 13). A relação entre o comprimento de onda do sinal de raios x, λ , o ângulo de difração, 2θ , e a distância entre cada conjunto de planos atômicos do reticulado cristalino, d , é obtida pela equação de Bragg, $n\lambda = 2d \sin\theta$, onde n representa a ordem de difração. A partir desta equação podem-se calcular as distâncias interplanares do material cristalino em estudo. Os espaçamentos interplanares dependem somente da dimensão das células unitárias dos cristais enquanto que as intensidades dos raios difratados são função da localização dos átomos na célula unitária. Desta forma, um composto pode ser identificado comparando os espaçamentos interplanares e as intensidades dos picos da amostra com os padrões de DRX (banco de dados). Embora métodos de difração sejam usados para análise quantitativa, é mais usual a sua utilização na identificação qualitativa das fases cristalinas (SIBILIA, 1988). O Método de difração de raios x utilizado nesse trabalho foi o Método do Pó, onde o material a ser analisado encontra-se pulverizado e será exposto dessa forma aos raios x. O grande número de partículas com diferentes orientações assegura que todos os minerais ou estruturas cristalinas sejam analisados. Nesse trabalho foram submetidas à difração de raios x 52 amostras de carvão. O equipamento utilizado foi um Difrátômetro SIEMENS 5000 do Instituto de Geociências da UFRGS.

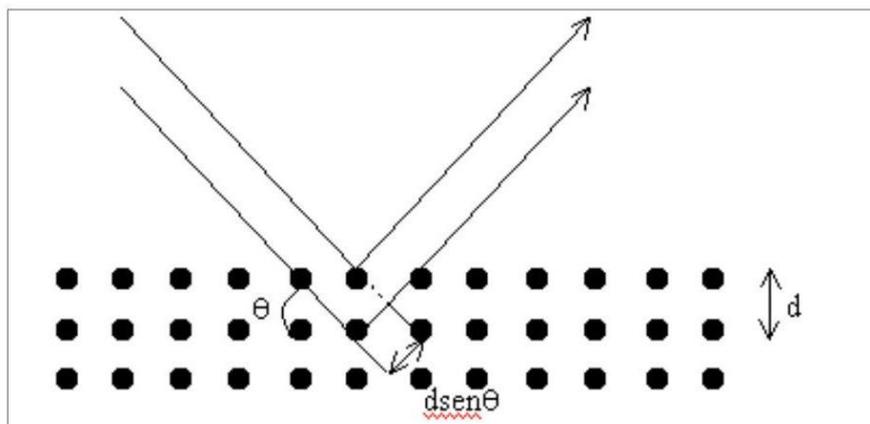


Figura 13 - Incidência de um feixe de raios-x sobre um mineral.
Fonte: Skoog, 2002 Modificado

3.4 Reatividade em Termobalança

3.4.1 Preparação das Amostras

As amostras foram reduzidas em triturador a uma granulometria inferior a 4,76mm, quarteadas e separadas em potes plásticos contendo a quantidade necessária de amostra para a análise (aproximadamente 100g), após isso, foram reduzidas em gral de ágata até uma granulometria inferior a 0,077mm (200 mesh) e quarteadas até obter-se aproximadamente 1g de amostra.

3.4.2 Termogravimetria – TGA

O conhecimento da temperatura de ignição (início da combustão) e carbonização (final da combustão) dos combustíveis sólidos é de grande importância para aplicações tecnológicas (REDIVO, 2002).

A termogravimetria (TGA) é uma técnica em que as mudanças na massa da amostra são monitoradas contra o tempo e temperatura, enquanto a temperatura do reator, numa atmosfera específica, é programada. Tem sido largamente usada para estudar a combustão de carvão (SCHÜTTE *et. al.*, 1989 e OTTAWAY, 1982). O equipamento utilizado é chamado de termobalança, ou menos frequentemente, de analisador termogravimétrico (HAINES, 1994).

A termobalança é constituída de um reator diferencial de leito fixo que opera à pressão atmosférica e permite o acompanhamento de reações gás-sólido através da

variação de massa da amostra em função do tempo, para isto, é acoplado a uma balança analítica com sensibilidade de 0,1mg e precisão de $\pm 0,05$ mg. O reator é um forno resistivo que possui resistência de carvão de silício (SiC), com entrada e saída para gases na parte superior. Um segundo recurso do equipamento – DTA – permite o registro da diferença de temperatura da amostra e um sólido de referência (alumina). No interior do forno, o cadinho tipo prato, ou cadinhos (no caso do uso de DTA), são sustentados por um termopar de Platina – Platina Ródio 10% (Pt-PtRh) protegidos por um tubo de alumina. O termopar possui em seu envoltório anéis protetores de radiação e está conectado ao braço da balança analítica. Isto permite registrar, além da temperatura no interior da câmara de reação, as variações de massa da amostra. A figura 14 ilustra as principais partes do equipamento.

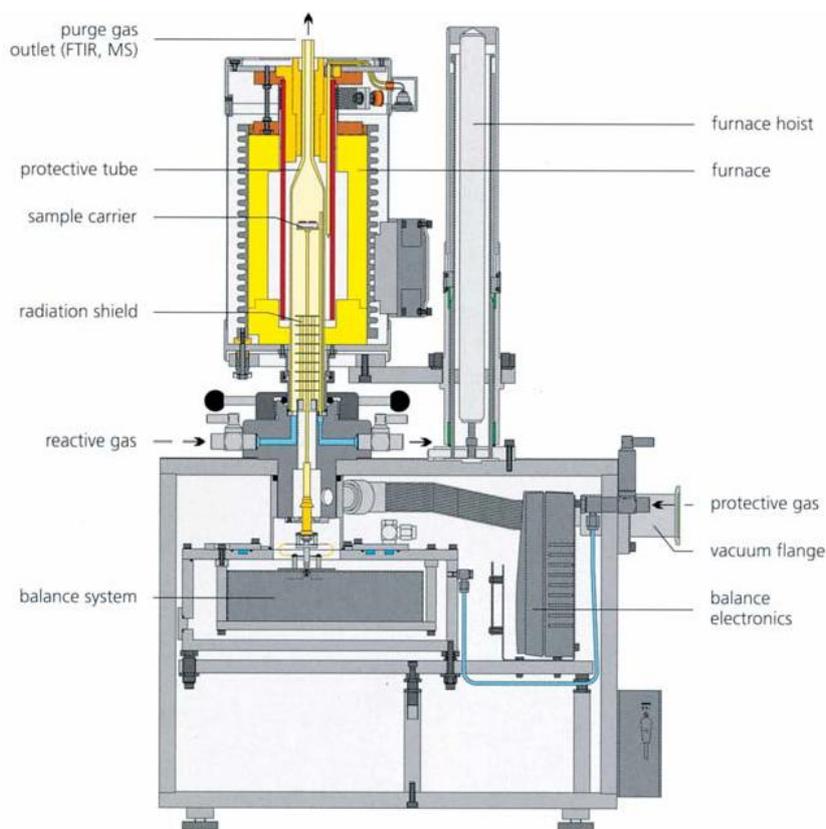


Figura 14 - Esquema mostrando os principais componentes da termobalança.

Fonte: NETZSCH, 2008 Modificado

A análise realizada foi a do tipo Perfil de Combustão, onde a amostra é aquecida de 30°C (temperatura ambiente) até 1000°C a uma taxa de aquecimento de 25°C/min em um teste não isotérmico. A rotina para a análise ocorre basicamente em três etapas: na primeira parte do teste (dinâmico) as amostras (30mg) são aquecidas até 110°C por três minutos. Após estes três minutos de aquecimento a amostra é submetida à segunda parte do teste (isotermal), onde se mantém a temperatura de

110°C constante por cinco minutos com o intuito de subtrair toda a umidade da amostra. Após isto, inicia-se novamente o teste dinâmico, onde a amostra é aquecida até uma temperatura de 1000°C por 35 minutos, onde se avalia o início de perda de massa, que está relacionado ao início da combustão da amostra, e a velocidade de reação da amostra até a mesma atingir novamente a estabilização da perda de massa. Todo o teste ocorre em uma atmosfera de ar seco (78% de Nitrogênio, 21% de Oxigênio e 1% de Argônio e outros gases) e foi realizado dois testes para cada amostra, para se ter uma confirmação dos resultados.

O aparelho então nos gera um gráfico (figura 15), que após ser tratado, nos dá: 1) a temperatura inicial de reação: onde a amostra começa a perder massa por causa da queima do carbono, denominada de On Set ou T_i . 2) a temperatura de reatividade máxima: o momento t onde existe mais amostra reagindo com o ambiente (queimando), denominada de T_p . 3) a temperatura final de reação: o momento onde não existe mais carbono para reagir com o ambiente e então ocorre a estabilização da perda de massa, sobrando somente as cinzas, denominada de T_f . Estes 3 pontos no gráfico definem o perfil típico de combustão de uma determinada amostra de carvão.

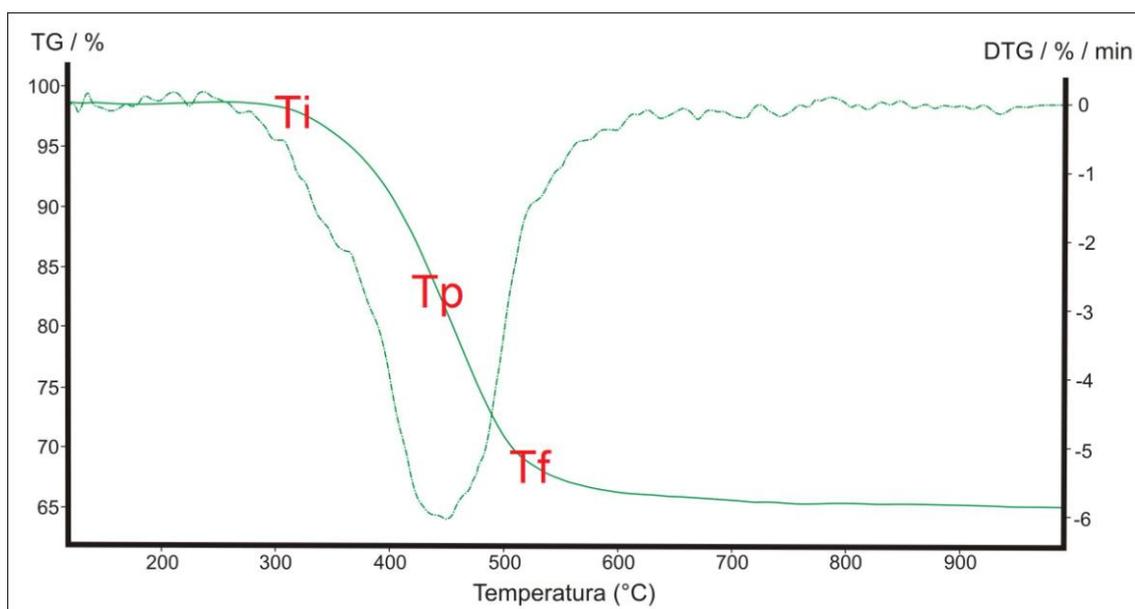


Figura 15 - Exemplo do gráfico gerado através da análise termogravimétrica da amostra 09-187, camada I2 do furo F-371 com as temperaturas inicial, máxima e final de reação expressas pelos símbolos T_i , T_p e T_f respectivamente.

Fonte: Dados da Pesquisa

A reatividade da amostra então é avaliada de acordo com a equação:

$$R = -1/m_0(dm/dt)$$

Onde m_0 a massa de cinzas, R é a reatividade máxima e dm/dt a taxa de perda de carbono fixo. Os resultados são expressos em uma base seca e livre de cinzas, para comparar somente a reatividade do carbono fixo das amostras.

Para este projeto, foi realizada a análise de 3 amostras em termobalança da marca *NETZCH* modelo *STA 409* localizada no Laboratório de Siderurgia – LASID do Centro de Tecnologia da UFRGS – CT.

CAPÍTULO 4

Resultados obtidos

4.1. Identificação das camadas

Foram identificadas nos quatro furos referentes a este trabalho um total de 52 camadas de carvão incluindo camadas superiores, inferiores, Banco Louco e leitões, como mostra a figura 16. Cada camada identificada recebeu uma numeração do laboratório de carvão independente. A tabela 8, do anexo A mostra a identificação completa de todas as camadas encontradas neste estudo, bem como o topo, base, espessura e a numeração independente que cada camada recebeu para análises laboratoriais.

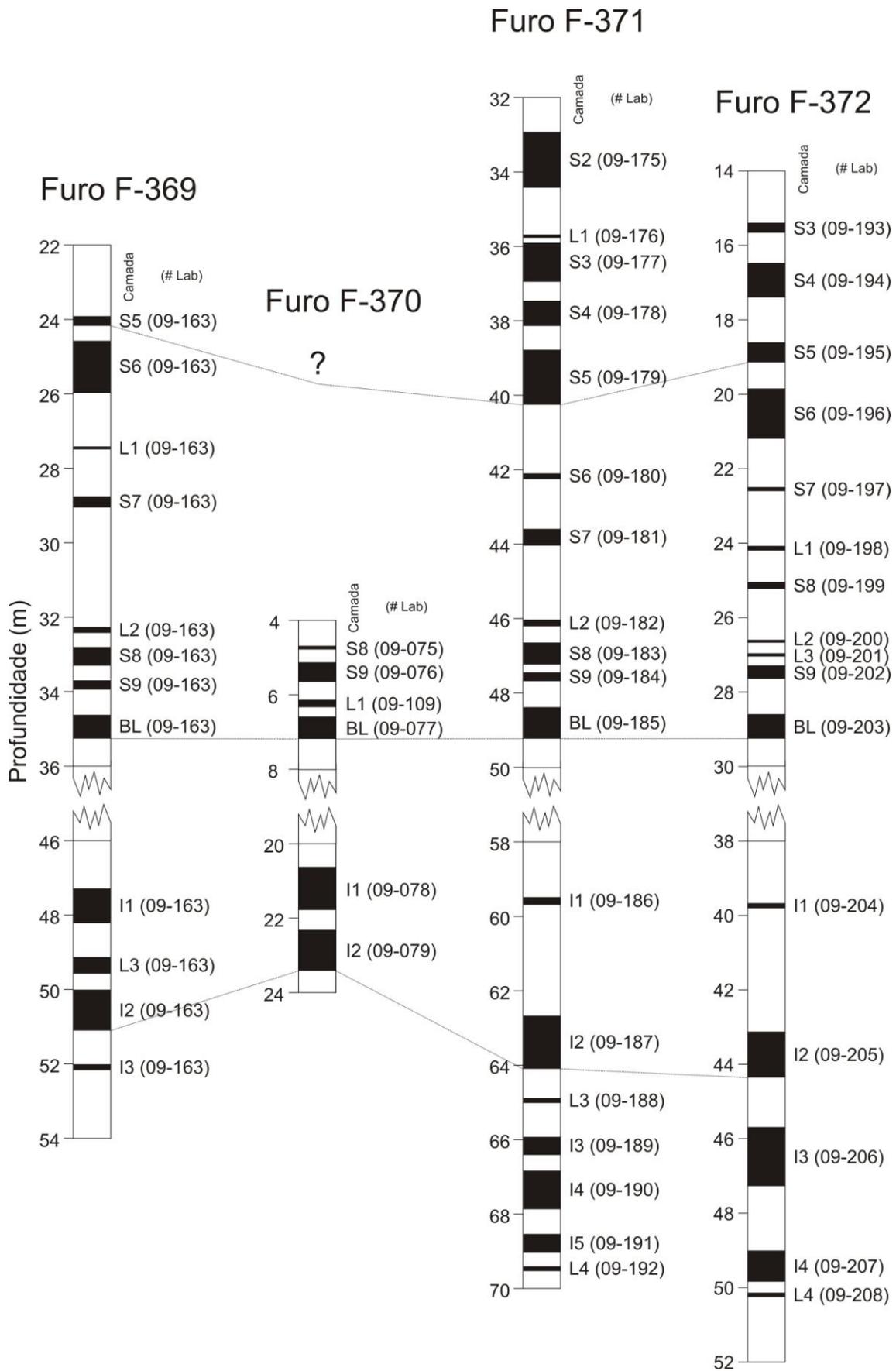


Figura 16 - Identificação das camadas de carvão dos furos F-369, F-370, F-371 e F-372.

Fonte: Dados da Pesquisa

A nomeação de cada camada seguiu o critério de se localizar a camada Banco Louco (BL), pois esta já é conhecida por ter uma continuidade lateral abrangente, e a partir dela, nomear as camadas superiores e inferiores. Foi feita a medição da espessura de cada camada e também foram separadas as camadas com espessura inferior a 20cm, pois estas geralmente não são consideradas úteis em minas que operam a céu aberto.

Para o furo F-369 identificou-se cinco camadas superiores, a camada Banco Louco, três camadas inferiores e três leitos, em um intervalo estratigráfico que iniciou na cota 23,92m com a camada S5 e terminou em 52,16m com a camada I3, contabilizando um total de 12 camadas de carvão, com espessuras variando de 8cm na camada L1 até 1,4m na camada S6. Com uma espessura cumulativa de 6,14m e espessura total útil (desconsiderando as camadas com espessura inferior a 20cm) de 5,18m.

Para o furo F-370 identificou-se duas camadas superiores, a camada Banco Louco, duas camadas inferiores e uma leito, em um intervalo estratigráfico que iniciou na cota 4,77m com a camada S8 e terminou em 23,46m com a camada I2, contabilizando um total de 6 camadas de carvão, com espessuras variando de 10cm na camada S8 até 1,16m na camada I1. Com uma espessura cumulativa de 3,69m e espessura total útil de 3,39m.

Para o furo F-371 identificou-se oito camadas superiores, a camada Banco Louco, cinco camadas inferiores e quatro leitos, em um intervalo estratigráfico que iniciou na cota 32,97m com a camada S2 e terminou em 69,54m com a camada L4, contabilizando um total de 18 camadas de carvão, com espessuras variando de 9cm na camada L1 até 1,48m na camada S5. Com uma espessura cumulativa de 11,21m e espessura total útil de 10,07m.

Para o furo F-372 identificou-se sete camadas superiores, a camada Banco Louco, quatro camadas inferiores e quatro leitos, em um intervalo estratigráfico que iniciou na cota 15,41m com a camada S3 e terminou em 49,92m com a camada L4, contabilizando um total de 16 camadas de carvão, com espessuras variando de 8cm na camada L2 até 1,59m na camada I3. Com uma espessura cumulativa de 8,64m e espessura total útil de 7,78m.

Em nenhum dos quatro furos estudados neste trabalho foi encontrada a sequência completa de camadas iniciando em S1, S2, S3... até ...I3, I4, I5. Pelos principais motivos de que em alguns locais as camadas superiores já foram erodidas ou pelo motivo da não formação de uma turfeira com continuidade lateral na época da deposição.

A sequência mais completa foi identificada no furo F-371.

A tabela 1 nos mostra uma relação entre as camadas de todos os furos e as suas espessuras máxima, mínima e média.

Tabela 1 - Valores mínimos, máximos e médios das espessuras de carvão encontradas nas diferentes camadas dos quatro furos estudados neste trabalho. Fonte: Dados da Pesquisa

Camada	Espessura Mínima (m)	Espessura Máxima (m)	Espessura Média (m)
S2	1,50	1,50	1,50
S3	0,27	1,05	0,66
S4	0,68	0,93	0,80
S5	0,26	1,48	0,76
S6	0,16	1,40	0,97
S7	0,11	0,45	0,28
S8	0,10	0,59	0,34
S9	0,24	0,53	0,34
BL	0,60	0,85	0,69
I1	0,14	1,16	0,61
I2	1,01	1,43	1,20
I3	0,16	1,59	0,75
I4	0,84	1,04	0,94
I5	0,51	0,51	0,51

É importante a observação da ocorrência da camada I2, que manteve uma boa distribuição horizontal ao longo dos quatro furos (figura 17) com pouca variação na sua espessura, o que a pode tornar potencialmente econômica.

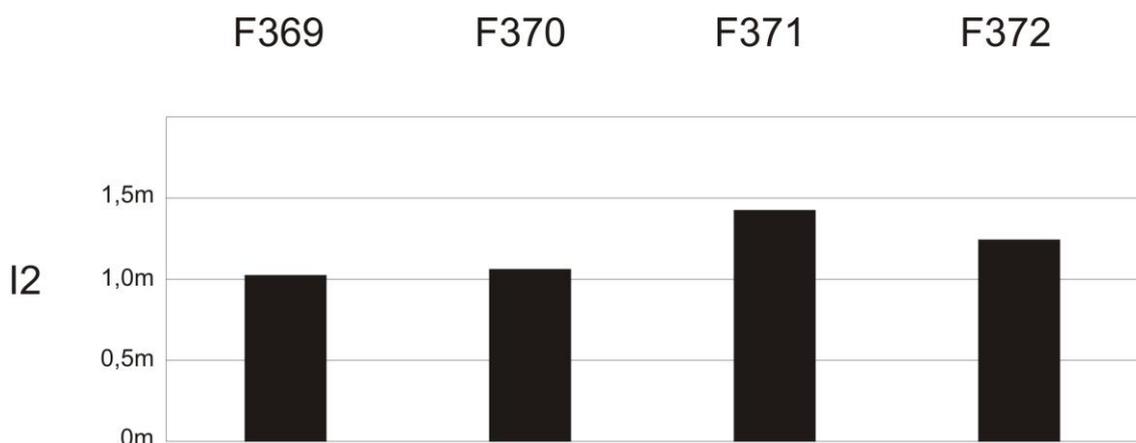


Figura 17 - Distribuição da camada I2 mostrando a sua espessura em metros nos quatro furos. Fonte: Dados da Pesquisa

4.2. Análises petrológicas

4.2.1 Análise de macerais e matéria mineral

A composição petrográfica da matéria orgânica, recalculados em uma base livre de matéria mineral, das amostras dos quatro furos é mostrada nos diagramas ternários, figura 18.

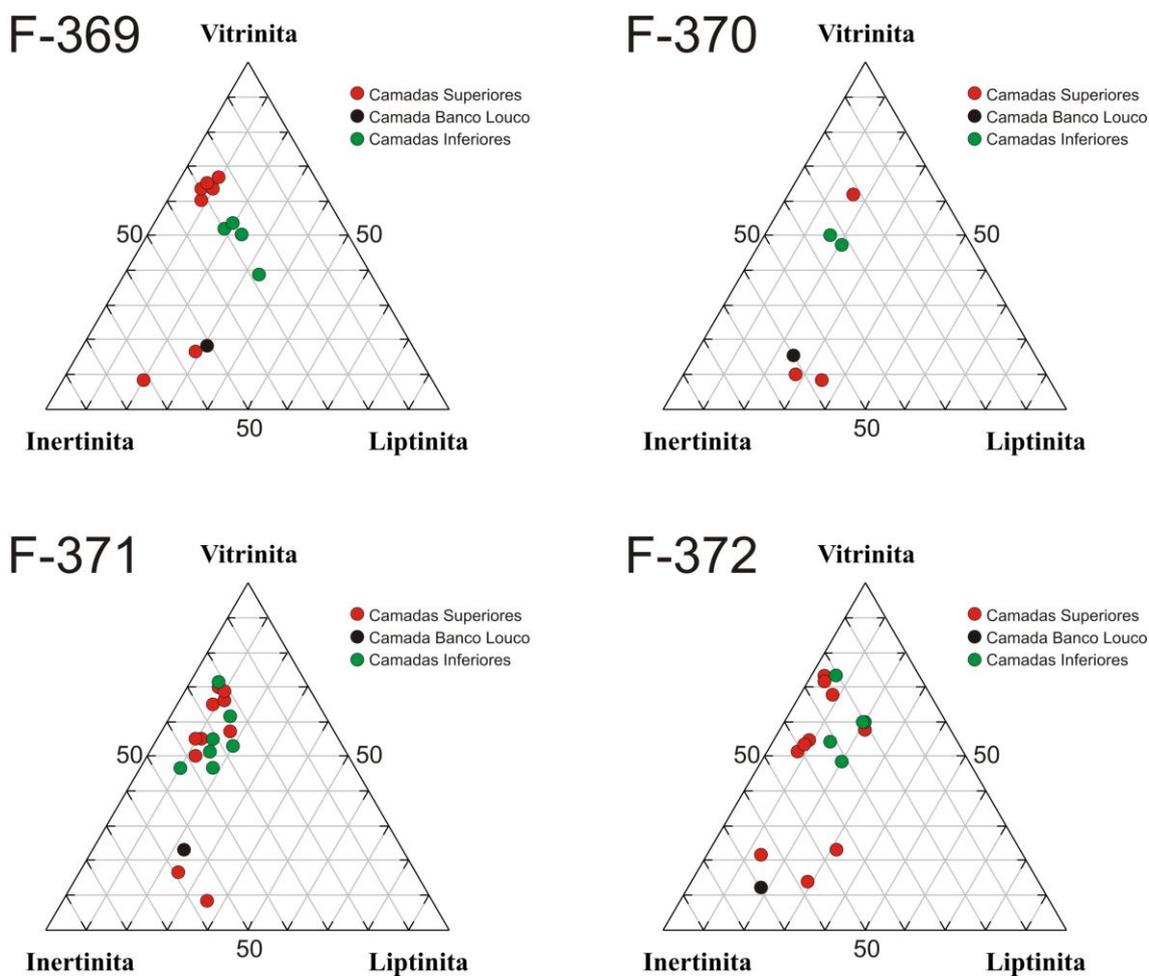


Figura 18 - Diagrama ternário mostrando a composição petrográfica dos grupos de macerais das amostras de carvão.

Fonte: Dados da Pesquisa

No Furo F-369 os macerais do grupo das vitrinitas ocorrem em geral com uma maior abundância, com os teores variando entre (4,6-43,6%), e secundariamente inertinita (12,2-36,4%), com valores mais baixos de liptinita (3,2-23,0%), figura 19.

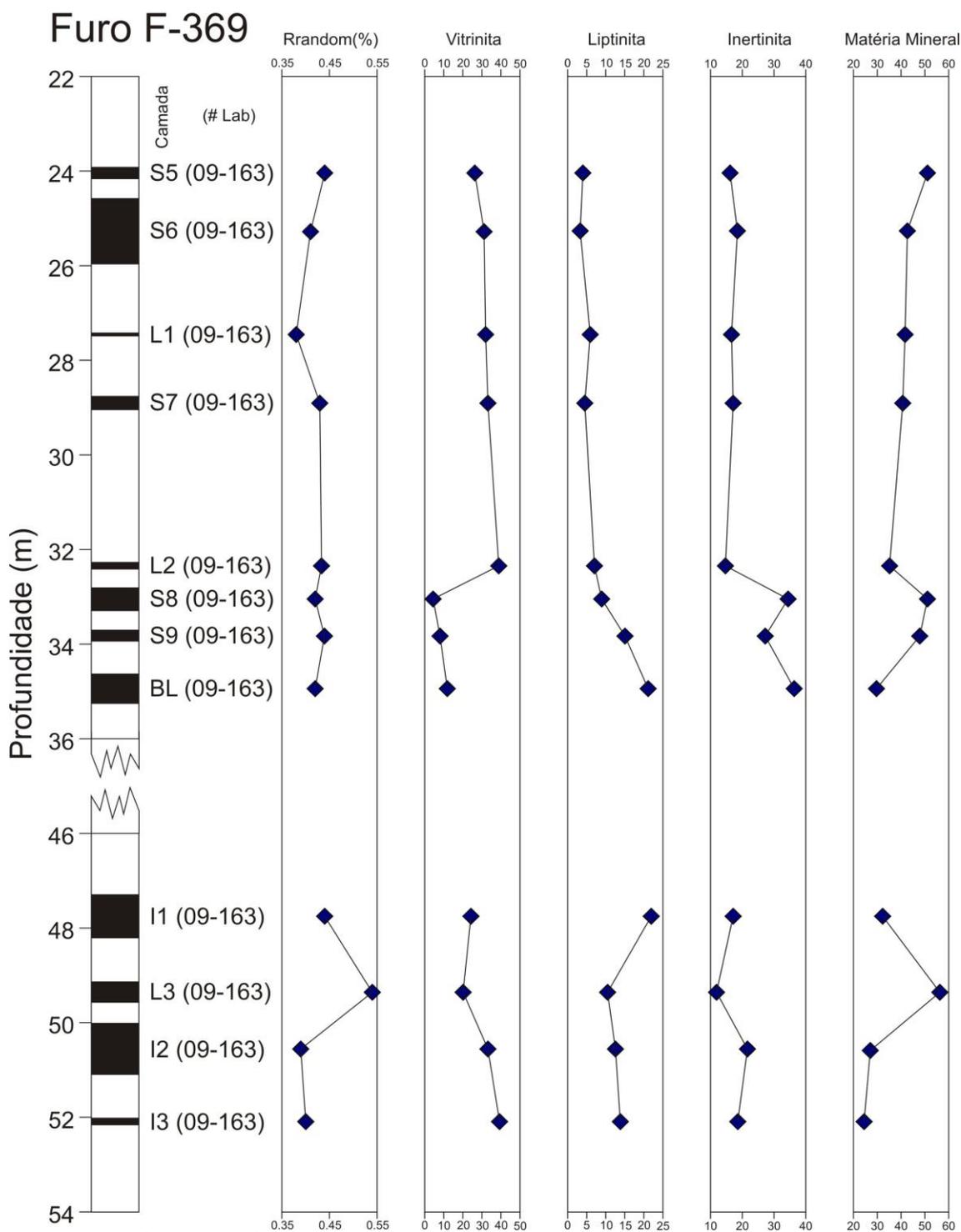


Figura 19 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos de macerais, da matéria mineral e a reflectância da vitrinita (Rrandom%) no furo F-369.

Fonte: Dados da Pesquisa

No Furo F-370 os macerais do grupo das inertinitas ocorrem em geral com uma maior abundância, com os teores variando entre (11,2-40,2%), e secundariamente vitrinita (5,6-31,2%), com valores mais baixos de liptinita (8,0-22,8%), figura 20.

Furo F-370

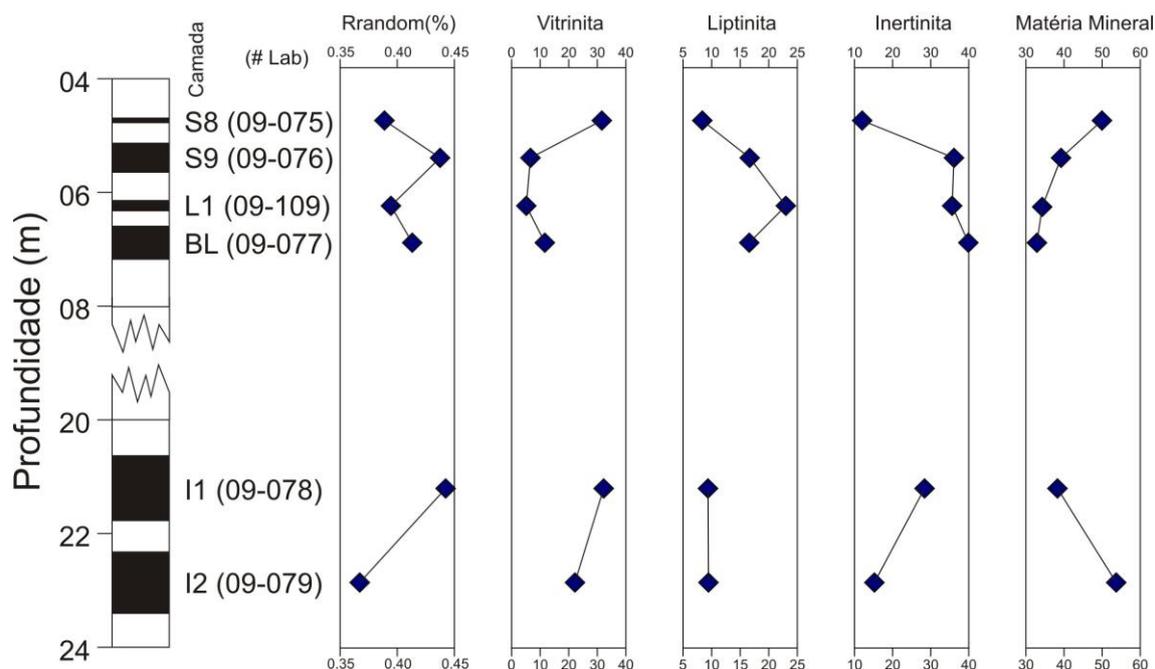


Figura 20 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos de macerais, da matéria mineral e a reflectância da vitrinita (Rrandom%) no furo F-370.

Fonte: Dados da Pesquisa

No Furo F-371 os macerais do grupo das vitrinitas ocorrem em geral com uma maior abundância, com os teores variando entre (4,2-48,4%), e secundariamente inertinita (13,4-37,0%), com valores mais baixos de liptinita (3,2-17,0%), figura 21.

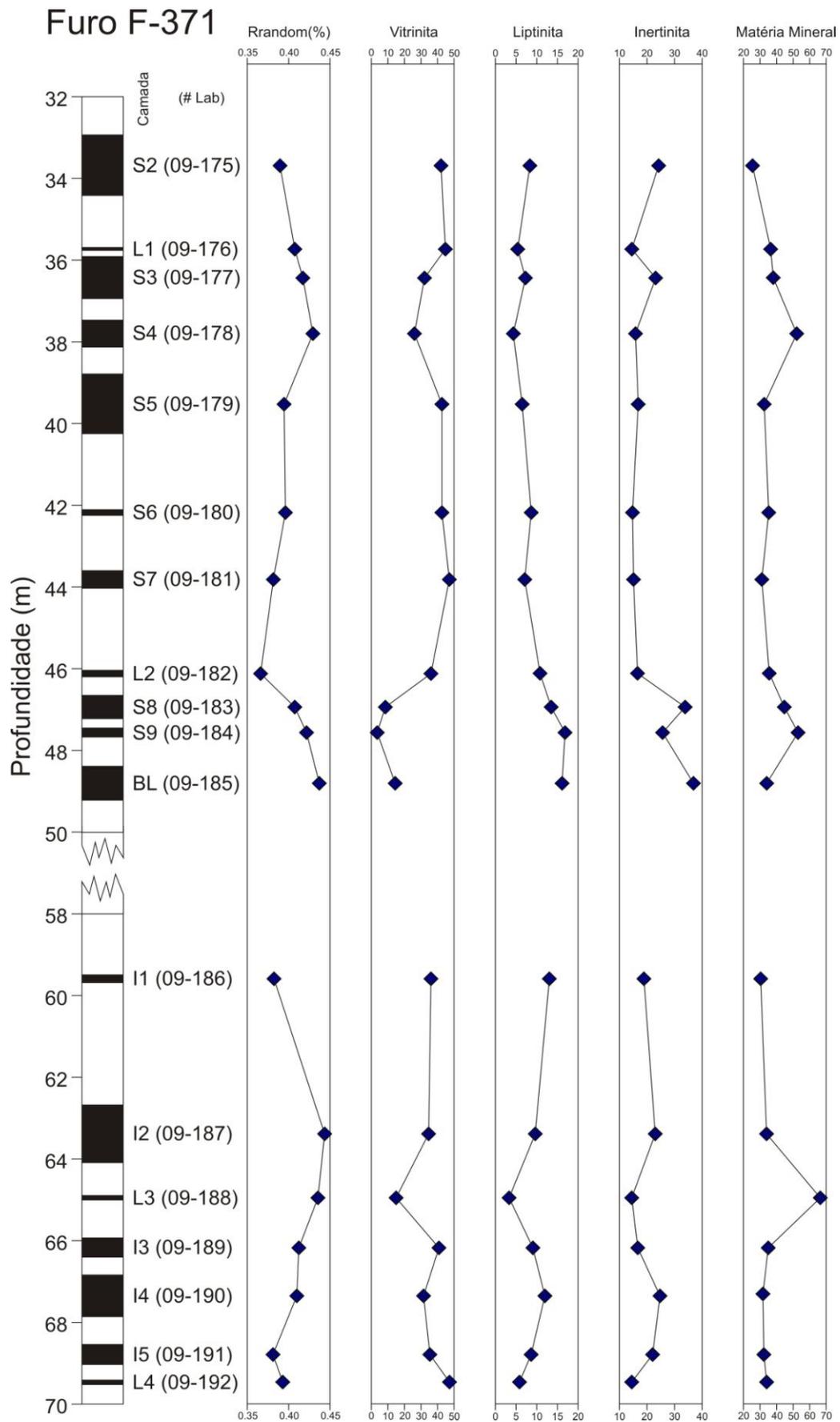


Figura 21 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos de macerais, da matéria mineral e a reflectância da vitrinite (Rrandom%) no furo F-371.

Fonte: Dados da Pesquisa

No Furo F-372 os macerais do grupo das vitrinitas ocorrem em geral com uma maior abundância, com os teores variando entre (7,8-56,6%), e secundariamente inertinita (13,8-50,0%), com valores mais baixos de liptinita (2,0-18,8%), figura 22.

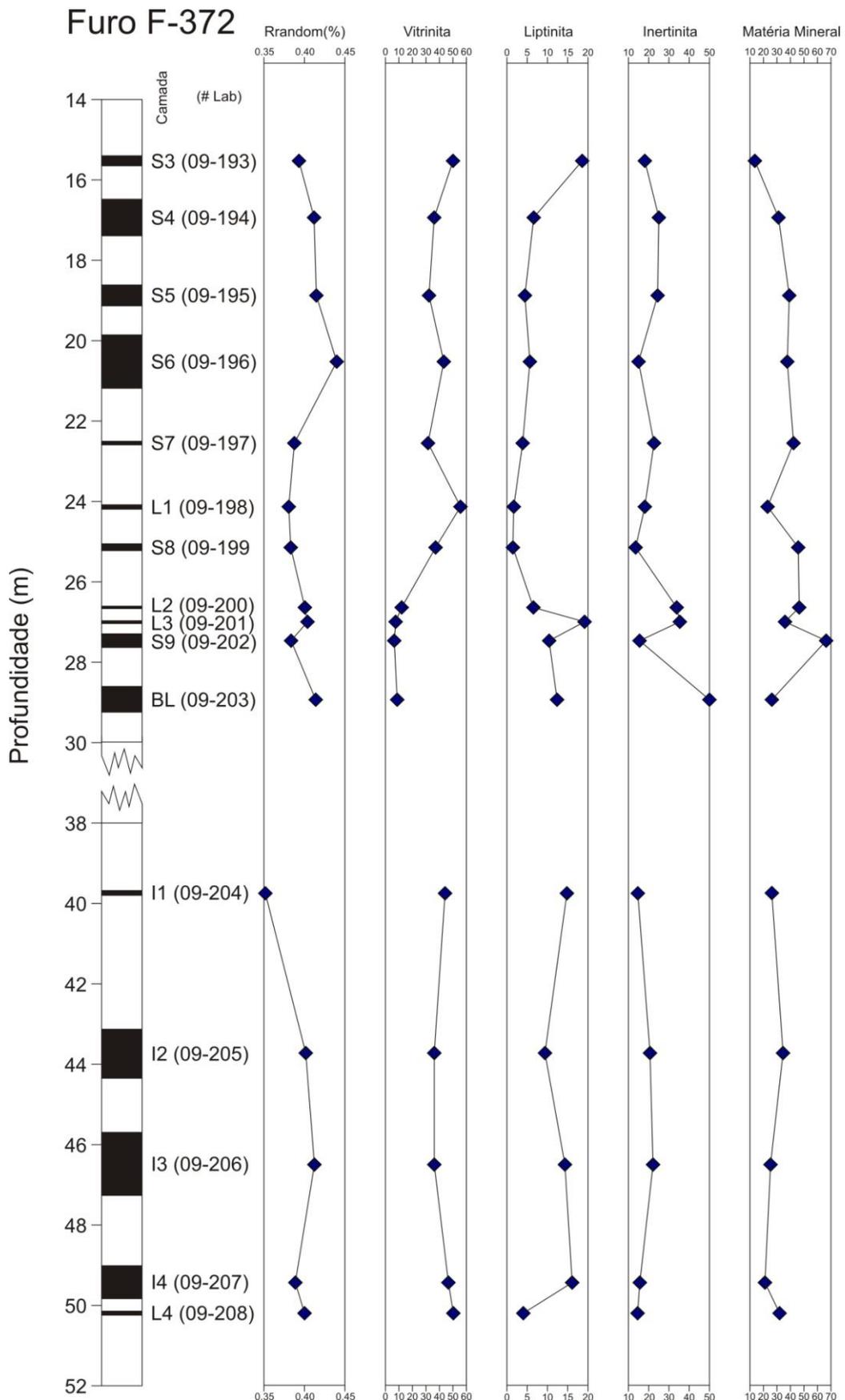


Figura 22 - Coluna litológica mostrando a distribuição das camadas, o percentual dos grupos de macerais, da matéria mineral e a refletância da vitrinita (Rrandom%) no furo F-372.

Fonte: Dados da Pesquisa

A matéria mineral predominante nos quatro furos é argila, seguida de pirita. Quartzo e carbonato possuem quantidades pouco expressivas. A maioria das argilas ocorre não associada com a matéria orgânica, e sim como bandas de matéria inorgânica que na preparação das amostras não tiveram como ser separadas da matéria orgânica. As variações individuais dos macerais e a distribuição dos minerais (argilas, carbonatos, pirita e quartzo) dos quatro furos são observadas nas tabelas 9, 10, 11 e 12, anexo A.

A tabela 2 mostra os percentuais médios dos grupos macerais encontrados nas amostras das camadas de carvão dos quatro furos estudados, e apresenta uma média ponderada pela espessura que foi considerada útil para ser a camada ser economicamente viável a exploração (>20cm).

Tabela 2 - Percentual de médio dos grupos macerais de cada furo e seus percentuais ponderados pela espessura das camadas. Fonte: Dados da Pesquisa

			Vitrinita (%)	Liptinita (%)	Inertinita (%)
Furo F-369	Média		46,4	17,9	35,7
	Média ponderada pelas espessuras		42,5	20,3	37,2
Furo F-370	Média		32,3	23,2	44,2
	Média ponderada pelas espessuras		36,8	20,8	42,4
Furo F-371	Média		51,1	15,2	33,6
	Média ponderada pelas espessuras		48,8	15,0	36,2
Furo F-372	Média		49,9	14,5	35,6
	Média ponderadas pelas espessuras		51,4	15,2	33,5

A tabela 3 apresenta a média, por camada, dos percentuais dos três grupos macerais principais e também da matéria mineral, referente aos quatro furos estudados neste projeto.

Tabela 3 - Percentuais médios de Vitrinita, Liptinita, Inertinita e matéria mineral encontrados nas diferentes camadas dos quatro furos estudados neste trabalho. Fonte: Dados da Pesquisa

Camada	Vitrinita (%)	Liptinita (%)	Inertinita (%)	M.M. (%)
S2	42,2	8,6	24,0	25,2
S3	40,5	12,7	20,7	26,1
S4	32,0	5,5	20,6	42,1
S5	34,7	5,0	19,3	41,0
S6	39,9	5,6	15,5	38,9

S7	39,0	5,3	17,9	37,8
S8	20,7	8,2	23,3	47,8
S9	6,8	14,8	26,6	51,7
BL	11,9	16,7	40,9	30,7
I1	34,6	15,4	18,5	31,9
I2	32,5	10,4	19,9	37,2
I3	39,2	12,9	19,0	28,9
I4	39,4	14,1	20,3	26,2
I5	36,4	9,6	22,0	32,0

4.2.2 Reflectância da vitrinita (Rrandom%)

Os resultados revelam uma distribuição muito homogênea dos valores do Rrandom(%) nas amostras das camadas de carvão dos quatro furos estudados neste trabalho, mostrando valores que variaram sempre entre 0,35% e 0,45%. Para o furo F-369 foi encontrado um valor médio de 0,43%. Para os furos F-370, F-371 e F-372, foram encontrados valores médios de 0,40%. Os resultados detalhados dos valores da reflectância da vitrinita podem ser conferidos nas tabelas 9, 10, 11 e 12, anexo A.

4.3. Análises químicas

4.3.1 Análise imediata

A tabela 4 expõe a média dos resultados do teor de umidade, teor de cinzas, teor de matéria volátil e teor de carbono fixo de todas as camadas dos quatro furos.

Tabela 4 - Valores mínimos, máximos e médios das espessuras de carvão encontradas nas diferentes camadas dos quatro furos estudados neste trabalho. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	% Umidade	% Cinzas	% Matéria Volátil (d.a.f)	% Carbono Fixo
F-369	5,5	53,6	47,5	21,7
F-370	5,5	51,4	45,4	24,5
F-371	7,2	51,4	45,5	22,6
F-372	6,5	50,8	48,6	22,3

A tabela 13, Anexo A apresenta os valores detalhados da análise imediata de cada amostra dos quatro furos referentes a este estudo.

Os resultados dos teores de cinzas para as 52 amostras de carvão dos quatro furos está exposto na figura 23, e mostrou que 54% das camadas de carvão podem ser classificadas segundo a norma internacional da Comissão Econômica da Europa para as Nações Unidas como rocha carbonosa, enquanto que 46% das amostras pode ser classificada como carvão de categoria inferior e muito inferior.

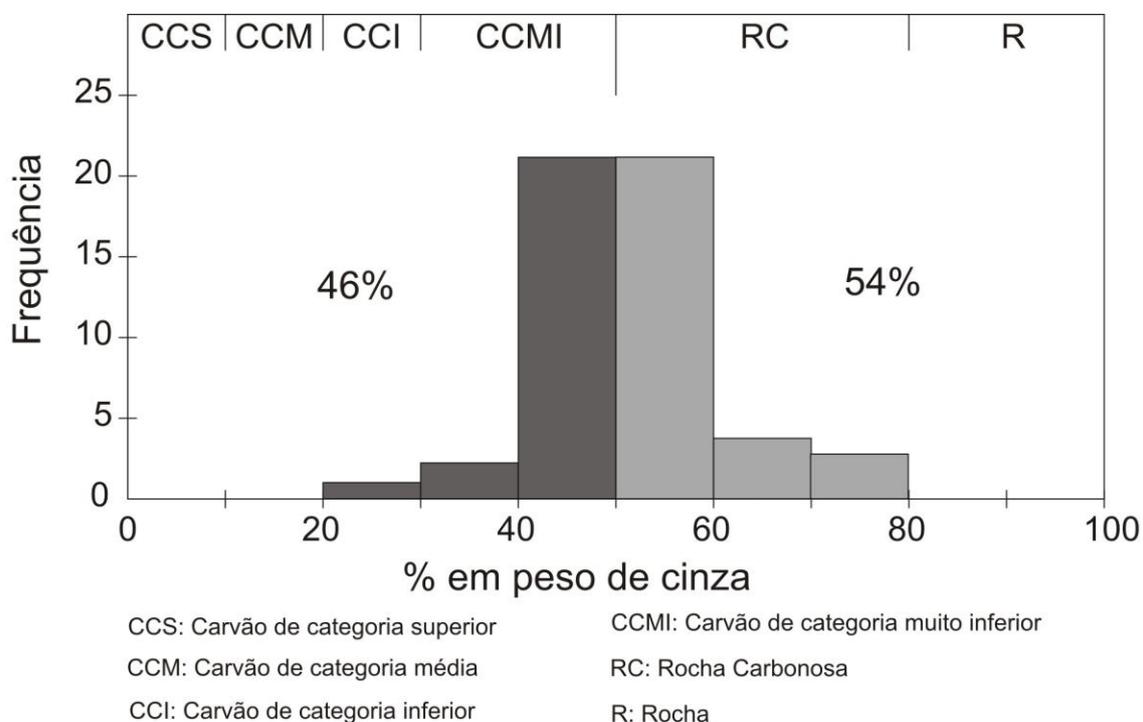


Figura 23 - Classificação segundo o percentual de cinzas.
 Fonte: International Classification of in-coal seams, 1998 Modificado

4.3.2 Análise elementar

O teores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre total e oxigênio podem ser verificados na tabela 5, onde estão separados os valores por furo. Os teores individuais de cada camada podem ser observados na tabela 14, anexo A.

Tabela 5 - Valores em peso (%) da análise elementar dos carvões dos quatro furos. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	C	H	N	S	O
F-369	27,5	3,4	0,6	1,1	13,7
F-370	24,9	2,5	0,5	1,9	18,7
F-371	26,9	3,5	0,6	2,0	15,5
F-372	31,2	3,8	0,6	1,6	14,6

No furo F-369, todos os teores individuais por camada mostraram resultados semelhantes ao dos teores médios do furo, com exceção da camada L3, que apresentou teores mais baixos de carbono (12,6%).

No furo F-370, a camada I2 apresentou um teor de carbono mais baixo que a média do furo (15,8%). Enquanto que as camadas S8 e BL apresentaram valores de enxofre relativamente mais altos (4,3% e 3,7% respectivamente).

No furo F-371, a camada L3 apresentou um teor de carbono mais baixo que a média do furo (13,4%). Enquanto que as camadas S2, L2, I1 e I5 apresentaram valores de enxofre relativamente mais altos (4,7%, 3,0%, 3,0% e 2,4%). Ressalta-se que a camada L4 apresentou um teor anômalo de enxofre, atingindo um valor de 9,8%.

No furo F-372, todos os teores individuais por camada mostraram resultados semelhantes ao dos teores médios do furo, com exceção das camadas S6 e I4, que apresentaram teores mais elevados de enxofre (2,8% e 2,6% respectivamente).

Fazendo-se uma correlação entre o teor de enxofre *versus* a profundidade das camadas (figura 24) notou-se que o teor de enxofre tende a diminuir conforme alcançamos camadas mais profundas de carvão.

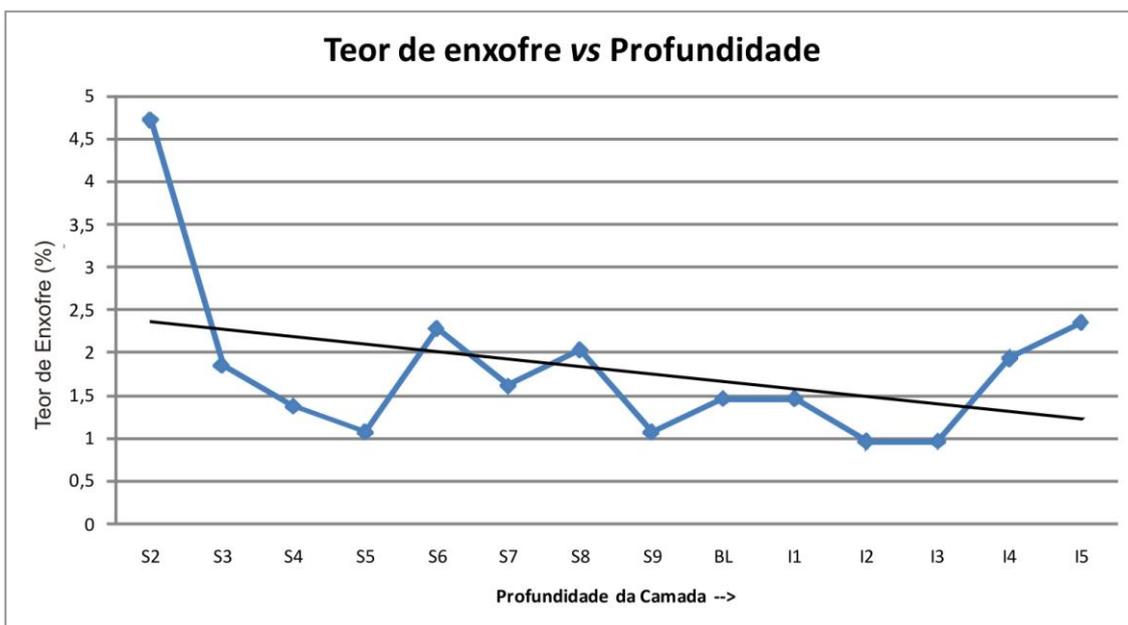


Figura 24 - Variação nos teores de enxofre conforme o aumento da profundidade das camadas de carvão, média de todas as camadas dos quatro furos estudados.

Fonte: Dados da Pesquisa

4.3.3 Poder Calorífico

Para este trabalho, apenas as camadas de carvão com espessura maior que 20 cm foram analisadas o seu poder calorífico, totalizando 34 análises. O poder calorífico, expresso em cal/g e em uma base seca e livre de cinzas, obteve resultados variando de 3550 a 6786 cal/g, com um valor médio de 6004 cal/g.

Em valores normais, sem desconsiderar o teor de umidade e cinzas, obteve-se resultados variando de 788 a 3277 cal/g, com um valor médio de 2470 cal/g.

Foram comparados os valores de poder calorífico em uma base seca e livre de cinzas, com os teores de vitrinita, liptinita, inertinita e teor de cinza nas amostras de carvão, como mostra a figura 25.

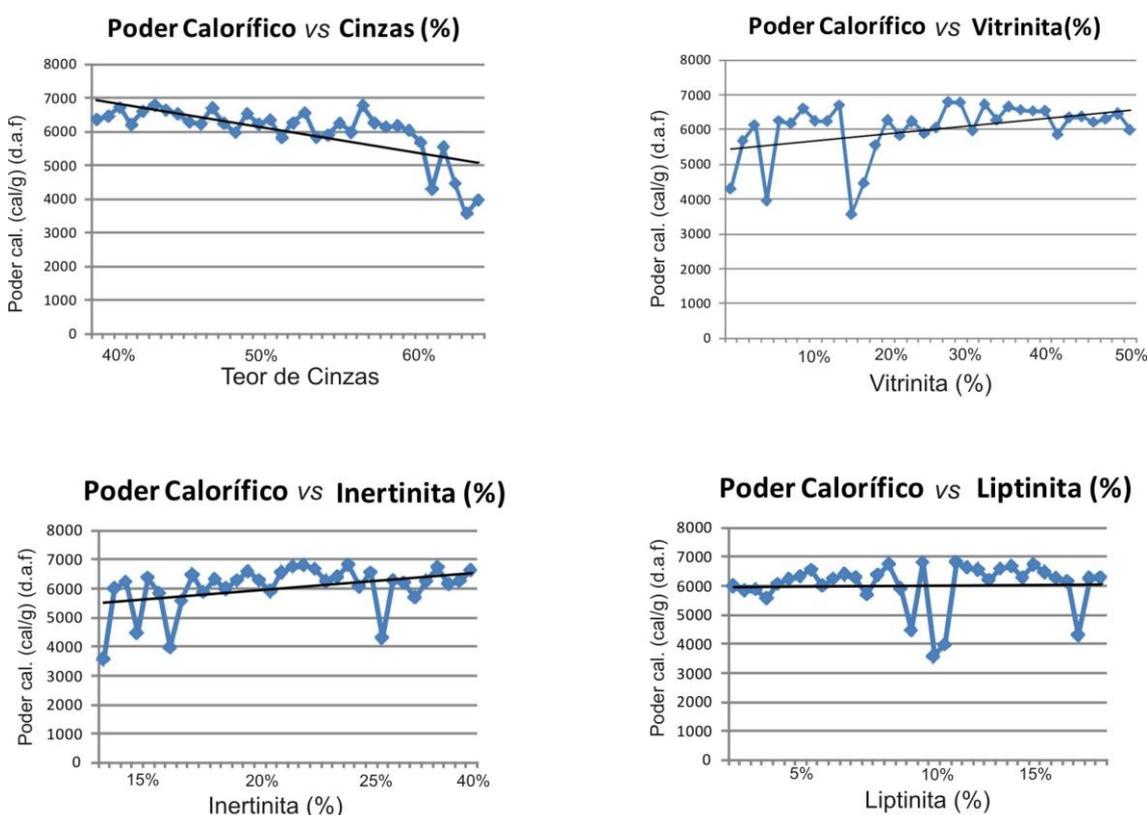


Figura 25 - Comparação entre os valores de poder calorífico (d.a.f) e os percentuais de cinzas, vitrinita, inertinita e liptinita nas amostras de carvão.

Fonte: Dados da Pesquisa

Os resultados mostraram que existe uma relação muito clara entre o teor de cinzas e o poder calorífico, que tende a baixar conforme o teor de cinzas aumenta. Os resultados da comparação do poder calorífico vs vitrinita e inertinita mostraram uma fraca tendência de aumento do poder calorífico conforme o teor destes macerais se eleva. Não observou-se relação de aumento ou decréscimo no poder calorífico de amostras com aumento ou diminuição nos teores de liptinita.

A tabela 15, do anexo A mostra os valores detalhados do poder calorífico para todas as amostras de carvão analisadas neste trabalho.

4.3.4 Difração de raios x

Quanto às amostras de carvão estudadas, a mineralogia determinada pela difração de raios x é constituída, em ordem de abundância por quartzo (SiO_2) em 100% das amostras; caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) em 100% das amostras; illita ($\text{K}_{1.5}\text{Al}_4(\text{Si}_{6.5}\text{Al}_{1.5})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$) em 63% das amostras; feldspato alcalino (KAlSi_3O_8) em 63% das amostras; plagioclásio ($(\text{Na,Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8$) em 42% das amostras; pirita (FeS_2) em 21% das amostras; gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em 17% das amostras; siderita (FeCO_3) em 10% das amostras; esmectita ($\text{Na}_{0.33}(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) em 6% das amostras, calcita (CaCO_3) em 4% das amostras; e anidrita, em 2% das amostras.

Os resultados individuais da difração de raios x, por amostra, podem ser conferidos na tabela 16, do anexo A

4.4 Reatividade em termobalança

Três amostras das camadas I2 dos furos F-369, F-371 e F-372 foram analisadas por este método, os resultados estão expressos na tabela 6:

Tabela 6 - Temperaturas de início (Ti), de reatividade máxima (Tp) e final (Tf) da combustão das amostras de carvão analisadas neste trabalho. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	Amostra	Camada	Temp. de início da combustão (°C)	Temp. de reatividade máxima (°C)	Temp. final da combustão (°C)	Taxa máxima de reação (min^{-1})
F-369	09-173	I2	326	453	571	0,174
F-371	09-187	I2	331	443	601	0,199
F-372	09-205	I2	330	452	598	0,190

Os resultados mostram que o carvão da camada I2 do furo F-371 tem a maior taxa de reação. Ele reage com o ar mais rapidamente que os outros. O mesmo carvão, tem a maior temperatura de início da combustão em relação as outras amostras.

CAPÍTULO 5

Discussões

5.1 O papel dos parâmetros químicos, petrológicos e de reatividade na combustão do carvão.

5.1.1 O papel da petrologia orgânica.

Segundo Bengtsson *et al.* (1986), o processo de combustão de carvão ocorre em quatro fases: 1ª – Ignição do gás; 2ª – Combustão do gás; 3ª – Ignição do *char*; 4ª – Combustão do *char*.

O mesmo autor, descreveu quatro parâmetros que influenciam as fases de combustão do carvão, entre eles estão a reflectância da vitrinite e a composição petrográfica, caracterizados neste trabalho.

A ordem de combustibilidade (temperatura de combustão) é geralmente considerada deste modo: inertinita > vitrinita > liptinita.

A inertinita, como parte de um grupo maceral que é mal reagente à combustão, tem atraído atenção especial. Yavorskii *et al.* (1968) determinaram que a presença de inertinita em carvões utilizados em termelétricas era uma importante contribuidora para o lançamento de carbono pelas cinzas leves da usina.

Nandi *et al* (1977) demonstraram que a eficiência da combustão era inversa a proporção de macerais do grupo da inertinita em carvões betuminosos e subbetuminosos no oeste do Canada. As cinzas leves dos carvões com alta inertinita continham altos percentuais de carbono não queimado comparados com as cinzas de carvões com baixa inertinita.

O *rank* desempenha um papel significativo na combustão do carvão: Carvões com baixo *rank* e logo, com mais alto teor de voláteis, são mais inflamáveis que carvões com alto *rank* e logo, com menores teores de voláteis. A queima de carvões do tipo baixo volátil requer atenção especial aos parâmetros de engenharia para alcançar e sustentar a combustão (HOUGH & SANYAL, 1987).

Bengtsson (1986) encontrou que carvões com valores médios de reflectância da vitrinita inferiores a 0,5% iniciavam a combustão em torno de 200°C, em contraste com >260°C para carvões com Rr% da vitrinita de 1,4-1,5%.

5.1.2 O papel da química.

Ao contrário de combustíveis líquidos ou gasosos, o carvão contém quantidade substancial de impurezas. As cinzas desempenham um papel crítico na injeção para combustão devido ao seu teor, composição e temperaturas de fusão. Um aumento no teor de cinzas leva a um aumento no consumo de carbono. (MACHADO, 2009).

O conteúdo de umidade tem sido usado para indicador de *rank* em lignitas e carvões sub-betuminosos. Para carvões do tipo baixo *rank*, a umidade é um importante fator pelo fato de que o carvão precisa ser transportado, manuseado e estocado, e a presença de umidade em grandes quantidades pode impedir alguma atividade pelo fato do aumento dos custos. A umidade também toma lugar de uma considerável quantia de material combustível, e deste modo, diminui o aquecimento, complicando o processo de combustão.

Os carvões alto voláteis tem geralmente um superior desempenho de combustão. Eles geralmente possuem uma melhor reatividade e melhor queima. Boa combustibilidade é particularmente desejável quando altas taxas de injeção são utilizadas, devido ao curto tempo de residência disponível para a queima na zona de combustão.

Segundo Suarez-ruiz (2009), o conhecimento da química dos macerais pode portanto ser um valor para entender processos associados com fatores como a taxa de queima, emissões gasosas como a geração de CO₂.

Emissões gasosas incluem vapor d'água, óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), e pode conter componentes e elementos identificados como perigosos ar-poluente, incluindo o mercúrio.

Quando o carvão é queimado, qualquer remanescente de enxofre é oxidado para formar dióxido de enxofre (SO₂). As emissões de dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio podem reagir com a água e o vapor d'água na atmosfera para formar ácidos sulfurosos (H₂SO₃), ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido nítrico (HNO₃), os componentes da

chuva ácida. A chuva ácida é um problema ambiental porque pode causar a destruição de plantações, degradação de florestas, visibilidade prejudicada, intemperismo químico de rochas e monumentos e aumentar a acidez de lagos e rios.

Três tipos de óxidos de nitrogênio (NO_x) são produzidos nos processos de combustão do carvão. O óxido de nitrogênio (NO) é a forma dominante, logo após, o dióxido de nitrogênio (NO_2), seguido por quantidades pequenas de óxido nitroso (N_2O). Na combustão do carvão, a fonte dominante (mais de 80%) das emissões de NO_x é o próprio carvão, com poucas quantias sendo formadas pelo aquecimento do nitrogênio da atmosfera nas câmaras de combustão. NO_x é uma preocupação ambiental porque se combina com a precipitação atmosférica para formar ácido nítrico, que é componente da chuva ácida.

Dióxido de carbono (CO_2) é um gás causador de efeito estufa, os chamados *greenhouse*. Os gases *greenhouse* absorvem a radiação infravermelha e a refletem de volta pra terra armazenando calor na atmosfera. Pelo motivo das concentrações de CO_2 na atmosfera terem aumentado de 25% a 31% desde que a industrialização em larga escala começou, é discutido se esse aumento está causando as mudanças climáticas (SUAREZ-RUIZ, 2009).

Como o carvão é um sólido heterogêneo, seus constituintes reagem sozinhos ou entre si quando o carvão é usado.

Segundo LORA *et al.* (2004), as reações químicas que se verificam no processo de combustão são as seguintes:

Combustão do carbono: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 406,6 \text{ MJ/kmol}$. Na base mássica, 12 kg de carbono reagem com 32 kg de oxigênio, formando 44 kg de dióxido de carbono e liberando 406,6 MJ/kmol.

Combustão do hidrogênio: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 571,08 \text{ MJ/kmol}$. Na base mássica, 4 kg de hidrogênio reagem com 32 kg de oxigênio, formando 36 kg de água e liberando 571,08 MJ/kmol.

Combustão do enxofre: $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + 29,47 \text{ MJ/kmol}$. Na base mássica, 32 kg de enxofre reagem com 32 kg de oxigênio, formando 64 kg de dióxido de enxofre e liberando 29,47 MJ/kmol.

Do ponto de vista tecnológico para o uso em combustão do carvão, quanto maior o teor de carbono, mais alto são as necessidades de enriquecimento em oxigênio para manter a temperatura na zona de combustão (MACHADO, 2009).

Na zona de combustão, as reações com o hidrogênio são consideravelmente mais rápidas, o que potencialmente favorece que as reações aconteçam em temperaturas menores. Em geral, o teor de hidrogênio do carvão

umenta com a diminuição do *rank*. Embora o uso de carvões altos voláteis possa ser traduzido como menos carbono, o maior teor de hidrogênio pode ajudar a compensar este efeito (MACHADO, 2009).

As impurezas minerais reduzem a capacidade do carvão como um combustível para caldeiras; o baixo ponto de fusão da cinza causa deposição de cinza e corrosão da câmara de aquecimento (DNPM, 1987).

Minerais de sal, tais como cloretos, sulfatos e nitratos estão presentes no carvão, comumente como produtos de infiltração, depositados a partir de salmouras que migram através da seqüência sedimentar. Eles se tornam significativos em operações mineiras, pois as águas das minas ricas em nitratos criam sérios efeitos de corrosão nas instalações metálicas da mina. Adicionalmente, cloretos causam corrosão severa em caldeiras aquecidas com carvão (DNPM, 1987).

5.1.3 O papel da reatividade.

A temperatura de ignição está relacionada com a combustão espontânea nos grandes depósitos de armazenamento, que ocorre nas termelétricas. Esta temperatura está relacionada com a natureza do material e é a maior temperatura que o combustível suporta sem dar início a uma combustão espontânea e rápida, acompanhada de uma forte elevação de temperatura.

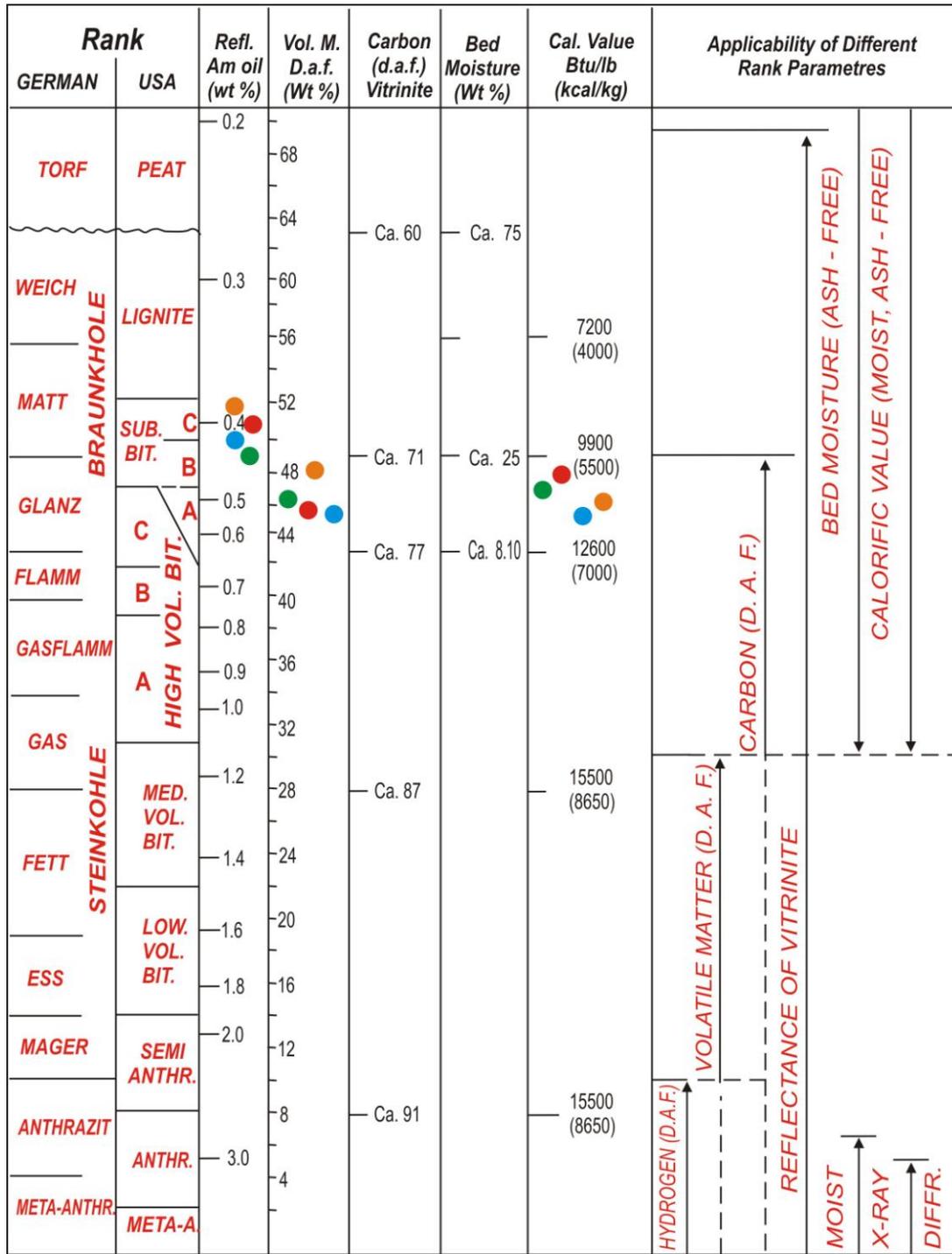
A temperatura de carbonização é a maior temperatura que o combustível suporta sem ocorrer amolecimento e posterior fusão completa do material (Redivo, 2002).

5.2 Grau de carbonificação do carvão (rank)

A classificação segundo o *rank* dos carvões gonduânicos sul-brasileiros através de normas internacionais tem se revelado um verdadeiro problema (SILVA, 1994). Este fato ocorre devido a dificuldade em obter-se uma perfeita correlação entre os parâmetros normalmente utilizados na classificação de carvões do Hemisfério Norte, principalmente entre o poder refletor médio da vitrinita e outros parâmetros químicos. Esta diferença entre os parâmetros analisados, parece ser o resultado de variações faciológicas, que modificam a composição da estrutura química da vitrinita,

impregnando-a de substâncias lipídicas durante o processo de formação do carvão (CORRÊA DA SILVA & WOLF, 1980).

Enquanto os valores do poder refletor médio da vitrinita (Rr%) classificam estes carvões no estágio sub-betuminoso B-C, os teores de matéria volátil, em base seca e livre de cinzas, sugerem estágios um pouco mais elevados, isto é, o estágio carvão sub-betuminoso B-A. Por outro lado, se considerarmos o valor do poder calorífico em uma base seca e livre de cinzas, os carvões são classificados também como sendo do tipo sub-betuminoso B-A (figura 26).



● Furo F-369

● Furo F-371

● Furo F-370

● Furo F-372

Figura 26 - Classificação média de todas as camadas de carvão dos quatro furos estudados neste trabalho utilizando como parâmetros a reflectância da vitrinite (Rrandom(%)), o teor em peso (%) da matéria volátil (d.a.f) e o poder calorífico (d.a.f), acordo com a norma norte americana (ASTM).

Fonte: Stach *et. al*, 1982 Modificado

CAPÍTULO 6

Conclusões e considerações finais

A metodologia estabelecida para os estudos de caracterização não atingiu todos os fatores que levariam a uma caracterização tecnológica completa das camadas superiores, banco louco e inferiores do carvão da jazida de Candiota. Porém as análises realizadas contribuirão para um estudo futuro mais aprofundado neste quesito de se avaliar o potencial para geração de energia elétrica.

Do ponto de vista da produtividade e restrições ambientais no processo de combustão, são geralmente requeridos baixos teores de cinzas e umidade, baixo teor de enxofre e alto poder calorífico dos carvões. O poder calorífico dos carvões é função direta do seu teor de cinzas, tecnicamente as CT podem operar com teores de cinzas de até 53%, como no caso da Termelétrica Presidente Médici do Rio Grande do Sul.

Todos os parâmetros das análises realizadas nos produtos térmicos estão em níveis perfeitamente aceitáveis para a geração térmica a carvão.

As temperaturas obtidas nos ensaios termogravimétricos tiveram valores elevados, ou seja bem superiores às temperaturas ambientais, significando que não há problema de combustão espontânea nos depósitos de armazenamento.

REFERÊNCIAS

- ABICHÉQUER, L. A. Relatório de estágio supervisionado: **Caracterização do carvão da Mina de Candiota**: Companhia Riograndense de Mineração [recurso eletrônico]. 2007. 35 f.
- ALPERN, B., NAHUYS, J., MARTINEZ, L., 1984, “**Mineral matter in ashy and nonwashable coals: its influence on chemical properties**,” Community Serv. Geol. Portugal, t. 70, fasc. 2, 299–317.
- ANEEL, 2008. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 236 p.
- ASTM (1991). Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. **Standard Test Methods for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke**. ASTM, Philadelphia, PA, p.324-325.
- ASTM (1991). Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. **Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke From Coal**. ASTM, Philadelphia, PA, p.326-328.
- ASTM, (1991). Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. Standard Test Methods for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. ASTM, D 2015-91, Philadelphia,PA, pp.266-273.
- ASTM D 5373-93. 1997. Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke. In: 1997 Annual Book of ASTM Standards, Section 5, Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, Vol.05.05, Gaseous Fuels: Coal and Coke p.495-462. American Society for Testing and Materials – ASTM. Philadelphia, Pa. 1997.
- BENGTSSON, M., 1986, Combustion behavior for a range of coals of various origins and petrographic composition, Ph.D. dissertação, Estocolmo, Suécia, The Royal Institute of Technology.
- BERTOL, M. A.; CÉSAR, S. B.; MACIEL, L. A. C. ; MÜLLER, A. A.; SANTOS, H. M. e SCHMITT, J. C. C. - 1987 - **Perfil Analítico do Carvão** - Porto Alegre - DNPM - 140 p.
- BUSTIN, R.M.; CAMERON, A.R.; GIREVE, D.A.; KALKREUTH, W.D. 1983. **Coal petrology: its principles, methods, and applications**. Victoria, British Columbia: Geological Association of Canada, 3, 248p.
- CORRÊA DA SILVA, Z.C. & WOLF, M. 1980. O poder refletor como parâmetro para determinação do grau de carbonificação dos carvões gonduânicos do sul do Brasil. **Pesquisas**, 13, p. 35-42.
- CORRÊA DA SILVA, Z.C. 1981. Origin and fácies of some South Brazilian coal seams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COAL SCIENCE, Düsseldorf 1981. **Proceedings...**, p. 38-44.
- CORRÊA DA SILVA, Z.C. 1987. Jazidas de carvão no Rio Grande do Sul, Brasil. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA 3, Curitiba 1987. **Atas...** 2, p. 677-687.
- CRM, 2010. Companhia Riograndense de Mineração. Disponível em : <<http://www.crm.rs.gov.br>>. Acesso em set de 2010.

- DELIA-FÁVERA, J. C., CHAVES H.A.F., PEREIRA E., CÂMARA FILHO, L.M., MEDEIROS M.A.M. 1992. **Geologia da área de Candiota, Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: UERJ/DGG/LABCG. 68p. 1º Curso de Análises de Bacias.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balço Energético Nacional 2010**: Ano Base 2009 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro : EPE, 2010. 276 p. : 180 il. ; 23 cm.
- HOLZ, M., KALKREUTH, W., 2004. Sequence stratigraphy and coal petrology applied to the Early Permian coal-bearing Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. In: **Pashin, J., Gastaldo, R. (Eds.), Sequence Stratigraphy, Paleoclimate, and Tectonics of Coal-bearing Strata, AAPG Studies in Geology**, vol. nº 51, pp. 147-167.
- HOUGH, D. C., Sanyal, A., 1987, "The role of petrography in the classification and combustion of coal," **Energy World 146**, 7–10.
- ICCP. International Committee for Coal and Organic Petrology. 1971. **International handbook of coal petrography**. 2 ed. Paris, Centre National de La Recherche Scientifique. Supplement
- IKA – WERKE, 2004. C2000 Basic IKA Calorimeter System Operating Instructions. 92p.
- ISO 7404-3. 1984. Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite – Part 3: Methods of determining maceral group composition. **International Organization for Standardization – ISO**. Genova. 4p.
- ISO 7404-5. 1994. Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite – Part 5: Methods of determining microscopically the reflectance of vitrinite. **International Organization for Standardization – ISO**. Genova. 12p.
- KALKREUTH, W. & LECKIE, D.A. 1989. Sedimentological and petrographical characteristics of Cretaceous strandplain coals: a model for coal accumulation from the North American Western Interior Seaway. **International Journal of Coal Geology**, 12, p.381-424.
- KALKREUTH, W.D. 2001. Holz, M.; Kern, M.; SILVA, M.B.; Finkelmann, R.; & Willen, J. 2001. Permian Coal measures in Rio Grande do Sul, Brazil - Geological setting coal petrography and chemical characteristics. In: CONGRESSO LATINO DE GEOLOGIA, III., 2001, Montevideo. **Anais...** Montevideo.
- KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M.B.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. 2006. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, **68**: 79-116.
- LEVANDOWSKI, J. H. **Petrologia e geoquímica das camadas de carvão e sua relação com gás natural determinado no poço CBM 001-STRS, Bacia do Paraná** / Janaina Hugo Levandowski . – Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2009.81 f. : il.
- LORA, E. E. S. & NASCIMENTO, M. A. R. do. (cord.). **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. –Rio de Janeiro : Interciência, 2004. 2 volumes (1296 p.).
- MACHADO, J. G. M. da S. Estudo de reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas. 2009. Porto Alegre, RS. Tese (Doutorado) xiv, 198 f. : il.

- MILANI, E. J.; França, A. B. & Schneider, R.L. 1994. Bacia do Paraná. In: Figueiredo, A.M.F (coord.). **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 8 (1): 69-72.
- NANDI, B., BROWN, T. D., LEE, G. K., 1977, "Inert coal macerals in combustion". **Fuel** 56, 125–130.
- NETZSCH STA 409, 2008. Catálogo, **Technical Attributes**. 8p.
- OTTAWAY, M. Use of thermogravimetric for proximate analysis of coals and cokes. **Fuel**, V.61, p. 713-716, 1982.
- PACHECO, E. T. Estudo do beneficiamento a seco do carvão da Mina de Candiota-RS. 2008. Porto Alegre. Tese de doutorado. xi, 78 f. : il.
- REDIVO, R.V., 2002. Caracterização tecnológica do carvão das camadas barro branco e bonito para fins energéticos na região de Criciúma – SC. Tese (Mestrado), São Paulo, 2002.
- RODRIGUES, A. D. 2008. As "Camadas de carvão inferiores" de Candiota, FM. Rio Bonito, Bacia do Paraná : análise estratigráfica e implicações para seu aproveitamento econômico. In: Salão de Iniciação Científica (20. : 2008 out. 20-24 : Porto Alegre, RS). **Livro de resumos**. Porto Alegre : UFRGS, 2008. Resumo 309, p.110.
- SCHNEIDER, R.L. et. al., **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**, Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, 1974, v.1, p. 41-65.
- SCHOPF, J.M. 1956. A definition of coal. **Economic Geology**, 51 : 521-527.
- SCHÜTTE, K.; ROTZOLL, G.; SCHÜGERL, K. Simultaneous measurement of weight loss by DTG combustion and SO₂ – formation for different coals. **Fuel**, V.68, p. 1603-1605, 1989.
- SIBILIA, John P., **A guide to materials characterization and chemical analysis**. Morristown: VCH Publishers, 1988.
- SILVA, M.B., 1994. **Caracterização petrográfica das camadas de carvão da Malha IV, Jazida de Candiota, RS**. 1994. 106 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- SILVA, M.B., 1999. **Petrologia de carvões nas jazidas do Leão e Candiota, Permiano Inferior da Bacia do Paraná, RS, Brasil**. 1999. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- SILVA, M.B. & KALKREUTH, W.D. Petrological and geochemical characterization of Candiota coal seams, Brazil – Implication for coal facies interpretations and coal rank. In: **International Journal of Coal Geology**, 64 (2005) p. 217-238.
- SIMÃO, Gustavo; Análises petrográficas e químicas dos carvões e partículas não queimadas nas cinzas da Termoelétrica Presidente Médici, Candiota-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA , 11., 21 a 26 out., Atibaia. **Anais**. Atibaia, SP: SBGq, 2007.
- SKOOG, D.A. 2002. **Princípios de análise instrumental**. 5.ed. Porto Alegre, Bookman, 836p.
- SOLOMON, P. R., BEER, J. M., LONGWELL, J. P., 1987, "Fundamentals of coal conversion and relation to coal properties," **Energy** 12(8–9), 837–862.

- STACH, E. 1982. The lithotypes of humic and sapropelic coals. In: STACH, E.: MACKOWSKY, M.Th.: TEICHMÜLLER, M.; TAYLOR, G.H.; CHANDRA, D. & TEICHMÜLLER, R. 1982 (eds.). **Stach's Textbook of Coal Petrology**, 3rd ed, Berlin: Gerbrüder-Borntraeger, p. 171-177.
- SUÁREZ-RUIZ, I. & CRELLING, J.C., 2009. **Applied coal petrology: the role of petrology in coal utilization**. USA. Elsevier.
- TEIXEIRA, E.C. *et al*, 2004. **Estudos Ambientais em Candiota: carvão e seus impactos** / coord. Elba Calesso Teixeira [e] Marçal José Rodrigues Pires. – Porto Alegre: FINEP / PDACT / CIAMB / FAPERGS / FEPAM, 2004. 232p. : il. – (Cadernos de planejamento e gestão ambiental, 4).
- VARIO MACRO – **Elemental Analyzers, The universal way of macro analysis**, 2004.
- WARD, C. R., (ed.), 1984, **Coal geology and coal technology**, Blackwell Scientific Publications, Melbourne, 345 pp.
- YAVORSKY, J.M., J.H. CUNNINGHAM, and N.G. HUNDLEY. 1968. Batch Autoclave Studies of Catalytic Hydrodesulfurization of Coal. **Forest Prod. J.** 5(5):306-311.
- ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.; VIEIRA, I.S.; APPI, C.J.; ZANOTO, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. (Eds.) *Origem e evolução das bacias sedimentares*. Petrobrás, p. 135-168.

ANEXO A – Tabelas

Tabela 7 - Classificação dos macerais. Fonte: ICCP, 1971 Modificado

Grupos Macerais	Maceral	Origem
Vitrinita	Telovitrinita	Parede celular de tecidos lenhosos e parênquimas compostos de celulose e lignina.
	Gelovitrinita	Tecidos altamente gelificados e detritos húmicos.
	Detrovitrinita	Forte deterioração de tecidos lenhosos e parênquimas de troncos e folhas
Liptinita	Esporinita	Pólen e esporos
	Cutininita	Cutículas e folhas
	Resininita	Resinas e graxas
	Algininita	Algas ou bactérias
	Liptodetrinita	Fragmentos de outros macerais deste grupo
Inertinita	Fusinita	Paredes celulares ligno-celulósicas
	Semifusinita	Parênquimas e xilênquimas de troncos e folhas
	Micrinita	Forte fragmentação de outros macerais deste grupo
	Macrinita	Alteração de substâncias húmicas
	Secretinita	Oxidação de resinas e géis húmicos
	Funginita	Esporos de fungos e tecidos
	Inertodetrinita	Material fitogenético sujeito a fusinização

Tabela 8 - Identificação detalhada da ocorrência de carvão nos furos estudados. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	Camada	#Lab	Topo (m)	Base (m)	Espessura (m)
369	S5	09-163	23,92	24,23	0,26
	S6	09-164	24,59	25,99	1,40
	L1	09-165	27,43	27,51	0,08
	S7	09-166	28,77	29,19	0,30
	L2	09-167	32,37	32,64	0,16
	S8	09-168	32,82	33,32	0,50
	S9	09-169	33,69	33,94	0,25
	BL	09-170	34,71	35,35	0,64
	I1	09-171	47,33	48,26	0,93
	L3	09-172	49,10	49,55	0,45
	I2	09-173	50,05	51,06	1,01
	I3	09-174	52,00	52,16	0,16
	370	S8	09-075	4,77	4,87
S9		09-076	5,10	5,63	0,53
L1		09-109	6,10	6,30	0,20
BL		09-077	6,57	7,17	0,60
I1		09-078	20,73	21,89	1,16
I2		09-079	22,36	23,46	1,10
371	S2	09-175	32,97	34,47	1,50
	L1	09-176	35,68	35,77	0,09
	S3	09-177	35,91	36,96	1,05
	S4	09-178	37,50	38,18	0,68
	S5	09-179	38,77	40,25	1,48
	S6	09-180	42,10	42,26	0,16
	S7	09-181	43,66	44,44	0,45
	L2	09-182	46,08	46,45	0,18
	S8	09-183	46,61	47,20	0,59
	S9	09-184	47,45	47,69	0,24
	BL	09-185	48,33	49,18	0,85
I1	09-186	59,53	59,74	0,21	

	I2	09-187	62,67	64,10	1,43
	L3	09-188	64,89	65,02	0,13
	I3	09-189	65,92	66,41	0,49
	I4	09-190	66,82	67,86	1,04
	I5	09-191	68,55	69,06	0,51
	L4	09-192	69,41	69,54	0,13
	S3	09-193	15,41	15,68	0,27
	S4	09-194	16,50	17,85	0,93
	S5	09-195	18,61	19,20	0,54
	S6	09-196	19,84	21,19	1,35
	S7	09-197	22,49	22,60	0,11
	L1	09-198	24,10	24,23	0,13
	S8	09-199	25,06	25,25	0,19
372	L2	09-200	26,66	26,74	0,08
	L3	09-201	26,97	27,06	0,09
	S9	09-202	27,25	27,61	0,36
	BL	09-203	28,59	29,25	0,66
	I1	09-204	39,69	39,83	0,14
	I2	09-205	43,13	44,37	1,24
	I3	09-206	45,69	47,61	1,59
	I4	09-207	49,03	49,87	0,84
	L4	09-208	49,80	49,92	0,12

Tabela 9 - Análise petrológica detalhada do furo F-369, valores em porcentagem. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo F-369		Nº. Da Amostra e Nome da Camada											
		09-163	09-164	09-165	09-166	09-167	09-168	09-169	09-170	09-171	09-172	09-173	09-174
		S5	S6	L1	S7	L2	S8	S9	BL	I1	L3	I2	I3
Vitrinita	Telovitrinita	17,6	11,8	15,6	19,4	27,2	1,4	2,6	3,8	7,4	4,6	6	3,4
	Gelovitrinita	10,6	21,6	18,2	15,4	13,2	2,4	5,4	5,6	17	14,4	27,6	31,4
	Detrovitrinita	1,6	2,2	2	3,2	3,2	0,8	0,8	2,8	2,4	3	4	5,8
Liptinita	Esporinita	1	1,4	1,8	2	4,8	6,6	8,6	6,6	7,8	4,4	6,8	7,8
	Cutininita	3	1,8	2,8	1,8	1,2	1,8	3,8	3,6	5,2	1,4	1,2	1,4
	Resinita	-	-	-	-	-	1	1,4	2,8	1,8	0,8	1,8	1,4
	Alginita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	-
	Liptodetrinita	0,2	-	1	0,4	0,4	0,2	1,2	9,4	8,2	3,6	2,8	3,6
Inertinita	Fusinita	3,8	2,6	2	2,6	2,6	11	9	10,2	6,4	2,4	3,4	5,2
	Semifusinita	3,2	4,6	4,2	5,6	5,4	18,4	11,8	13,8	4,2	6,2	9,2	7,6
	Micrinita	0,2	0,4	0,4	0,2	0,2	-	-	-	-	-	-	0,2
	Macrinita	0,8	1,6	0,8	0,2	0,2	-	-	0,2	-	0,4	0,2	0,2
	Secretinita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Funginita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Inertodetrinita	7,8	8,6	8,4	9	6,2	5,4	6,8	12,2	7,8	3,2	8,4	5,6
Matéria Mineral	Quartzo	0,6	0,2	0,4	0,4	0,8	0,6	0,4	-	0,8	0,2	0,8	0,8
	Carbonato	1,4	0,6	1,8	0,8	0,8	2,6	0,4	0,8	0,2	0,2	-	-
	Pirita	0,4	3,4	1,6	1	2	2	1	0,2	1,2	1	4	1,4
	Argilas	47,8	39,2	39	38	31,8	45,8	46,8	28	29,6	54,2	23,4	24,2
Reflectância da Vitrinita	Rrandom(%)	0,439	0,413	0,385	0,431	0,422	0,407	0,437	0,421	0,444	0,542	0,383	0,397
	Desvio Padrão	0,053	0,044	0,043	0,047	0,043	0,076	0,054	0,044	0,055	0,056	0,046	0,035
	Pontos	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Rank	SBB	SBC	SBC	SBB	SBB	SBC	SBB	SBB	SBB	SBA	LIG	SBC

Legenda: LIG = Lignita; SBC = Sub-bituminoso Tipo C; SBB = Sub-bituminoso Tipo B; SBA = Sub-bituminoso Tipo A.

Tabela 10 - Análise petrológica detalhada do furo F-370, valores em percentagem. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo F-370		Nº. Da Amostra e Nome da Camada					
		09-075	09-076	09-109	09-077	09-078	09-079
		S8	S9	L1	BL	I1	I2
Vitrinita	Telovitrinita	8	2,2	1,6	3,2	6,2	5
	Gelovitrinita	16,6	3,2	3,2	6,4	22	14,8
	Detrovitrinita	6,4	0,8	0,8	1,2	3	2,2
Liptinita	Esporinita	3,4	9,8	13	9,4	6	6
	Cutininita	2,4	3	5,2	3,2	1,6	1,6
	Resininita	0,6	2,2	3,4	1,6	0,4	0,8
	Algininita	-	-	-	-	-	-
	Liptodetrinita	1,6	1,8	1,2	2	1,8	1,4
Inertinita	Fusinita	1,4	17,6	17,4	18,8	5,2	4
	Semifusinita	4	8	9,8	9,4	7,4	4,4
	Micrininita	0,2	-	-	-	-	-
	Macrininita	0,4	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4
	Secretininita	0,2	-	-	-	-	-
	Fungininita	-	-	-	-	-	-
	Inertodetrinita	5	11,6	9,4	11,8	8	6,6
Matéria Mineral	Quartzo	0,8	1,6	0,2	0,6	1,4	0,4
	Carbonato	-	-	-	-	0,2	1,2
	Pirita	5,6	1	1,6	1,4	0,8	1,4
	Argilas	43,4	37	32,8	30,8	35,8	49,8
Reflectância da Vitrinita	Rrandom(%)	0,378	0,434	0,384	0,418	0,443	0,363
	Desvio Padrão	0,063	0,061	0,067	0,057	0,059	0,052
	Pontos	100	100	100	100	100	100
	Rank	LIG	SBB	LIG	SBC	SBB	LIG

Legenda: LIG = Lignita; SBC = Sub-bituminoso Tipo C; SBB = Sub-bituminoso Tipo B; SBA = Sub-bituminoso Tipo A.

Tabela 11 - Análise petrológica detalhada do furo F-371, valores em percentagem. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo F-371		Nº. Da Amostra e Nome da Camada																	
		09-175 S2	09-176 L1	09-177 S3	09-178 S4	09-179 S5	09-180 S6	09-181 S7	09-182 L2	09-183 S8	09-184 S9	09-185 BL	09-186 I1	09-187 I2	09-188 L3	09-189 I3	09-190 I4	09-191 I5	09-192 L4
Vitrinita	Telovitrinita	7,2	13	6,8	7,2	7,8	13,2	18,4	10,4	2,2	0,8	2,2	5,2	5	0,6	13,8	7,2	7,2	16,6
	Gelovitrinita	32,6	27,8	22,4	15,6	29,6	22,2	25,8	22,8	4,6	1,8	9,6	26,4	26,4	8	21,8	20,2	24	22,8
	Detrovitrinita	2,4	3,6	1,8	3,4	5,8	6,4	3,6	4	2,4	1,6	2,6	5,2	2,6	6	4,8	4,2	5,2	9
Liptinita	Esporinita	2,4	1,6	3,6	2,6	3,8	2,6	3,8	3,6	8,6	8	7,2	6,4	5,4	2	6,6	7	4,2	3,2
	Cutininita	4,6	3	2,4	1,8	1,8	5	2,6	6,2	2,6	2,6	3,8	3,6	2,2	0,6	1,4	1,2	2,2	1,6
	Resinita	0,6	0,2	0,4	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	2	1	1	0,4	-	0,4	0,2	0,2	0,2
	Alginita	-	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	-	-
	Liptodetrinita	1	0,4	1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	1,8	4,4	3,4	2,6	1,6	0,6	1	3,8	3	0,4
Inertinita	Fusinita	6	3,2	4	3	1,8	3,4	3	3,8	12,4	8,8	16,6	8,6	5,6	2,4	4,4	5,6	5,6	3,8
	Semifusinita	7,4	4,8	10	5	4,4	2,8	4,6	5,2	7,6	7,6	7,8	4,4	7	2,2	4,8	8	8,8	4,8
	Micrinita	0,4	-	-	-	0,4	0,4	0,2	-	-	-	-	0,6	0,2	-	-	-	0,4	-
	Macrinita	1,2	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	1,2	0,6	-	-	0,4	0,2	0,4	0,6	0,2	0,2	0,2	-
	Secretinita	-	0,6	0,2	0,4	0,4	-	-	0,6	-	-	0,2	-	0,4	-	-	-	-	-
	Funginita	-	-	-	0,4	-	0,6	-	-	-	-	0,2	-	-	-	0,4	0,6	0,2	-
	Inertodetrinita	9	4,8	8	6,6	10	6	5	6,2	13,2	9,2	11,8	5,6	8,8	9,2	5,8	10	6,8	5,4
Matéria Mineral	Quartzo	0,4	0,4	0,4	0,4	1	1,2	0,4	1,4	0,2	0,2	0,6	0,6	2,2	1,2	0,8	1	0,2	1,4
	Carbonato	-	0,2	-	-	-	2,2	0,8	1,2	-	-	0,2	0,4	0,2	-	0,2	-	-	-
	Pirita	5	3,2	1,4	1,2	2,2	2,6	1,2	3,2	0,6	0,2	-	3,6	0,6	1,8	0,8	0,4	1	4,8
	Argilas	19,8	32,6	36,8	51,6	29,8	30	28,6	29,8	43,4	52,8	32,4	25,4	30,8	64,8	32,6	30,2	30,8	26
Reflectância da Vitrinita	Rrandom(%)	0,381	0,407	0,413	0,427	0,395	0,397	0,383	0,366	0,408	0,423	0,435	0,372	0,445	0,434	0,414	0,41	0,37	0,388
	Desvio Padrão	0,038	0,048	0,044	0,054	0,052	0,043	0,045	0,05	0,062	0,066	0,042	0,043	0,051	0,065	0,035	0,049	0,03	0,049
	Pontos	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Rank	LIG	SBC	SBC	SBB	SBC	SBC	LIG	LIG	SBC	SBB	SBB	LIG	SSBB	SBB	SBC	SBC	LIG	SBC

Legenda: LIG = Lignita; SBC = Sub-bituminoso Tipo C; SBB = Sub-bituminoso Tipo B; SBA = Sub-bituminoso Tipo A.

Tabela 12 - Análise petrológica detalhada do furo F-372, valores em percentagem. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo F-372		Nº. Da Amostra e Nome da Camada															
		09-193 S3	09-194 S4	09-195 S5	09-196 S6	09-197 S7	09-198 L1	09-199 S8	09-200 L2	09-201 L3	09-202 S9	09-203 BL	09-204 I1	09-205 I2	09-206 I3	09-207 I4	09-208 L4
Vitrinita	Telovitrinita	29,6	16,8	16	23,6	12,6	37,8	20	2	4	0,8	2,6	16,6	12,8	14,4	19	23,8
	Gelovitrinita	17	16,4	9,8	15,6	13,6	9,8	7,4	5,2	3	2	3,2	11,2	16	15,8	21	14,8
	Detrovitrinita	3,4	4,2	5,4	3,2	5	9	10,4	4	1,8	5	3,8	15,8	7,6	6,4	7,2	11,4
Liptinita	Esporinita	8	3,2	2,6	1,2	2	0,8	0,8	1,6	9,2	4,2	5,2	5	4,2	9	8,8	1
	Cutinita	6,2	1,8	1,4	2,6	1,6	1	1,2	2	2,2	1,8	2,8	3,4	1	3,4	3,8	3
	Resinita	0,6	0,4	-	0,2	0,2	-	-	0,2	0,4	0,2	0,8	-	0,2	0,4	0,2	-
	Alginita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	-
	Liptodetrinita	3,2	1	0,6	1,2	0,6	0,4	-	3,2	7	4,2	4	6,4	3,8	2	2,8	0,4
Inertinita	Fusinita	5,8	6,8	5,8	2,6	2,4	4,6	3,8	7,8	13,8	1,2	15,8	3,8	4,6	6,2	4,4	6
	Semifusinita	3,8	8,2	3,2	2	3	3,4	3,6	5	8,4	2,8	9,6	3,2	4,2	4,4	3,8	3,8
	Micrinita	-	-	-	0,2	0,2	0,4	-	-	-	-	-	-	-	0,4	0,8	0,6
	Macrinita	0,8	0,4	0,8	0,2	0,4	-	-	-	0,2	0,2	0,4	-	0,2	0,2	0,2	0,2
	Secretinita	0,6	0,2	0,6	-	0,4	-	-	0,4	-	-	-	-	-	0,4	-	-
	Funginita	-	0,2	-	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Inertodetrinita	7,4	9,4	14	10	15,6	9,4	6,4	21	14	11,6	24,2	7	11,4	11	7	3,4
Matéria Mineral	Quartzo	0,6	0,6	1	1,4	1	0,4	0,6	1,2	0,6	0,8	0,6	0,6	1,4	1,2	1,4	1,4
	Carbonato	-	-	0,2	-	0,8	-	0,2	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-
	Pirita	0,2	1	1,4	1,2	1,4	-	1,6	3	0,2	0,8	1,6	4,4	1	0,4	3,4	3
	Argilas	12,8	29,4	37,2	34,8	39	23	44	43,4	35,2	64,4	25,4	22,6	31,4	24,4	16	27,2
Reflectância da Vitrinita	Rrandom(%)	0,394	0,41	0,415	0,441	0,388	0,375	0,378	0,401	0,407	0,376	0,412	0,334	0,401	0,41	0,39	0,404
	Desvio Padrão	0,045	0,058	0,047	0,063	0,039	0,045	0,039	0,036	0,044	0,051	0,034	0,03	0,056	0,043	0,036	0,033
	Pontos	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Rank	SBC	SBC	SBC	SBB	SBC	LIG	LIG	SBC	SBC	LIG	SBC	LIG	SBC	SBC	SBC	SBC

Legenda: LIG = Lignita; SBC = Sub-bituminoso Tipo C; SBB = Sub-bituminoso Tipo B; SBA = Sub-bituminoso Tipo A.

Tabela 13 - Resultados das análises imediata das amostras de carvão. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	Camada	#Lab	Umidade (%)	Cinza (%)	Mat. Volátil (%)	Mat. Volátil d.a.f (%)	Carbono Fixo (%)
369	S5	09-163	6,3	52,6	19,1	46,47	22
	S6	09-164	6,2	48,6	20,3	44,91	24,9
	L1	09-165	6	53,2	19,8	48,53	21
	S7	09-166	5,8	53,7	19,1	47,16	21,4
	L2	09-167	5,8	49,4	21,6	48,21	23,2
	S8	09-168	4,6	59	16,9	46,43	19,5
	S9	09-169	5,4	55,1	17,9	45,32	21,6
	BL	09-170	5,8	47,8	18,7	40,30	27,7
	I1	09-171	4,5	56,6	18,7	48,07	20,2
	L3	09-172	4,9	72,9	13,5	60,81	8,7
	I2	09-173	5	50,4	21,2	47,53	23,4
	I3	09-174	5,6	44,7	22,8	45,88	26,9
	370	S8	09-075	5,7	47,5	17,6	37,61
S9		09-076	5,1	56,8	17,9	46,98	20,2
L1		09-109	5,8	30,1	21,4	33,39	42,7
BL		09-077	5,7	48,1	19,8	42,86	26,4
I1		09-078	6,5	54,8	19,6	50,65	19,1
I2		09-079	4,1	71,2	15,1	61,13	9,6
371	S2	09-175	9,9	39,4	21	41,42	29,7
	L1	09-176	8,6	44,4	17	36,17	30
	S3	09-177	9,6	51	16,7	42,39	22,7
	S4	09-178	7,5	62	14,7	48,20	15,8
	S5	09-179	9,4	47,5	18,6	43,16	24,5
	S6	09-180	7,5	49,9	20,7	48,59	21,9
	S7	09-181	7,7	55,1	17,4	46,77	19,8
	L2	09-182	7,3	45,9	18,7	39,96	28,1
	S8	09-183	6,5	58	16,2	45,63	19,3
	S9	09-184	6,2	60,7	16,1	48,64	17
	BL	09-185	7	48,1	18,4	40,98	26,5
	I1	09-186	5,7	53,6	19,7	48,40	21
	I2	09-187	5,7	56,3	20,4	53,68	17,6
	L3	09-188	4,1	67,1	12,6	43,75	16,2
	I3	09-189	6,9	51	20,1	47,74	22
	I4	09-190	6,5	45,8	21,6	45,28	26,1
I5	09-191	7,2	44	24,1	49,39	24,7	
L4	09-192	7,1	46,2	22,6	48,39	24,1	
372	S3	09-193	6,5	29	29,5	45,74	35
	S4	09-194	8,1	46,4	20,9	45,93	24,6
	S5	09-195	7,3	58,4	18,1	52,77	16,2
	S6	09-196	7,3	44,5	20,9	43,36	27,3
	S7	09-197	7,3	59	17,2	51,04	16,5
	L1	09-198	10	47,2	20,5	47,90	22,3
	S8	09-199	4,9	67	15,6	55,52	12,5
	L2	09-200	5,2	52,9	17,7	42,24	24,2
	L3	09-201	6,9	50,2	19,6	45,69	23,3
	S9	09-202	4,5	74,2	13,5	63,38	7,8
	BL	09-203	5,6	45,6	19,4	39,75	29,4
	I1	09-204	5	51,1	21,6	49,20	22,3
	I2	09-205	5,8	53,2	20,3	49,51	20,7
	I3	09-206	7,6	46,1	22	47,52	24,3
	I4	09-207	5,6	43	25,8	50,19	25,6
	L4	09-208	5,7	46,2	22,8	47,40	25,3

Tabela 14 - Resultados da análise elementar das amostras de carvão. Resultados em percentagem em peso. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	Camada	#Lab	C	H	N	S	O
369	S5	09-163	26,68	3,4	0,61	0,56	16,15
	S6	09-164	32,72	3,88	0,7	2,52	11,58
	L1	09-165	25,78	3,43	0,62	0,67	16,30
	S7	09-166	24,96	3,3	0,61	2,12	15,31
	L2	09-167	30,2	3,9	0,76	1,28	14,46
	S8	09-168	25,43	2,99	0,43	0,98	11,17
	S9	09-169	25,86	3,08	0,41	1,03	14,52
	BL	09-170	33,53	3,66	0,5	0,62	13,89
	I1	09-171	27,45	3,36	0,52	0,85	11,22
	L3	09-172	12,63	2,21	0,25	0,32	11,69
	I2	09-173	30,31	3,53	0,54	1,31	13,91
	I3	09-174	34,8	4,06	0,8	0,86	14,78
370	S8	09-075	21,71	2,41	0,61	4,33	23,43
	S9	09-076	22,34	2,35	0,58	1,70	16,23
	L1	09-109	32,27	2,88	0,55	0,70	33,51
	BL	09-077	31,13	2,65	0,53	3,66	13,93
	I1	09-078	26,37	2,69	0,58	0,49	15,07
	I2	09-079	15,79	1,91	0,41	0,53	10,16
371	S2	09-175	31,56	4,22	0,70	4,71	19,41
	L1	09-176	25,02	3,41	0,65	1,54	24,98
	S3	09-177	28,40	3,71	0,65	1,85	14,39
	S4	09-178	21,03	2,96	0,48	0,88	12,65
	S5	09-179	30,35	3,98	0,68	1,56	15,93
	S6	09-180	27,97	3,68	0,69	1,54	16,22
	S7	09-181	24,98	3,35	0,59	1,1	14,88
	L2	09-182	24,72	3,37	0,63	2,97	22,41
	S8	09-183	25,79	3,04	0,43	0,77	11,97
	S9	09-184	19,56	2,77	0,31	0,48	16,18
	BL	09-185	30,51	3,51	0,45	0,7	16,73
	I1	09-186	28,26	3,42	0,56	3,04	11,12
	I2	09-187	28,10	3,41	0,55	0,95	10,69
	L3	09-188	13,42	2,05	0,32	0,49	16,62
	I3	09-189	28,71	3,71	0,5	0,71	15,37
I4	09-190	33,53	4,2	0,6	1,27	14,60	
I5	09-191	35,86	4,24	0,64	2,35	12,91	
	L4	09-192	27,33	3,51	0,64	9,85	12,47
372	S3	09-193	47,29	4,81	1,05	0,68	17,17
	S4	09-194	31,04	3,92	0,7	1,86	16,08
	S5	09-195	22,86	3,01	0,5	1,09	14,14
	S6	09-196	28,35	3,74	0,64	2,77	20,00
	S7	09-197	22,52	3,01	0,57	1,03	13,87
	L1	09-198	29,19	3,93	0,69	0,45	18,54
	S8	09-199	16,65	2,34	0,46	1,24	12,31
	L2	09-200	26,61	2,78	0,45	3,3	13,96
	L3	09-201	31,22	3,47	0,45	0,66	14,00
	S9	09-202	12,27	2,03	0,27	0,43	10,80
	BL	09-203	36,58	3,91	0,51	0,88	12,52
	I1	09-204	28,93	3,23	0,55	3,98	12,21
	I2	09-205	28,89	3,54	0,57	1,04	12,76
	I3	09-206	34,32	4,13	0,6	1,3	13,55
	I4	09-207	36,38	4,38	0,65	2,59	13,00
	L4	09-208	29,59	3,52	0,68	4,41	15,60

Tabela 15 - Resultados do poder calorífico das amostras de carvão. Resultados em cal/g.
 Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	Camada	#Lab	Cal/g	Cal/g (d.a.f)
369	S5	09-163	2387	5808
	S6	09-164	2695	5962
	L1	09-165	-	-
	S7	09-166	2365	5840
	L2	09-167	-	-
	S8	09-168	2062	5665
	S9	09-169	2467	6246
	BL	09-170	2888	6224
	I1	09-171	2433	6254
	L3	09-172	788	3550
	I2	09-173	2913	6531
	I3	09-174	-	-
	370	S8	09-075	-
S9		09-076	2333	6123
L1		09-109	-	-
BL		09-077	2881	6236
I1		09-078	2276	5881
I2		09-079	1098	4445
371	S2	09-175	3227	6365
	L1	09-176	-	-
	S3	09-177	2451	6221
	S4	09-178	1690	5541
	S5	09-179	2709	6285
	S6	09-180	-	-
	S7	09-181	2222	5973
	L2	09-182	-	-
	S8	09-183	2189	6166
	S9	09-184	1419	4287
	BL	09-185	3006	6695
	I1	09-186	2669	6558
	I2	09-187	2573	6771
	L3	09-188	-	-
	I3	09-189	2672	6347
I4	09-190	3237	6786	
I5	09-191	3277	6715	
L4	09-192	-	-	
372	S3	09-193	-	-
	S4	09-194	2966	6519
	S5	09-195	2070	6035
	S6	09-196	2987	6197
	S7	09-197	-	-
	L1	09-198	-	-
	S8	09-199	-	-
	L2	09-200	-	-
	L3	09-201	-	-
	S9	09-202	841	3948
	BL	09-203	3221	6600
	I1	09-204	-	-
	I2	09-205	2567	6261
	I3	09-206	3074	6639
I4	09-207	3312	6444	
L4	09-208	-	-	

Tabela 16 - Resultados da difração de raios x das amostras de carvão. Fonte: Dados da Pesquisa

Furo	Camada	#Lab	Caolinita	Quartzo	Ilita	K-Feldspato	Plagioclásio	Pirita	Gipso	Siderita	Esmectita	Calcita	Anidrita
369	S5	09-163	x	x	x	x	x						
	S6	09-164	x	x									
	L1	09-165	x	x	x	x							
	S7	09-166	x	x	x	x							
	L2	09-167	x	x			x	x			x		
	S8	09-168	x	x		x			x				
	S9	09-169	x	x	x		x						
	BL	09-170	x	x	x		x						
	I1	09-171	x	x		x							
	L3	09-172	x	x	x								
	I2	09-173	x	x	x	x							
	I3	09-174	x	x		x							
	370	S8	09-075	x	x	x	x	x	x	x			
S9		09-076	x	x	x		x						
L1		09-109	x	x	x	x	x						
BL		09-077	x	x	x		x	x					
I1		09-078	x	x	x	x							
I2		09-079	x	x	x	x	x						
371	S2	09-175	x	x	x		x		x				
	L1	09-176	x	x	x	x			x		x		
	S3	09-177	x	x		x							
	S4	09-178	x	x			x					x	
	S5	09-179	x	x		x			x				
	S6	09-180	x	x		x			x	x			
	S7	09-181	x	x	x	x	x						
	L2	09-182	x	x		x	x		x				
	S8	09-183	x	x	x	x	x						
	S9	09-184	x	x		x	x						
	BL	09-185	x	x	x								
	I1	09-186	x	x					x				
	I2	09-187	x	x		x					x		
L3	09-188	x	x	x	x	x	x						

	I3	09-189	x	x		x							
	I4	09-190	x	x	x	x			x				
	I5	09-191	x	x	x	x							
	L4	09-192	x	x	x	x			x				
	S3	09-193	x	x	x			x					
	S4	09-194	x	x	x	x		x					
	S5	09-195	x	x				x		x		x	
	S6	09-196	x	x				x	x			x	
	S7	09-197	x	x	x			x		x			
	L1	09-198	x	x	x	x							
	S8	09-199	x	x	x	x		x					
372	L2	09-200	x	x					x				
	L3	09-201	x	x	x								
	S9	09-202	x	x	x	x		x					
	BL	09-203	x	x	x								
	I1	09-204	x	x					x				
	I2	09-205	x	x									x
	I3	09-206	x	x	x	x							
	I4	09-207	x	x	x	x			x				
	L4	09-208	x	x	x				x	x			