



**O CARVÃO DA CAMADA BONITO, JAZIDA SUL CATARINENSE: UMA
CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA,
QUÍMICA E TECNOLÓGICA**

GUSTAVO SIMÃO

Porto Alegre, 2012

GUSTAVO SIMÃO

**O CARVÃO DA CAMADA BONITO, JAZIDA SUL CATARINENSE: UMA
CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA,
QUÍMICA E TECNOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Wolfgang Kalkreuth

Porto Alegre, 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Simão, Gustavo

O Carvão da camada Bonito, jazida Sul Catarinense: uma contribuição para a caracterização petrográfica, química e tecnológica. / Gustavo Simão. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2012.

[92 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2012.

Orientador: Wolfgang Kalkreuth

1. Carvão. 2. Bacia do Paraná. 3. Jazida Sul Catarinense. 4. Camada Bonito. I. Título.

Catálogo na Publicação

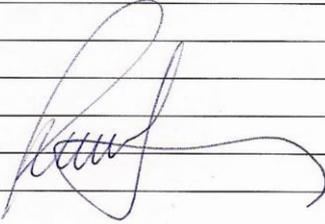
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Alexandre Ribas Semeler CRB 10/1900

GEO-03015 - PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia: O carvão da camada Bonito, jazida sul catarinense: uma contribuição para a caracterização petrográfica, química e tecnológica.	
Autor: Gustavo Simão	
Orientador(es): Wolfgang Kalkreuth	
Nota Final (1 até 10): 9,5	
Examinador: Antonio Pedro Viero	Data: 14/12/2012.

1. O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia? Sim () . Não () . Em parte () .
2. O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia ?
Sim () . Não () . Em parte ()
3. As ilustrações são úteis e adequadas? Sim () . Não () . Em parte ()
4. O manuscrito apresenta estrutura organizada? Sim () . Não () . Em parte ()
5. A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?
Sim () . Não () . Em parte ()
6. Os materiais e métodos são descritos adequadamente? Sim () . Não () . Em parte ()
7. Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente? Sim () . Não () . Em parte ()
8. As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?
Sim () . Não () . Em parte ()
9. As referências são convenientes e usadas adequadamente? Sim () . Não () . Em parte ()
10. O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?
Sim () . Não () . Em parte () .

Comentários:
MONOGRAFIA BEM DESCRITA, BEM ESTRUTURADA E COM INTERPRETAÇÕES DOS DADOS MUITO QUALIFICADAS
INDICAÇÃO PARA BOMAS DE LONDRO.


GEO-03015 - PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia: O carvão da camada Bonito, jazida sul catarinense: uma contribuição para a caracterização petrográfica, química e tecnológica.	
Autor: Gustavo Simão	
Orientador(es): Wolfgang Kalkreuth	
Nota Final (1 até 10): 9,5	
Examinador: Eduardo Osório	Data: 14/12/2012.

1. O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia? Sim (X). Não (). Em parte ().
2. O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia? Sim (X). Não (). Em parte ().
3. As ilustrações são úteis e adequadas? Sim (X). Não (). Em parte ().
4. O manuscrito apresenta estrutura organizada? Sim (X). Não (). Em parte ().
5. A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia? Sim (X). Não (). Em parte ().
6. Os materiais e métodos são descritos adequadamente? Sim (X). Não (). Em parte ().
7. Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente? Sim (X). Não (). Em parte ().
8. As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos? Sim (X). Não (). Em parte ().
9. As referências são convenientes e usadas adequadamente? Sim (X). Não (). Em parte ().
10. O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)? Sim (X). Não (). Em parte ().

Comentários:
Trabalho muito bem escrito. Entretanto os capítulos devem ser melhor apresentados e com títulos.
As pequenas correções sugeridas serão indicadas ao aluno na cópia da monografia.
No geral considero o trabalho muito bom.
Indicada para banca de louvar.

AGRADECIMENTOS

Tenho tanto e tantos a agradecer que fica difícil saber por onde começar. Mas como sempre fui atraído pelo controverso, e dizem que não é devido, começarei agradecendo a deus, seja ele um velhinho de barba e cajado cuidando de nós lá de cima, ou a energia regente do universo, o fato é que sem essa força que põe ordem ao caos, nada, nem eu, nem esse trabalho seriam possíveis.

Gostaria de agradecer a toda minha família, que são como um atlas, sustentando meu mundo sobre suas costas, sem eles, eu nunca teria chegado aqui, em especial aos meus pais, Avelino e Tânia, pelo carinho, paciência, caráter, educação e honestidade que me deram, e principalmente por me apoiarem sempre, não importa o que acontecesse sempre confiaram em mim, aos meus irmãos Rafael e Leonardo, que são os amigos pra vida toda, e a nona Perpétua que sempre esteve me esperando de portas abertas e com café na mesa.

Aos amigos, Garcia, Eliel, Mineiro, Bernardo, Pietro, Fabiola, Gil, Juliana, Augusto, Guilherme, George, Angelis, Luli, Manoel, Marcelo pelo apoio, incentivo, amizade e conversas sobre a vida, o universo e tudo mais.

Ao prof. Kalkreuth, pelo tempo em mim investido, por todo o conhecimento que me passou e por apresentar a esse homem vindo da terra do carvão o fantástico mundo da Coal Petrology.

Aos colegas do Laboratório de Análise de carvão e Rochas Geradoras de Petróleo, Carol, Leandro, Tânia, Priscila, Marleny, Rodrigo colegas do dia a dia no mundo do carvão e que sempre me auxiliaram quando precisei.

Aos amigos e mestres Marcio, Janaina, Eduardo e Luciane, por tudo que me ensinaram e pelas sempre pertinentes conversas sobre carvão mineral.

As Carboníferas, Catarinense, Rio Deserto e Belluno pela autorização da coleta de amostras e pelo apoio logístico durante o campo.

Ao LAPROM, nas pessoas do prof. Sampaio, Gerson Miltzarek e Karime Ferreira, que me apresentaram ao mundo do beneficiamento mineral.

Ao LASID, nas pessoas do prof. Dr. Eduardo Osório e do Ismael Flores, que me auxiliaram em análises indispensáveis nesse trabalho

Ao LABDIFRX na pessoa do Edgar que tirou todas as minhas dúvidas sobre difratogramas com muita paciência.

Ao LCE-UFSCar que foi muito atencioso com meus questionamentos sobre os resultados e metodologias.

A UFRGS pela oportunidade incalculável de acesso ao conhecimento.

“Não sei que impressão eu possa causar ao mundo, mas a mim mesmo, vejo-me como um menino brincando na praia, divertindo-me por encontrar um seixo mais polido ou uma concha mais bonita que o normal, enquanto o grande oceano da verdade permanece desconhecido a minha frente.”

Isaac Newton

RESUMO

Os depósitos de carvão economicamente importantes do Brasil ocorrem na Região Sul (RS,SC,PR), e estão contidos na sucessão de rochas sedimentares da Formação Rio Bonito da Bacia do Paraná, com idade Permiana. A jazida Sul Catarinense contém 10 camadas de carvão, entre elas, a Barro Branco, Bonito e Irapuá são as de maior importância. A Camada Bonito tem uma reserva de 2,3 milhões de toneladas e uma espessura de camada de carvão chegando a 3,5 metros. Seguindo a crescente demanda por energia, a camada Bonito entra em evidência como recurso energético e siderúrgico, por consequência fazendo-se necessário um aumento do conhecimento sobre suas características físicas, químicas e de aplicabilidade tecnológica. As amostras da camada Bonito para este estudo foram coletadas nas minas Bonito I, Cruz de Malta e Lauro Muller. Foram realizados testes de beneficiamento, análises petrográficas, análises imediatas, poder calorífico, difração de raios-X, fluorescência de raios-X, índice de inchamento livre (FSI) e fusibilidade da cinza. A camada apresenta em média teores de cinza de 58 % em peso, matéria volátil livre de cinza (d.a.f) de 38% e um poder calorífico (d.a.f) superior de 7240 cal/g. Quartzo, caulinita e pirita são as fases minerais mais importantes da matéria inorgânica, tendo como elementos mais comuns Si, Fe, K e subordinadamente Al e S. O valor médio da Refletância da Vitrinita obtido foi de 0,77 Rrandom (%), permitindo classificar o carvão como médio rank C média Vitrinita Alta cinza. Para valores livres de matéria mineral, Inertinita é o grupo maceral mais abundante, com um range de 38,1 - 49,3 %, seguido por Vitrinita 21,7 - 46,2 % e Liptinita 10,4 - 29,0 %As amostras apresentaram um FSI de 1 e uma variação de fusibilidade das cinzas de 1210 a 1290 °C, para temperatura de deformação, e de 1420 a 1520 °C, para temperatura de fluidez. No beneficiamento, as amostras apresentaram uma separação orgânico-inorgânico de intermediária à ruim, obtendo-se uma fração nobre com 26 % de cinza para um rendimento de 10 %. A Vitrinita apresenta-se enriquecida na fração de menor densidade, enquanto a Inertinita mantém patamares maiores até densidades intermediárias. O teor de cinzas apresenta um crescimento com o aumento da densidade, comportamento inversamente proporcional aos valores de poder calorífico, matéria volátil e carbono fixo que tem seus mais altos valores nas menores densidades. A camada Bonito sozinha não apresentou frações coqueificável para a metodologia de beneficiamento utilizada neste trabalho, porém pode ser utilizada na formação de misturas com carvões importados. Em contrapartida ela apresenta uma fração de carvão energético com recuperação em torno de 50 % em massa.

Palavras-Chave: Carvão, Bacia do Paraná, Jazida Sul Catarinense, Camada Bonito.

ABSTRACT

Economically important coal deposits occur in Brazil's southern region (RS, SC, PR), and are contained in the sedimentary rocks of the Permian-age Rio Bonito Formation, Paraná Basin. The South Catarinense coalfield contains 10 coal seams, of which the Barro Branco, Bonito and Irapuá seams are the most important. The Bonito seam has a proven reserve of 2.3 million tons of coal and a thickness of up to 3.5 meters. Due to the increasing demand for energy, the Bonito seam has recently been the focus of renewed interest as an energy resource and also been considered for the steel making process. For this reason it is necessary to increase the knowledge about its physical, chemical and technological properties. Samples of the Bonito seam for this study were collected in the Bonito I, Cruz de Malta and Lauro Muller mines. The samples were characterized by petrographic analyses (vitrinite reflectance, macerals), and chemical analyses (proximate analysis, calorific value, X-ray diffraction, X-ray fluorescence). This was followed by tests on technological properties such as the free swelling index (FSI) and fusibility of ash. In addition, the samples were subjected to beneficiation tests. The seam has an average ash yield of 58%, a volatile matter content of 38% (daf) and a Gross calorific value of 7240 cal/g (daf). Quartz, kaolinite and pyrite mineral phases are the most important inorganic constituents, with the most common elements being Si, Fe, K and subordinately S and Al. The average vitrinite reflectance was determined as 0.77 % Rrandom. The Inertinite is the most abundant maceral group, with a range from 38.1 to 49.3%, followed by Vitrinite 21.7 to 46.2% and Liptinite 10.4 to 29.0%. Based on vitrinite reflectance level, vitrinite content and ash yield the Bonito seam is classified as medium rank C coal, characterized by a medium vitrinite content and high ash content. The tests on technological properties showed an FSI of 1 and a variation of the fusibility of the ash from 1210 to 1290 °C for the initial deformation temperature, and from 1420 to 1520 °C to flow temperature. In the beneficiation process, the samples showed an average to bad separation of the organic-inorganic components, yielding a fraction noble with 26% ash with a yield of 10%. The Vitrinite component was enriched at lower density, while enriching the inertinite levels at intermediate densities. The ash yield was found, as expected, to increase with increasing density, a behavior inversely proportional to the calorific values, volatile matter and fixed carbon that has their highest values at lower densities. The results of this study suggests that the Bonito seam on its own has no properties required for coke making, but may be used in coal blends with higher quality imported coals. This aspect will be studied in future research projects. At current time, the Bonito seam presents a thermal coal with recovery of around 50% by mass.

Keywords: Coal, Paraná Basin, South Santa Catarina coalfield, Bonito seam.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Localização das principais jazidas de carvão da bacia do Paraná, com destaque em retângulo vermelho para a jazida sul catarinense. Modificado de Süffert (1997) e Aboarrage e Lopes (1986).....19
- Figura 2: Evolução dos estágios de carbonificação. (modificado de KGS - Kentucky Geological Survey) Disponível em:
http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm Acesso em: 19 jun. 2012)21
- Figura 3: Estágios da matéria orgânica durante o processo de carbonificação. (modificado de KGS Disponível em:
http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm Acesso em: 19 jun. 2012)23
- Figura 4: Macerais e suas origens vegetais (modificado de KGS, Disponível em:
http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm Acesso em: 19 jun. 2012)26
- Figura 5: Densidade das partículas compostas em proporções diferentes por: carvão, argila e pirita. (Ruiz 2009).27
- Figura 6: Relação entre macerais e densidade, modificada de Hower (1994).....28
- Figura 7: À esquerda a localização dos estados de Santa Catarina e Rio Grande Do Sul em escala continental e a direita as principais jazidas de carvão da bacia do Paraná, com destaque em vermelho para a Bacia Carbonífera de Santa Catarina.32
- Figura 8: À esquerda, mapa da Jazida Sul Catarinense com destaque para a área de estudo demarcada por um retângulo vermelho, e a direita área de estudo com os pontos de coleta do trabalho. (modificado de Süffert 1997 e Folha de Criciúma – SH.22-X-B, CPRM,2000).33
- Figura 9: Mapa Geológico da bacia do Paraná (Milani, 2000).....35
- Figura 10: Perfil estratigráfico representativo do Sul de Santa Catarina, mostrando associação de fácies, sistema deposicional e tratos de sistema, sequências de terceira ordem. A camada Bonito formou-se no trato de sistema de mar alto da segunda sequência, (Kalkreuth *et al.*, 2010).37

Figura 11: Fotos A, B e C exemplificando blocos coletadas, D demonstrando a coleta do topo da camada, onde foi necessária a utilização de escadas devido a altura da camada ultrapassar 3 metros, E mostrando a coleta manual dos blocos com talhadeira no pilar da mina e a direita desenho esquemático do método de coleta em canal.	39
Figura 12: Fotos A e B exemplificando o bandamento entre os litotipos brilho e fosco existente no carvão, com detalhe para o nódulo de pirita centímetro na foto A, abaixo classificação simplificada de Diessel (1965) e a direita exemplo da descrição de um dos pontos do trabalho.....	40
Figura 13: Fluxograma de preparação de amostras, para as análises previstas no estudo.....	41
Figura 14: Exemplo de procedimento sequencial de análise densimétrica apresentado por Sampaio (2005) valores em g/cm ³	42
Figura 15: Partes do cilindro e bomba calorimétrica com o cilindro acoplado (modificado de IKA – WERKE, 2007).....	46
Figura 16: Incidência de um feixe de raios-x sobre um mineral (Skoog, 2002).	47
Figura 17: Escala completa de perfis padrão e seus números de índice correspondentes (Modificado ASTM D720-2010).	49
Figura 18: Estágios de deformação dos testes de fusibilidade segundo o ASTM D1857-04 (Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash).	50
Figura 19: Microscópio Leica DM6000 M utilizado nas análises petrográficas no LACAPETRO-Laboratório de carvão e rochas geradoras de petróleo.	51
Figura 20: Classificação dos carvões (ISO 11760-2005).	53
Figura 21: Litotipos do carvão.....	55
Figura 22: Perfis de litotipos do carvões para nos pontos de estudo.....	56
Figura 23: Curvas de flutuados e afundados da Camada Bonito.	57
Figura 24: Curvas densimétricas e de NGM.	58
Figura 25: Resultados de análise imediata	59

Figura 26: Resultados de análise imediata	60
Figura 27: Gráfico de poder calorífico superior versus densidade.....	61
Figura 28: Diagrama de qualificação do <i>rank</i> de Taylor <i>et al.</i> , (1998) com intervalo de valores de poder calorífico para os pontos 1, 2 e 3 plotado.	61
Figura 29: Temperatura versus estágios de fusibilidade.	67
Figura 30: Diagrama de Taylor <i>et al.</i> (1998) utilizado para indicação do grau de carbonificação das amostras de carvão. Destaque em quadro preto para o intervalo de reflectância observado na camada Bonito.	68
Figura 31: Diagrama ternário mostrando a composição de grupos de macerais (sem matéria mineral) das amostras brutas da camada Bonito (vol.%).	69
Figura 32: Gráfico de porcentagem de vitrinita versus densidade.....	70
Figura 33: Gráfico de porcentagem de inertinita versus densidade.....	71
Figura 34: Gráfico de porcentagem de liptinita versus densidade	72
Figura 35: Gráfico de porcentagem de matéria mineral versus densidade.....	72
Figura 36: Classificação ISO 11760 para as amostras dos pontos do trabalho.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos litotipos, (Stopes 1919) e (Diesel, 1965).	24
Quadro 2: Classificação dos grupos macerais segundo ISO-7404/3, 1984..	54
Quadro 3: Resultados de difração de raios-x em porcentagem (%).	62
Quadro 4: Concentração de elementos maiores em porcentagem na base do carvão.	64
Quadro 5: Concentração de elementos traços em parte por milhão (ppm).	65
Quadro 6: Índice de inchamento livre.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

B - Bright

BB – Banded Bright

BC - Banded Coal

BD - Banded Dull

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

D - Dull

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX - Difração de Raios-X

Fm. - Formação

FSI - Free Swelling Index

FT - Flow Temperature

HT - Hemisphere Temperature

ICCP - Internacional Committee Coal Petrology

ISO - International Organization for Standardization

IT - initial deformation temperature

KSG - Kentucky Geological Survey

LABDIFRX - Laboratório de Drifratometria de Raios-X

LACAPETRO - Laboratório de Análises de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo.

LAPROM - Laboratório de Processamento Mineral

LASID - Laboratório de Siderurgia

LCE – Laboratório de Caracterização Elementar

M.M – Matéria Mineral

NGM - Near Gravity Material

PCS – Poder Calorífico Superior

ST - Sphere Temperature

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.1 INTRODUÇÃO.....	17
1.2 OBJETIVOS	20
1.3 ESTADO DA ARTE.....	21
1.3.1 Definição De Carvão	21
1.3.2 Formação do Carvão	22
1.3.3 Constituintes macroscópicos do Carvão	23
1.3.4 Constituintes microscópicos do Carvão	25
1.3.6 Carvão Metalúrgico.....	28
1.3.7 Carvão energético	29
1.3.8 Principais trabalhos relacionados ao carvão da camada Bonito..	30
CAPÍTULO 2: CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
2.1 LOCALIZAÇÃO.....	32
2.2 GEOLOGIA.....	34
CAPÍTULO 3: METODOLOGIA	38
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3.2 ETAPA DE CAMPO	38
3.2.1. Amostragem.....	38
3.2.2. Descrição de Litotipos	39
3.3 PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS.....	40
3.4 BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO – AFUNDA-FLUTUA.....	41
3.5 ANÁLISE IMEDIATA.....	43
3.5.1 Percentual de Umidade.....	43
3.5.2 Percentual de Cinza	43

3.5.3	Percentual de Matéria Volátil	44
3.5.4	Percentual de Carbono Fixo.....	45
3.6	PODER CALORÍFICO SUPERIOR.....	45
3.7	DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X.....	47
3.8	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	48
3.9	ÍNDICE DE INCHAMENTO LIVRE –FSI (Free Swelling Index)	48
3.10	FUSIBILIDADE DAS CINZAS.....	49
3.11	ANÁLISES PETROGRÁFICAS	51
3.11.1	Preparação das Amostras para Análise Microscópica	51
3.11.2	Reflectância da Vitrinita Rrandom (%).....	52
3.11.3	Análise dos Macerais	53
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES		55
4.1	Descrição de Campo – Litotipos do carvão	55
4.2	Beneficiamento Gravimétrico.....	57
4.3	Análise Imediata (% em peso).....	59
4.4	Poder Calorífico	60
4.5	Difração de Raios-X.....	62
4.6	Fluorescência de Raios-X.....	63
4.6.1.	Elementos Maiores.....	63
4.6.2.	Elementos Traços	64
4.7	Índice de Inchamento Livre FSI	66
4.8	Fusibilidade Da Cinza	66
4.9	Análises Petrográficas	67
4.9.1.	Reflectância da Vitrinita em amostras da camada Bonito	67
4.9.2.	Análise de Macerais	69
4.9.3.	Classificação	73
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		74

Apêndice A	81
Apêndice B	82
Apêndice C	83
Apêndice D	85
Apêndice E	86
Apêndice F	89

CAPÍTULO 1: CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil depósitos de carvão economicamente importantes ocorrem na região sul, contidos na sucessão de rochas sedimentares da Formação Rio Bonito, de idade Permiana inferior da Bacia do Paraná. A jazida sul catarinense é o depósito de carvão brasileiro mais intensamente explorado nas últimas décadas. A jazida contém 10 camadas de carvão, das quais as camadas Barro Branco e Bonito tem maior importância econômica devido a sua grande espessura e caráter regional de ocorrência.

A indústria siderúrgica é a principal usuária de carvão no Brasil, com um consumo anual de 13 Milhões de toneladas de carvões totalmente importados, no valor de mais de US\$ 700 milhões (DNPM, 2000). Atualmente, o setor siderúrgico mundial está atravessando uma crise no abastecimento de carvão e coque, em vista disso, novas fontes de abastecimento de carvão estão sendo prospectadas e ativadas. O alto custo do carvão no mercado internacional e a importância estratégica de dispor de fontes fornecedoras de carvão tem estimulado o setor siderúrgico a buscar novamente no carvão nacional uma alternativa para o suprimento dessa matéria-prima.

O carvão na siderurgia convencional pode ser utilizado de duas maneiras. Como matéria-prima para coqueificação e para a injeção nas ventaneiras do alto-forno para substituir parte do coque utilizado. A forma mais nobre de uso do carvão é para coqueificação, pois o coque representa a matéria-prima mais dispendiosa na fabricação do aço. Somente 15 % das

reservas mundiais são de carvão com as características exigidas para fabricação de coque. Isso confere um alto valor a esse tipo de carvão (Osório *et al.*, 2008).

A escassez de carvões coqueificáveis faz com que na maior parte do mundo, inclusive no Brasil, se utilize uma mistura de vários tipos de carvões, cujo somatório de suas propriedades possibilita produzir um coque adequado. A siderurgia brasileira costuma empregar em suas misturas cerca de sete a dez carvões diferentes, classificados como baixo, médio e alto volátil, que apresentam distintas propriedades coqueificantes. Fatores econômicos são sempre levados em consideração (Osório *et al.*, 2008).

O atual ciclo de crescimento econômico brasileiro e sua respectiva expansão industrial tem gerado uma demanda cada vez maior por energia, em contrapartida há uma disponibilidade cada vez menor de áreas para o aproveitamento hídrico, e as energias alternativas ainda se mostram inviáveis em grande escala devido há seu alto custo e dependência de fatores climáticos. Por consequência é eminente à utilização dos recursos energéticos fósseis brasileiros, em especial o carvão, o qual é subutilizado como combustível para a siderurgia e termoeletricidade.

O carvão, na escala mundial e nacional, comparativamente a outras fontes, é o combustível mais abundante e acessível devido ao baixo custo, menor risco de variações de preço e de interrupção de suprimento, além de ganhos de eficiência nas usinas termelétricas com o uso de tecnologias limpas.

Os recursos identificados de carvão mineral no Brasil ultrapassam 32 bilhões de toneladas e estão localizados na região coberta por rochas da Bacia do Paraná, no Rio Grande do Sul e Santa Catarina e, subsidiariamente, no Paraná e São Paulo (Süffert 1997) (Figura 1).

A Bacia Carbonífera de Santa Catarina é uma das jazidas mais importantes, pois encerra as maiores reservas de carvão coqueificável economicamente exploráveis do território nacional (Bertol *et al.*, 1987).

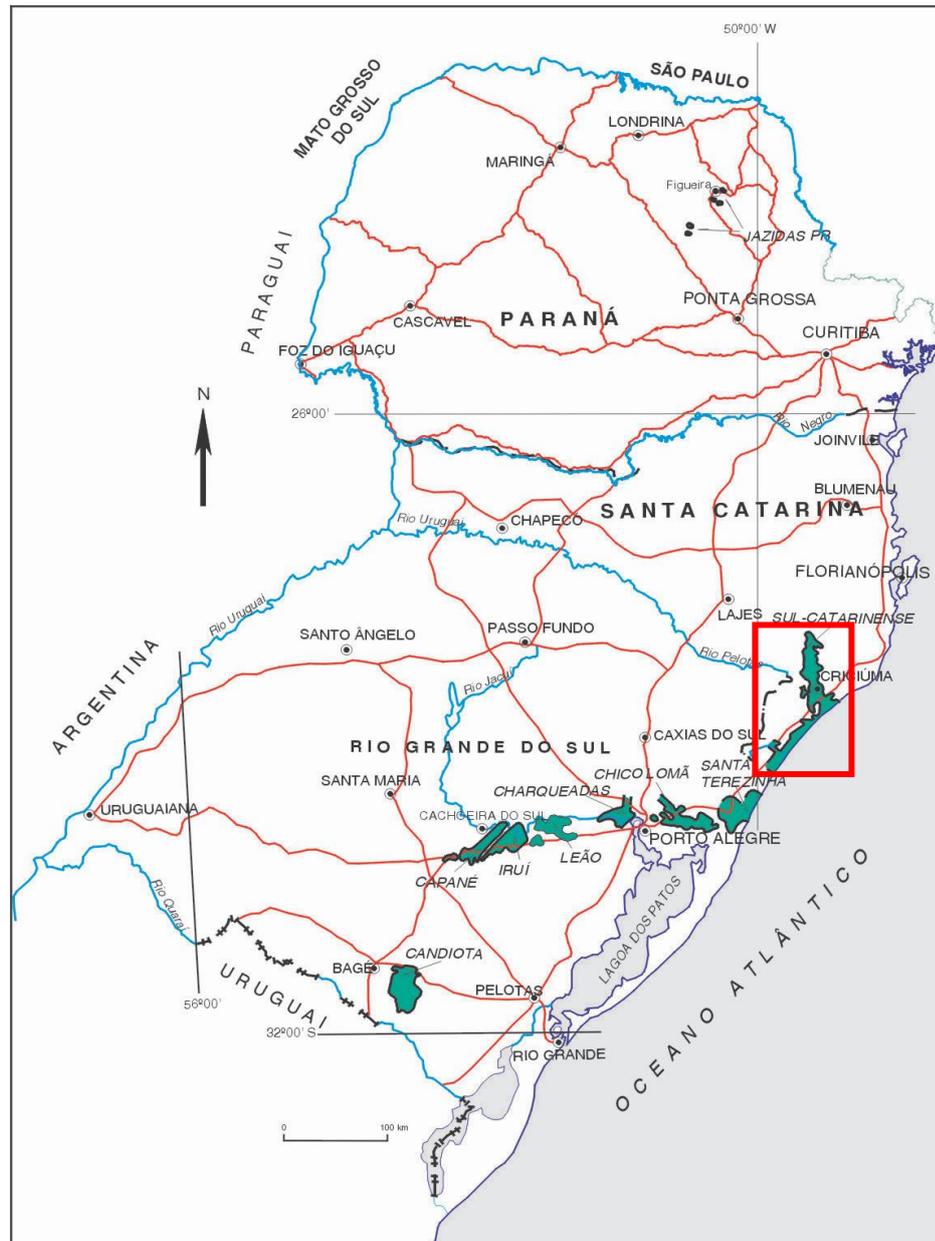


Figura 1: Localização das principais jazidas de carvão da bacia do Paraná, com destaque em retângulo vermelho para a jazida sul catarinense. Modificado de Süffert (1997) e Aboarrage e Lopes (1986).

A camada Barro Branco que contém carvão metalúrgico foi historicamente a principal camada minerada na região, mas com seus recursos em vias de exaustão, a Camada Bonito torna-se alvo de grande interesse exploratório, visto que a camada tem uma reserva de 2,3 milhões de toneladas com uma espessura de carvão chegando a 3,5 metros.

Seguindo essa demanda por carvão na região, a camada Bonito entra em evidência como recurso energético, necessitando assim de um melhor conhecimento sobre suas características físicas, químicas e de aplicabilidade tecnológica. As amostras para o estudo foram coletadas nas minas em atividade na camada Bonito.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a realização de um estudo integrado, abrangendo os aspectos geológicos, propriedades químicas, propriedades petrográficas, características de beneficiamento, propriedades siderúrgicas, de amostras de carvão da camada Bonito, coletadas em minas em operação de lavra, visando avaliar o seu potencial para utilização industrial como recurso energético e coqueificável, na siderurgia e termoeletricidade.

1.3 ESTADO DA ARTE

1.3.1 Definição De Carvão

Carvão é uma rocha sedimentar carbonosa formada por remanescentes de plantas com um conteúdo mineral associado correspondendo a um valor menor ou igual a 50% de cinza de massa em base seca. (ISO 2005).

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

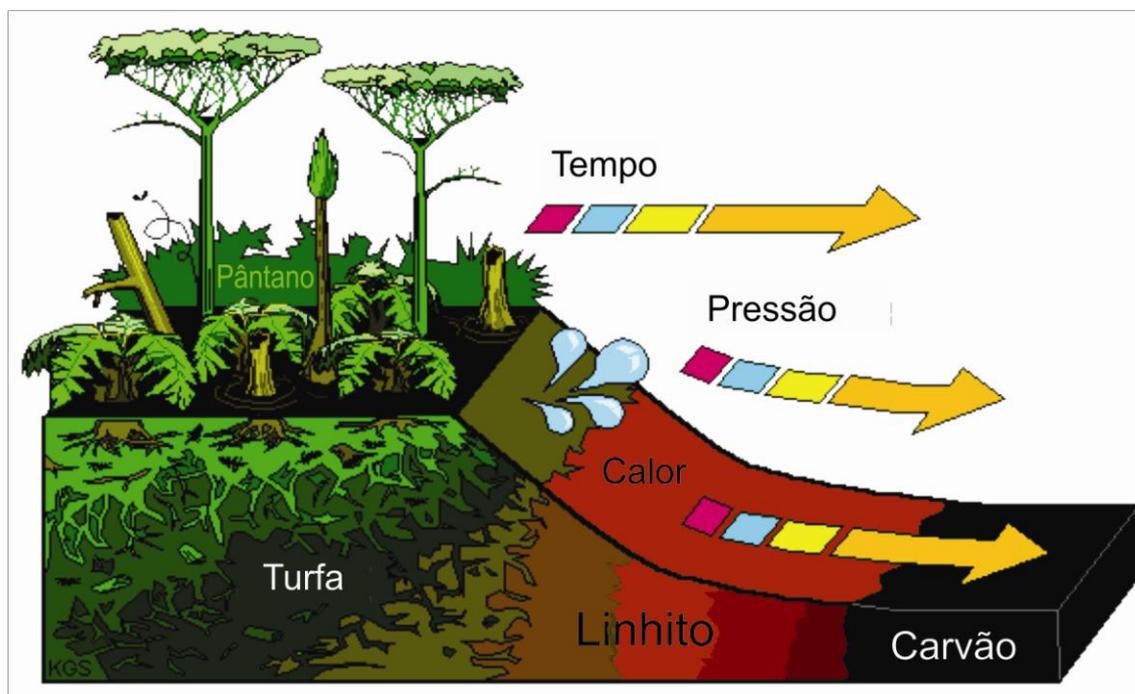


Figura 2: Evolução dos estágios de carbonificação. (modificado de KGS - Kentucky Geological Survey) Disponível em: http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm Acesso em: 19 jun. 2012)

1.3.2 Formação do Carvão

Existem dois tipos de carvão diferenciáveis devido à origem de sua matéria orgânica: carvões sapropélicos e carvões húmicos.

Carvões sapropélicos são caracterizados por enriquecimento em esporos e algas. Quando os carvões são ricos em esporos, chama-se á eles de carvão do tipo *channel* e quando são ricos em algas, do tipo *boghead*.

Carvões húmicos são muito mais abundantes que carvões sapropélicos, correspondem a 90 % de todos os depósitos conhecidos. São formados a partir de resíduos de plantas terrestres que se acumularam na forma de turfeiras em áreas alagadas (pântanos). O acúmulo de matéria orgânica e sua subsequente preservação dentro da turfeira só são possíveis quando a acumulação acontece abaixo do nível freático, que protege a matéria orgânica acumulada da ação do oxigênio do ar promovendo a preservação da mesma. A turfa sofre inicialmente uma alteração bioquímica por ação bacteriana, sendo parcialmente decomposta. Seguindo com o aumento do soterramento, gera-se um incremento progressivo na temperatura e na pressão, que provocam alterações geoquímicas no sistema, esse processo é conhecido como carbonificação (Suarez-Ruiz, 2009).

O processo de carbonificação pode ser descrito como um enriquecimento relativo de carbono fixo em detrimento a umidade e matéria volátil, que são expulsos sob a forma de água, dióxido de carbono e metano. A liberação desses componentes provoca um aumento no conteúdo de carbono na rocha, e uma redução no conteúdo de hidrogênio e oxigênio. A carbonificação desenvolve-se sob condições de temperatura e pressão que são consideradas equivalentes aos estágios diagenéticos e epimetamórficos das rochas sedimentares inorgânicas (Suarez-Ruiz, 2009). Essa transformação gradual da matéria vegetal em carvão, dá origem aos diferentes estágios de carbonificação; turfa, linhito, carvão sub-betuminoso, carvão betuminoso, antracito e grafite (Figura 3).

Hagemann e Hollerbach (1979) estimam que uma camada de material vegetal de 2 m acumulada em ambiente de pântano, fica reduzida a 30 cm no estágio de turfa e a 10 cm no estágio de carvão.



Figura 3: Estágios da matéria orgânica durante o processo de carbonificação. (modificado de KGS Disponível em: http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm Acesso em: 19 jun. 2012)

O "*rank*" é a medida do grau de maturidade ou metamorfismo a que o carvão foi submetido durante a sua evolução na série natural de linhitos a antracitos. Os principais parâmetros necessários para se determinar o "*rank*" de um carvão envolvem: umidade de equilíbrio, poder calorífico, matéria volátil, carbono fixo total, teor de hidrogênio e refletância da vitrinita.

O avanço da carbonificação leva à mudanças químicas, bioquímicas e físicas como: decréscimo no conteúdo de água e porosidade; aumento da densidade; condensação de moléculas orgânicas; polimerização; Aromatização; perda de grupos funcionais.

1.3.3 Constituintes macroscópicos do Carvão

Segundo o Comitê Internacional de Petrologia Orgânica e do Carvão – ICCP (1971), litotipos são as bandas identificáveis macroscopicamente no carvão, sobretudo pelo brilho (STACH, 1982), por definição com espessura

mínima de 1 cm, as quais podem refletir o tipo de contribuição da matéria orgânica e inorgânica, bem como as variações químicas e físicas sofridas na época da acumulação em turfeiras (Kalkreuth e Leckie, 1989). MARCHIONI E KALKREUTH, 1991) demonstraram que em geral o conteúdo de vitrinita tendem à diminuir e os conteúdos de inertinita, liptinita e matéria mineral tendem à aumentar com a diminuição dos componentes brilhante. No trabalho, foi adotada a classificação (quadro 1) contida em Diessel (1965).

Marchioni (1980) reportou que os carvões foscos estudados por ele na Austrália tinham o conteúdo de matéria mineral e inertodetrinita relativamente alto. Com isso concluiu que este litotipo fosco era formado durante períodos de elevado nível da água e circulação dentro da turfeira. Litotipos brilhoso, bandado brilhoso, bandado e uma porção de foscos bandados são interpretados como sendo formados numa floresta telmática (pântano -condições úmidas). Carvões foscos bandados são formados em uma ampla gama de ambientes.

ICCP-Stopes	Diessel (1965)	Descrição
Vitrênio	Brilhante (B)	Brilho vítreo a subvitreo, fratura conchoidal; frágil; até 10% de bandas de carvão fosco.
Clarênio	Bandado Brilhante (BB)	Brilhante, com bandas de carvão fosco que podem variar entre 10-40 %.
	Carvão Bandado (BC)	Bandas de carvão brilhante e fosco que variam entre 40 e 60 %
Durênio	Carvão Fosco Bandado (BD)	Predomínio de carvão fosco com bandas de carvão brilhante em proporções entre 10 a 40 %.
	Carvão Fosco (D)	Fosco e não fraturado, podendo conter até 10 % de carvão brilhante.
Fusênio	Carvão Fibroso (F)	Friável

Quadro 1: Classificação dos litotipos,(Stopes 1919) e (Diesel, 1965).

1.3.4 Constituintes microscópicos do Carvão

O carvão é composto, microscopicamente, por uma mistura complexa de componentes orgânicos chamados macerais e de matéria inorgânica. Os macerais são remanescentes de plantas carbonificadas, que apresentam forma e/ou estrutura preservada no estágio do carvão betuminoso (grau de evolução térmica) ou ainda, produtos da degradação, no qual a origem vegetal não pode mais ser reconhecida (ICCP, 1971).

O termo maceral foi utilizado pela primeira vez por Stopes (1919), que propôs chamar as unidades orgânicas que compõem a massa dos carvões de macerais, em analogia ao termo mineral, utilizado para nomear os componentes inorgânicos das rochas.

A essência da abordagem petrográfica para o estudo da composição do carvão é a idéia de que cada um desses componentes tem diferentes propriedades físicas e químicas. A formação dos macerais depende principalmente da composição textural da vegetação e do ambiente sedimentar, sendo o processo de carbonificação bioquimicamente influenciado pelo regime de água e o clima.

Os macerais são identificados através da sua morfologia e das propriedades óticas, embora estas variem não somente conforme o grau de maturação alcançada, mas também dentro de um mesmo grau de carbonificação, devido à heterogeneidade química da matéria vegetal original. Com o aumento do *rank*, as características que diferenciam os diversos macerais tendem a se atenuar, de maneira que nos antracitos a sua identificação torna-se difícil.

Os macerais são divididos em três grupos, que tem origens distintas: vitrinita, liptinita e inertinita (figura 4).

A vitrinita é o produto da carbonificação de substâncias húmicas, os quais são essencialmente originados de lignina de paredes celulares. A liptinita é originada de remanescentes de plantas relativamente ricas em hidrogênio, tais como esporopolenina, resinas, ceras e graxas. A inertinita é

derivada das mesmas substâncias que formam a vitrinita, mas submetidas a um processo de oxidação antes da deposição em ambiente pantanoso, esse maceral é relativamente inerte a queima. (ICCP, 1971).

O conteúdo mineral do carvão é a fração inorgânica não combustível; ele é constituído de minerais detríticos ou autigênicos introduzidos no carvão na primeira ou segunda fase de carbonificação.



Figura 4: Macerais e suas origens vegetais (modificado de KGS, Disponível em: http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm Acesso em: 19 jun. 2012)

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; principalmente quartzo, carbonato, ferro e minerais de argila, com uma suíte 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 da matéria orgânica, ou durante a carbonificação. Minerais precipitados podem ser disseminados através da turfeira ou se distribuir como agregados, visto que fluídos ricos em soluções minerais estão presentes durante os últimos estágios da carbonificação e tendem a precipitar minerais em qualquer espaço aberto dentro do carvão. Os produtos comuns da mineralização são os minerais de cálcio e ferro, tais como calcita, ankerita, siderita e pirita e minerais de sílica na forma de quartzo. O enxofre ocorre em quase todos os carvões, estando presente na fração orgânica do carvão e

também na fração inorgânica como pirita. A pirita pode estar presente como um mineral detrítico primário ou como autigênico (pirita secundária) resultante da redução do enxofre em águas marinhas. Existe uma correlação forte entre carvões com alto conteúdo de enxofre e ambientes deposicionais marinhos.

1.3.5 Densidade dos constituintes do carvão

A matéria carbonosa apresenta densidade relativa entre 1,20 e 1,7 g/cm³, dependendo do *rank* e umidade, enquanto a matéria mineral que a acompanha apresenta, geralmente, densidade relativa entre 2,60 e 2,7g/cm³. De acordo com McClung e Geer (1979), eventualmente, a presença de pirita com densidade 5,0 g/cm³ aumenta este valor. A (figura Figura 55) a seguir ilustra a variação de densidades de partículas compostas de: carvão/ rocha sedimentar/pirita, em proporções volumétricas.

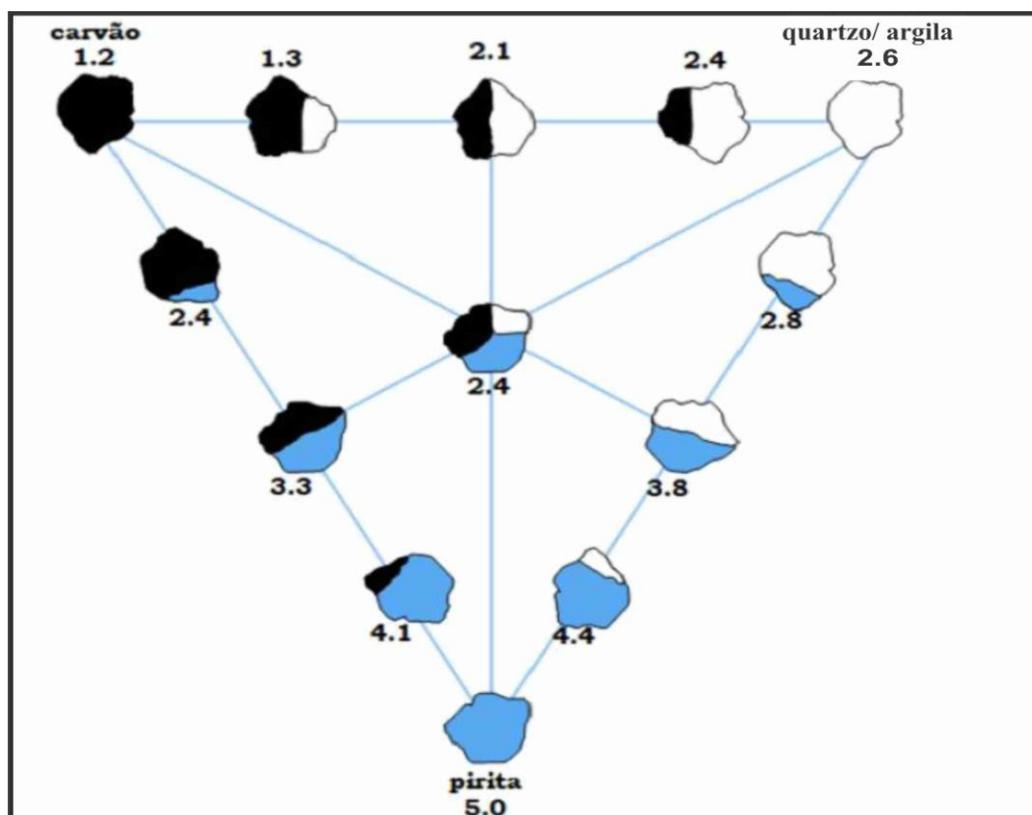


Figura 5: Densidade das partículas compostas em proporções diferentes por: carvão, argila e pirita. (Ruiz 2009).

Segundo Taulbee (1989) a densidade dos macerais fica em torno de; liptinita 1,0-1,25 g/cm³, vitrinita 1,28-1,33 g/cm³ e inertinita 1,34-1,45 g/cm³ (figura 6).

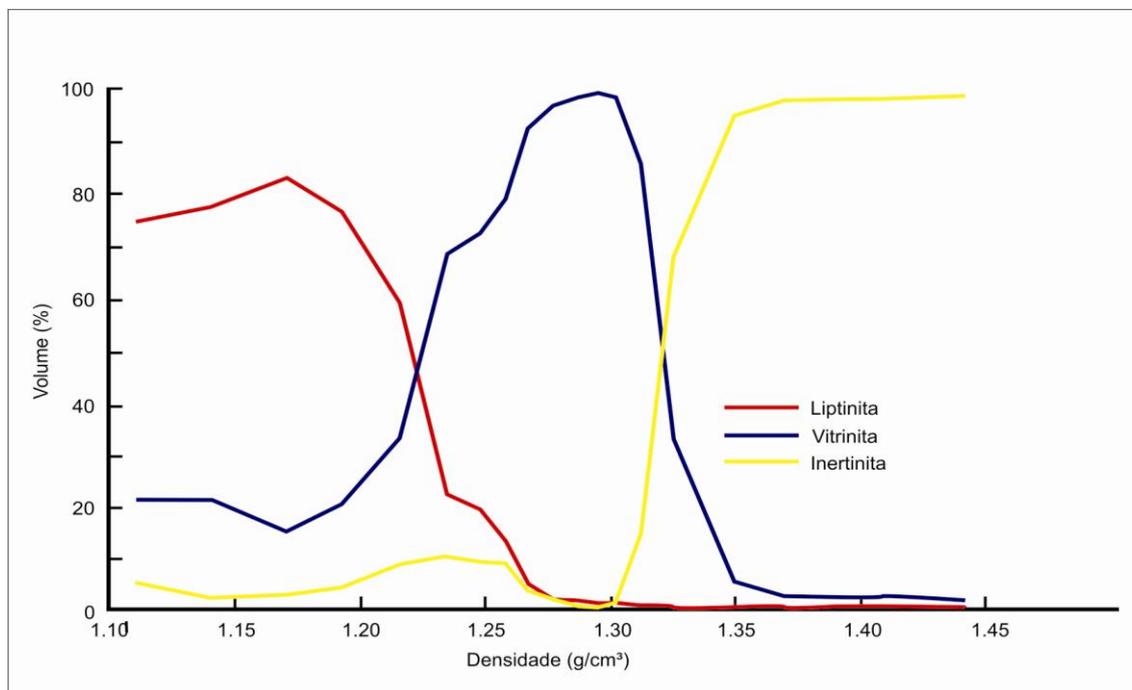


Figura 6: Relação entre macerais e densidade, modificada de Hower(1994).

1.3.6 Carvão Metalúrgico

Carvão metalúrgico é destinado à fabricação do coque usado na siderurgia, cuja obtenção se dá a partir da coqueificação, que é o fenômeno sofrido pelo carvão quando submetido a temperaturas elevadas, na ausência de O₂(pirólise). A coqueificação do carvão libera gases, resultando no aparecimento de um resíduo sólido, poroso e infusível chamado coque. No processo de coqueificação o carvão amolece, dilata e solidifica-se quando esfria, sofrendo ainda, uma perda de peso, aumento na sua densidade nas paredes do coque e aumento de porosidade. Coque é de cor cinzenta, duro e poroso, e como combustível não produz fumaça. Coque ocorre ocasionalmente na natureza, porém é, em geral, manufaturado.

Segundo (Osório *et al.*, 2008), os fatores que norteiam a caracterização de um carvão metalúrgico estão diretamente relacionados com a qualidade do coque, o que, por sua vez, é função dos parâmetros de processo dos altos-fornos. O coque, para sua utilização na redução de minério de ferro, via alto-forno, deve ter determinadas características que são provenientes do carvão de origem. Em vista disso, a avaliação de um carvão coqueificantes é constituída de ensaios analíticos de caracterização física, petrográfica, química e de testes de laboratório (propriedades plásticas) que tentam simular condições da prática industrial, baseados no processo de fabricação do coque ou nas características exigidas para seu emprego no alto-forno.

Os macerais considerados reativos são o grupo da Vitritina, o grupo da Liptinita e uma parte dos constituintes do grupo da inertinita (1/3 semifusinita) e os macerais considerados inertes são os macerais do grupo da Inertinita (2/3 semifusinita, fusinita, micrinita, inertodetrinita, esclerotinita) e a matéria mineral.

Dentro da siderurgia, o carvão também pode ser utilizado para injeção nas ventaneiras do alto-forno como carvão pulverizado. Nesse método pode-se substituir parte do coque necessário para a produção do ferro-gusa, por carvão energético de menor custo. O carvão para este fim não deve ter características aglutinantes, mas deve ter restrições químicas (cinzas, enxofre, álcalis) similares ao do carvão para coqueificação.

1.3.7 Carvão energético

O carvão energético é um combustível fóssil, usado principalmente na geração de eletricidade (em termelétrica), a partir da energia liberada (poder calorífico) contido neste mineral, após sua combustão. Quando o carvão é usado para geração de eletricidade ele é geralmente pulverizado, e em seguida queimado em um forno com uma caldeira acoplada. O calor do forno converte a água da caldeira do estado líquido para o estado vapor. A

pressão desse vapor é então usado para girar turbinas que transferem energia mecânica para os geradores, que convertem a energia potencial mecânica em energia elétrica.

Os fatores que norteiam a caracterização de um carvão energético são principalmente o teor de cinzas, o poder calorífico, a fusibilidade da cinza e o teor de enxofre em termos de análises rotineiras.

1.3.8 Principais trabalhos relacionados ao carvão da camada Bonito

White (1908) foi o primeiro a falar do carvão da camada Bonito. Segundo o autor, “Este leito de carvão recebeu a sua denominação do rio do mesmo nome, ao longo de cujo curso foi explorado na vizinhança de Minas, em Santa Catharina.”

Krebs (1983) afirmou que a região entre as localidades de Treviso e Lauro Muller apresenta as maiores espessuras de camada total, com valores médios de 2,77 e 2,34 metros para a camada Bonito. A camada Bonito foi depositada sobre uma planície de fácies marinha regressiva e também parece ter sofrido influência de águas salobras, e por consequência os valores de enxofre mostram-se altos.

Aboarrage (1986) afirmou que “A gênese das turfeiras não corresponde às mesmas condições paleoambientais ao longo de toda a borda leste da bacia. No Rio Grande do Sul e sul de Santa Catarina predominam pântanos protegidos por sistemas de cordões litorâneos. Onde a posição segundo a classificação do ASTM varia de “Betuminoso de alto volátil C” até “A”, localmente ocorrem semiantracitos associados a intrusões de diabásio.”

Redivo (2002), trabalhando na área de Criciúma estudou os carvões da camada Bonito para o uso termoelétrico e por meio de análises: imediata, petrográfica, ensaios de lavabilidade obteve como resultado o produto

carvão energético 4500 Kcal com um rendimento de 43,6 % em massa para a camada.

Corrêa da Silva (2004) afirmou que os carvões brasileiros têm características que são indicativas de uma origem límnico-telmática, onde o material acumulado é constituído por pteridófitas e plantas herbáceas (*Glossopteris* e *Gangamopteris*) acumuladas depois de algum transporte, resultando em camadas de carvão hipoautóctones ricas em inertinita.

Kalkreuth e Holz (2010) estudaram as camadas da Formação Rio Bonito, utilizando-se de estratigrafia de sequências, petrologia orgânica e análises químicas, caracterizando a camada Bonito como depositada em um ambiente barreira-estuarino no trato de sistema de mar alto, um *rank* de betuminoso alto á médio volátil com reflectância da vitrinita variando de (0,82-1,48 % Rrandom), com o grupo maceral mais abundante sendo a vitrinita (27-52%), teores de cinza variando de (56-61%), tendo como fração inorgânica dominante SiO₂ e Al₂O₃. No mesmo trabalho os autores classificaram a camada Bonito como folhelho carbonoso com o litotipo durênio (*banded dull*) como dominante.

Garavaglia (2011) ao fazer uma avaliação tecnológica e petrográfica para o uso do carvão da camada bonito para geração termoelétrica e tecnologias limpas obteve um *rank* de betuminoso alto volátil com reflectância da vitrinita variando de (0,67-0,85 % Rrandom), poder calorífico superior de (2614-3106 kcal), teor de cinzas variando entre 60-64% e enxofre em torno de 4%. No mesmo trabalho o carvão foi caracterizado como de alto índice de moabilidade, de baixo índice de inchamento e com temperatura de fusão das cinzas inferior ao utilizados nas caldeiras utilizadas nas termoelétricas brasileiras.

Simão (2012) ao analisar amostras beneficiadas das camadas Barro Branco e Bonito observou que dentre os grupos macerais, abaixo da densidade 1,50 g/cm³ há uma predominância de vitrinita, e acima desse intervalo a inertinita é o maceral mais abundante.

CAPÍTULO 2: CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 LOCALIZAÇÃO

A Jazida Sul Catarinense esta localizada na margem atlântica do continente Sul-americano, no flanco sudeste do estado de Santa Catarina, que é um dos estados meridionais do território brasileiro (figura 7).

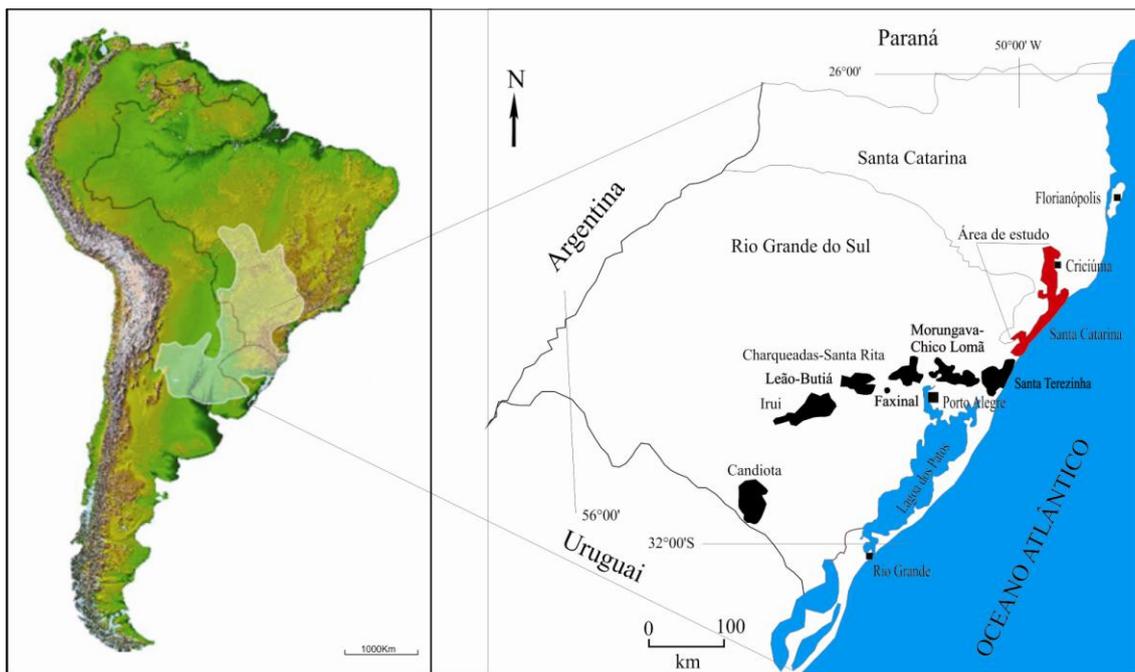


Figura 7: À esquerda a localização dos estados de Santa Catarina e Rio Grande Do Sul em escala continental e a direita as principais jazidas de carvão da bacia do Paraná, com destaque em vermelho para a Bacia Carbonífera de Santa Catarina.

A Jazida Sul Catarinense estendendo-se desde o sul de Araranguá até Lauro Müller, numa faixa com direção norte-sul com aproximadamente 100 km de comprimento e uma largura média de 20 km no sentido leste-oeste, tendo a demarcação de seu contorno limitada pelo oceano atlântico e pela escarpa da serra geral. Em planta, possui a forma alongada formando um arco cuja convexidade aponta para leste (figura 8).

A área de estudo compreende a porção norte da Jazida sul catarinense, nas proximidades dos municípios de Lauro Muller e Treviso. A amostragem realizou-se em três pontos dentro dessa área (figura 8). Todos os pontos da coleta foram nas dependências de minas de subsolo em atividade, as amostras foram coletas sempre próximas à frente de lavra em operação, coletando-se assim, carvão recentemente exposto.

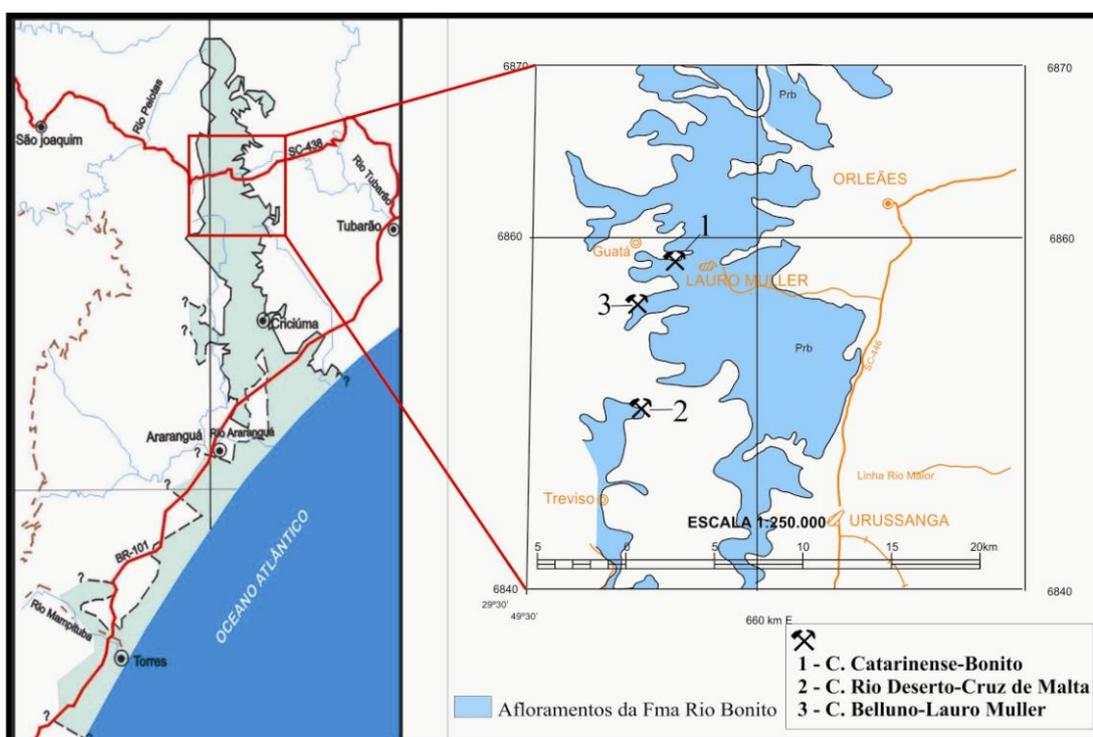


Figura 8: À esquerda, mapa da Jazida Sul Catarinense com destaque para a área de estudo demarcada por um retângulo vermelho, e a direita área de estudo com os pontos de coleta do trabalho. (modificado de Süffert 1997 e Folha de Criciúma – SH.22-X-B, CPRM,2000).

2.2 GEOLOGIA

A área de estudo está inserida no contexto geológico da borda sul-sudeste da Bacia do Paraná (Figura 9), que constitui uma grande bacia intracratônica disposta na parte central-leste da Plataforma Sul-Americana, que corresponde à unidade geotectônica do sudoeste do Supercontinente *Gondwana* (Milani *et al.*, 1994 apud Kalkreuth *et al.*, 2010).

Com uma área total de 1.500.000 km² (Milani *et al.*, 2000), a bacia ocupa cerca de 1.000.000 km² no território brasileiro (Schneider *et al.*, 1974), abrangendo partes dos territórios dos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Inclui porções territoriais do Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai. A Bacia tem uma forma ovalada com eixo maior N-S, sendo seu contorno atual definido por limites erosivos (Milani, 2004). Apresenta aproximadamente 1.750 km de comprimento e 900 km de largura, é a maior bacia Paleozóica da América do Sul e registra um intervalo de tempo de sedimentação do Ordoviciano ao Cretáceo (Milani & Ramos, 1998). O seu registro estratigráfico compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno de 7 km no seu depocentro.

O conjunto de rochas sedimentares e vulcânicas que constitui a Bacia do Paraná foi originado pela superposição de sequências depositadas em diferentes ambientes tectônicos, decorrentes da dinâmica de placas atuante na evolução do *Gondwana*, (Zalán *et al.*, 1990). O preenchimento sedimentar da bacia foi dividido em seis sequências deposicionais (figura 9).

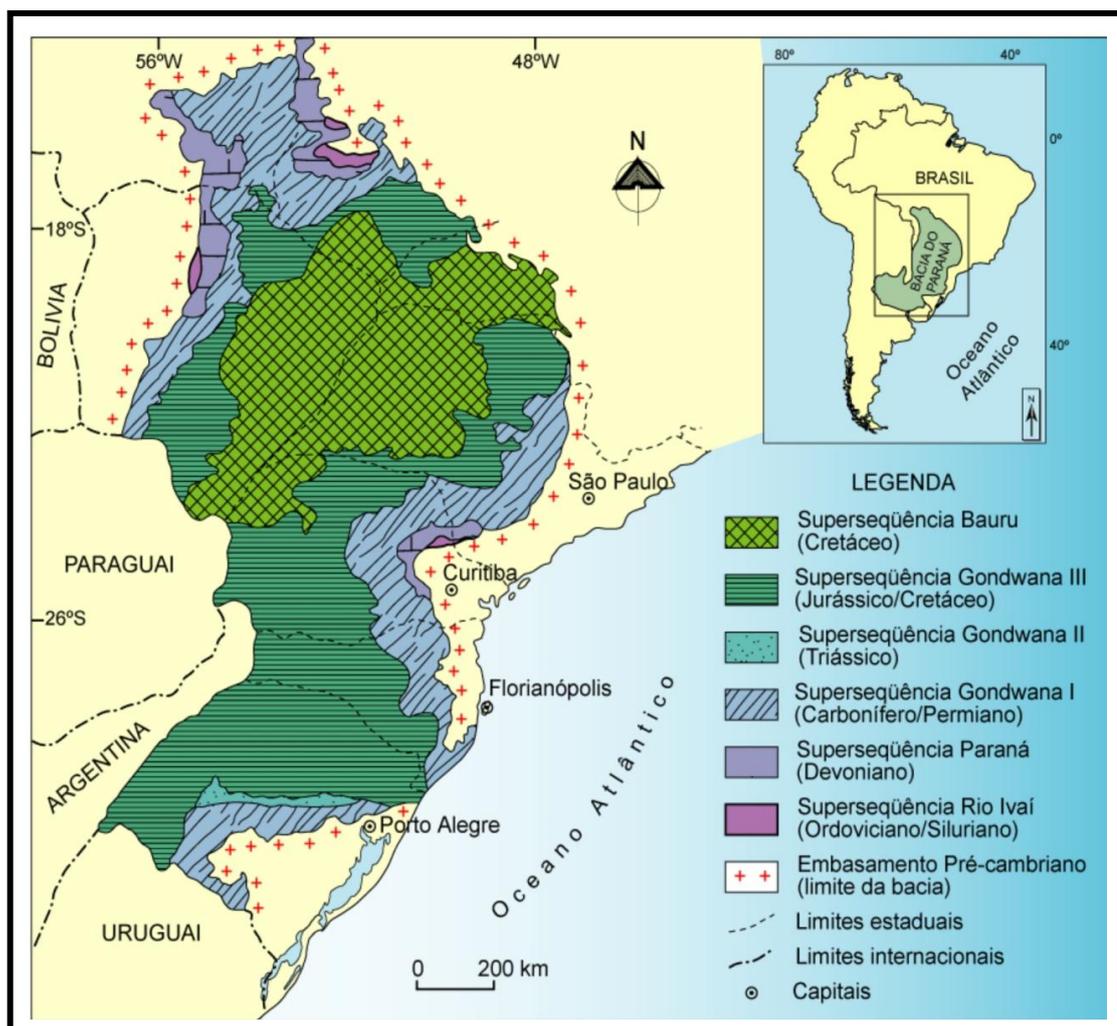


Figura 9: Mapa Geológico da bacia do Paraná (Milani, 2000).

Os estratos onde o carvão ocorre correspondem à unidade litoestratigráfica denominada de Formação Rio Bonito do Grupo Guatá (Schneider et al., 1974), localizada no topo da segunda seqüência do *Gondwana I* (Carbonífera/Triássico Inferior), que constitui espessas seqüências sedimentares, atingindo 2.800 m no depocentro da bacia (Milani et al., 2004). Os sedimentos da Formação Rio Bonito foram depositados no intervalo Sakmariano/*Artinskiano*, do Permiano Inferior (figura 10). As camadas de carvão têm características que são indicativas de uma origem límnico-telmática, onde o material acumulado é constituído por pteridófitas e

plantas herbáceas (*Glossopteris* e *Gangamopteris*) acumuladas depois de algum transporte, resultando em camadas de carvão hipoautóctones ricas em inertinita (Kalkreuth, *et al.*, 2010).

A Formação Rio Bonito na área de estudo, registra duas sequências sedimentares de terceira ordem, onde a camada Bonito foi depositada num trato de sistema de mar alto em um ambiente Barreira-estuarino, no final da segunda sequência (Kalkreuth *et al.*, 2010).

A Formação Rio Bonito compreende o pacote sedimentar depositado sobre o grupo Itararé, constituído de uma seção arenosa basal, uma média essencialmente argilosa e uma superior areno-argilosa, contendo os principais leitos de carvão na Bacia carbonífera de Santa Catarina.

Schneider (1974) dividiu a Formação Rio Bonito em três membros: Triunfo (inferior), Paraguaçu (médio) e Siderópolis (superior). As camadas de carvão de grande relevância da Bacia carbonífera de Santa Catarina estão contidas no membro Siderópolis (figura 10).

O membro Siderópolis constitui-se de uma sequência de arenitos finos médios e grosseiros, de cor cinza a cinza-esbranquiçada, onde se intercalam camadas de siltitos cinza-escuros e carvão. As estruturas sedimentares mais características nos arenitos são a estratificação cruzada acanalada e nos siltito, laminações plano-paralelas, onduladas e bioturbada.

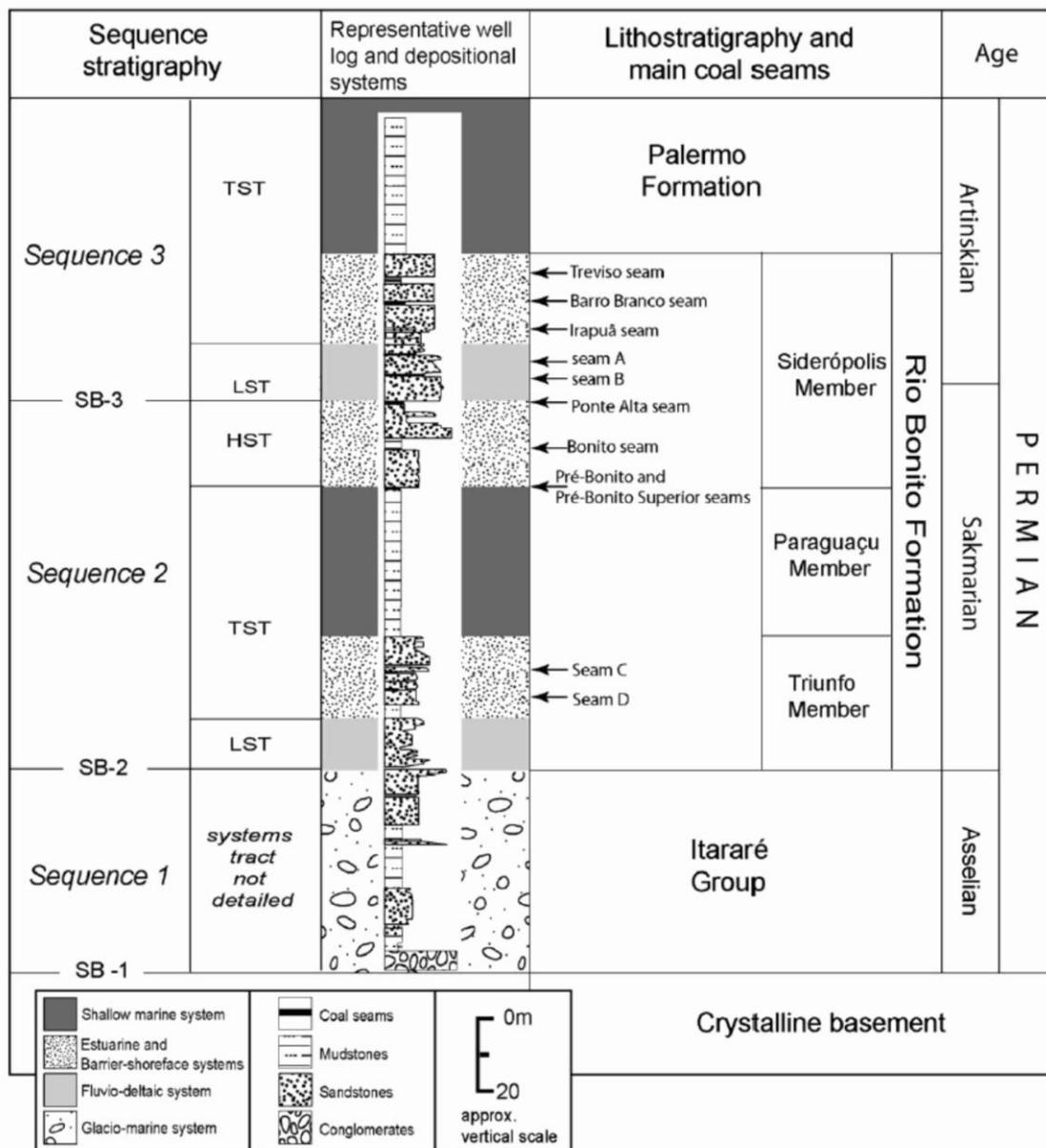


Figura 10: Perfil estratigráfico representativo do Sul de Santa Catarina, mostrando associação de fácies, sistema deposicional e tratos de sistema, sequência de terceira ordem. A camada Bonito formou-se no trato de sistema de mar alto da segunda sequência, (Kalkreuth *et al.*, 2010).

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As atividades foram divididas em diferentes fases de execução, uma fase inicial de levantamentos bibliográficos que possibilitaram conhecer melhor as características da geologia da área e do carvão da camada Bonito.

3.2 ETAPA DE CAMPO

3.2.1. Amostragem

Na fase seguinte tratou-se da obtenção de amostras, que foi realizada em três minas de subsolo em pontos próximos a frente de lavra em operação, onde o carvão ainda estava fresco. A amostragem foi realizada pelo método de canal (figura 11), que consiste na coleta de pequenos blocos da camada consecutivamente, no sentido base-topo, amostrando-se de forma completa a camada em quantidades equivalentes ao longo do perfil, segundo a norma ASTM D7430.

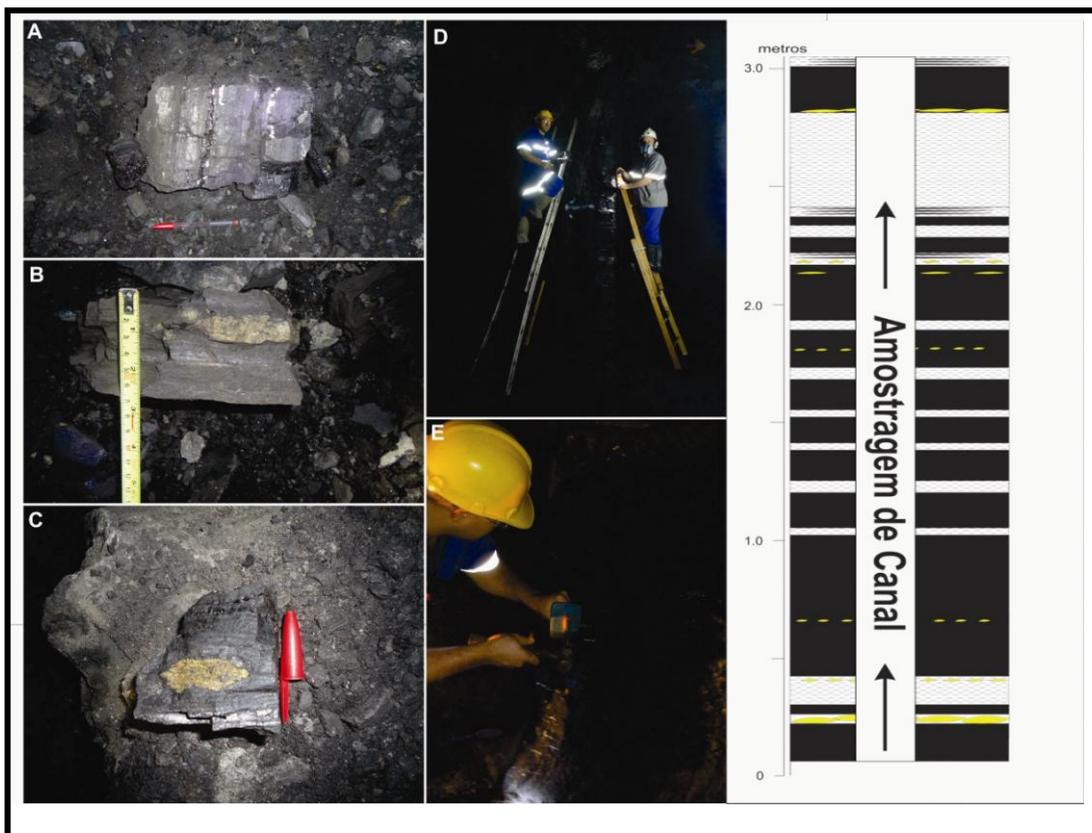


Figura 11: Fotos A, B e C exemplificando blocos coletadas, D demonstrando a coleta do topo da camada, onde foi necessária a utilização de escadas devido a altura da camada ultrapassa 3 metros, E mostrando a coleta manual dos blocos com talhadeira no pilar da mina e a direta desenho esquemático do método de coleta em canal.

3.2.2. Descrição de Litotipos

Concomitantemente a coleta de amostras, foi realizada a descrição dos litotipos do carvão (figura 12).

Segundo o Comitê Internacional de Petrologia Orgânica e do Carvão – ICCP (1971), litotipos são as bandas identificáveis macroscopicamente no carvão, sobretudo pelo brilho (STACH, 1982), por definição com espessura mínima de 1 cm, as quais podem refletir o tipo de contribuição da matéria orgânica e inorgânica, bem como as variações químicas e físicas sofridas na época da acumulação em turfeiras (Kalkreuth e Leckie, 1989). No trabalho, foi adotada a classificação contida em Diessel (1965).

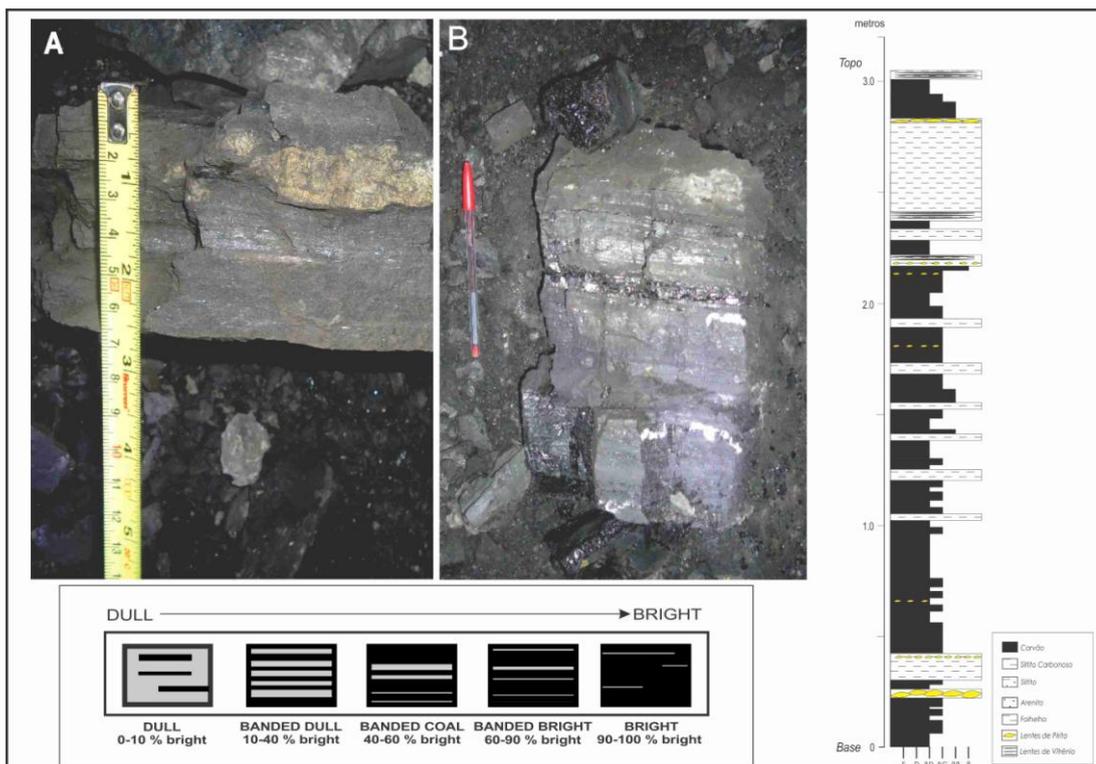


Figura 12: Fotos A e B exemplificando o bandamento entre os litotipos brilho e fosco existente no carvão, com detalhe para o nódulo de pirita centimétrico na foto A, abaixo classificação simplificada de Diessel (1965) e a direita exemplo da descrição de um dos pontos do trabalho.

3.3 PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS

A etapa Pós-Campo foi realizada nas instalações do LACAPETRO, e iniciou-se com a secagem e posterior catalogação das amostras. Posteriormente as amostras passaram por britagem em um britador do tipo mandíbula e por peneiramento em peneiras de granulometria pré-determinada, para uma homogeneização das mesmas. A amostra então ficou homogeneizada em uma granulometria abaixo de 25,4 mm. Na sequência as amostras foram quarteadas, para que dessa forma se obtivesse três frações que correspondessem a composição original da amostra. E cada uma dessas frações foi encaminhada para diferentes processamentos posteriores de acordo com a norma de cada teste como demonstrado no fluxograma de preparação de amostras (figura 13).

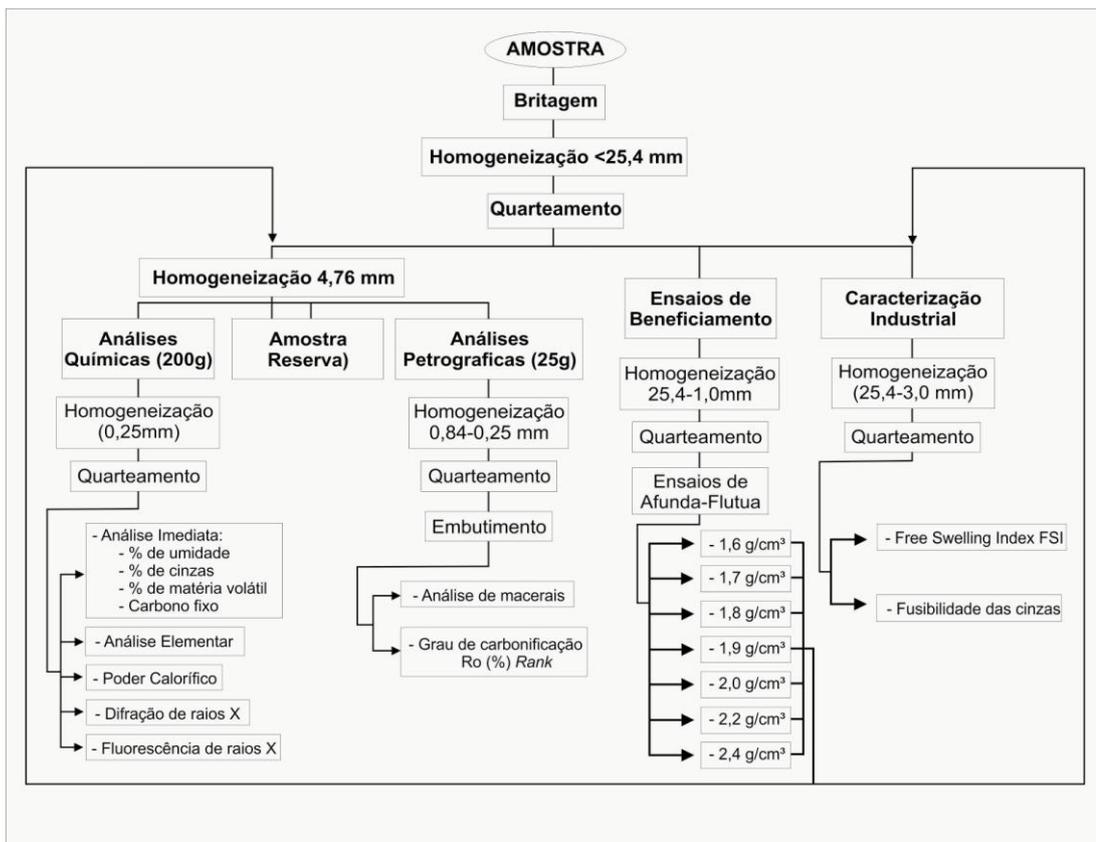


Figura 13: Fluxograma de preparação de amostras, para as análises previstas no estudo.

3.4 BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO – AFUNDA-FLUTUA

O procedimento de separação de uma amostra de carvão em frações densimétricas com limites definidos, usando líquidos de diferentes densidades, é conhecido como o ensaio de afunda-flutua. Esta é a técnica de laboratório mais útil no beneficiamento gravimétrico, encontrando diversas aplicações importantes (Sampaio e Tavares, 2005). Este trabalho seguiu a norma (NBR 8738, 1995). As amostras passaram por trituração e homogeneização no intervalo granulométrico de 25,4-1,0 mm.

Em essência, o procedimento consiste na introdução de uma amostra de carvão representativa e previamente pesada, em um recipiente contendo um líquido de densidade conhecida, na separação das frações flutuada e afundada, seguida de coleta e introdução sucessiva do produto afundado em líquidos com diferentes densidades. Após cada estágio de separação,

ambas as frações, afundada e flutuada (Figura 14), devem ser lavadas com um solvente adequado, a fim de permitir a remoção do filme de líquido denso aderido a amostra. Uma vez realizada a separação, as amostras devem ser secas, pesadas e analisadas.

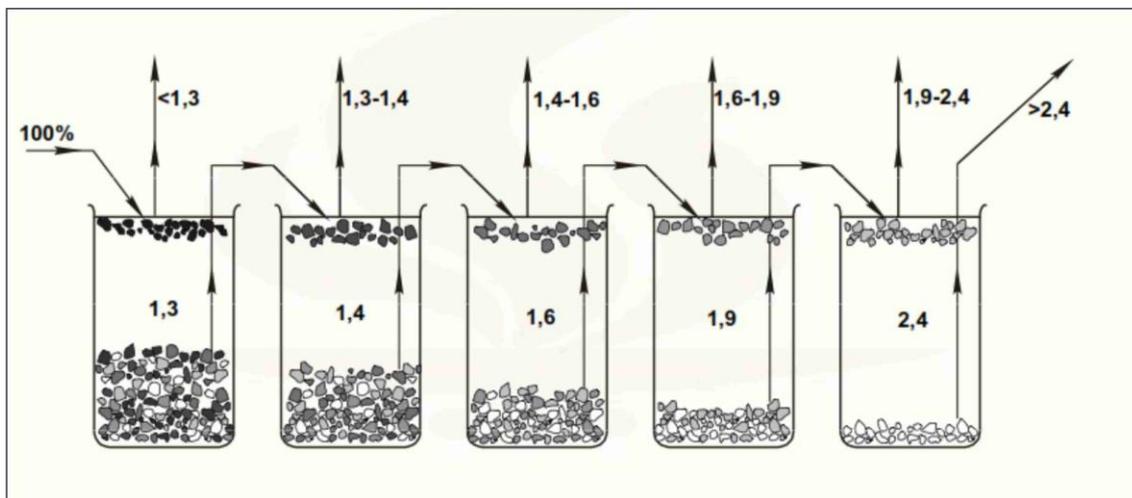


Figura 14: Exemplo de procedimento sequencial de análise densimétrica apresentado por Sampaio e Tavares (2005) valores em g/cm^3 .

Segundo Sampaio e Tavares (2005), diversas representações gráficas existem para os resultados de ensaios de afunda-flutua. As curvas mais frequentemente usadas, também conhecidas como curvas de Henry-Reinhardt são: curva densimétrica, curva de flutuados e afundados, curva de tolerância densimétrica (Near Gravity Material - NGM).

No presente trabalho foi utilizada uma adaptação da técnica apresentado por Sampaio e Tavares (2005), onde foram utilizados líquidos com as seguintes densidades; 1,6 1,7 1,8 1,9 2,0 2,2 2,4 g/cm^3 . Estas densidades foram obtidas pela mistura dos diferentes líquidos orgânicos densos: Benzeno (xilol) - 0,9 g/cm^3 , percloroetileno - 1,6 g/cm^3 e bromofórmio - 2,9 g/cm^3 .

3.5 ANÁLISE IMEDIATA

As medidas dos teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo foram realizadas segundo as normas do American Society for Testing and Materials –ASTM D 2013, em estufa Deleo e forno mufla Sanches, no LACAPETO-UFRGS.

3.5.1 Percentual de Umidade

Trata-se essencialmente da água contida na mesma, é determinado de acordo com a norma ASTM D 3173-87. Consiste na quantificação percentual da perda de peso em uma amostra de 1g, quando submetida a uma temperatura constante de 104-110°C durante o período de uma hora em uma estufa pré-aquecida, com a circulação de ar seco. O dado gerado é utilizado para se subtrair o efeito da água em outras análises e dessa forma, ter se um resultado em base seca. O procedimento consiste na colocação de 1g de amostras em um recipiente de vidro e após permanecer na estufa pelo período de uma hora, essa amostra é pesada novamente e calcula-se o teor de umidade através da equação:

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

Sendo; “A” = soma da massa do recipiente de vidro com a amostra seca (peso depois do aquecimento), “B” é a massa do recipiente de vidro vazio e “C” é a massa da amostra utilizada antes da queima (1,0g).

3.5.2 Percentual de Cinza

É o resíduo resultante da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera segundo a norma ASTM D 3174. Um cadinho de cerâmica é

carregado com 1g de amostra, esse cadinho é levado ao forno mufla e 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 mantida uma taxa de fluxo de ar de 2-4 trocas 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:

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

Sendo; “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).

3.5.3 Percentual de Matéria Volátil

É o percentual de produtos gasosos liberados do carvão durante aquecimento na ausência do oxigênio, seguindo a norma ASTM D 3175. Para determinação, pesa-se 1,0g da amostra em um cadinho de cerâmica 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:

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

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

Então o percentual de matéria volátil é dado pela expressão:

Percentual de Matéria Volátil = C-D

Onde “C” = % Perda de Peso. E “D” = % de Umidade anteriormente determinada.

3.5.4 Percentual de 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:

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

3.6 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

E a soma da energia libertada na forma de calor e da energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação em uma amostra, é mensurada em bomba calorimétrica segundo a norma ASTM D 2015 (1991) é expresso em cal/g, em uma base seca e livre de cinzas (d.a.f). Os valores de poder calorífico superior de uma determinada amostra de carvão dependem principalmente da composição maceral e do *rank* (Suarez-Ruiz, 2009).

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 15) é preenchido com oxigênio puro (99,95%) em uma pressão de 30 bar.

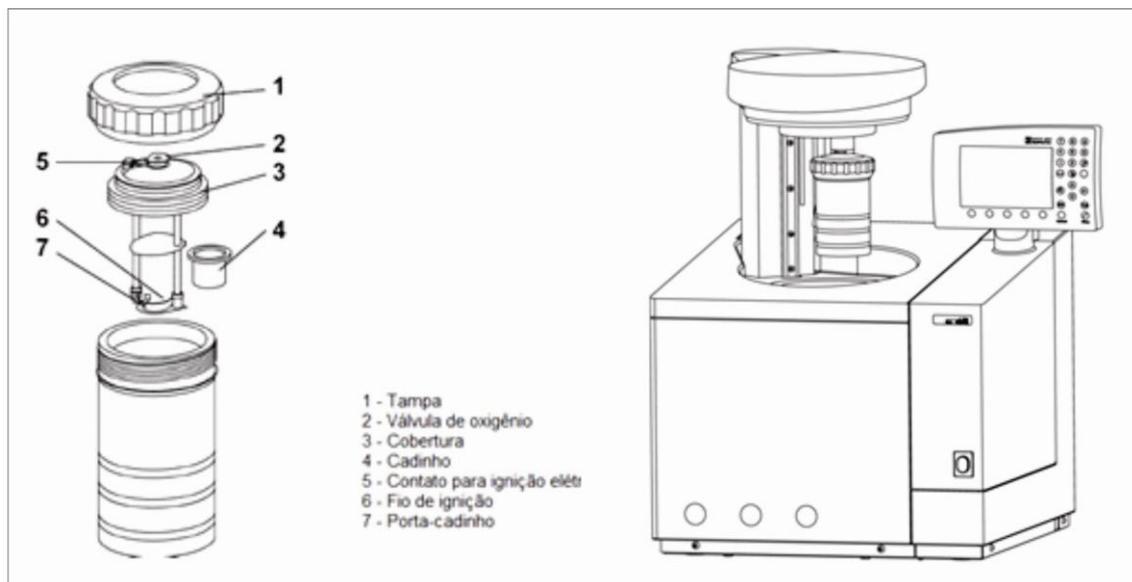


Figura 15: Partes do cilindro e bomba calorimétrica com o cilindro acoplado (modificado de IKA – WERKE, 2007).

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 benzoico.

m = massa da amostra.

ΔT = Aumento da temperatura durante a combustão da amostra.

Para este trabalho foram realizados análises de poder calorífico em 27 amostras. O equipamento utilizado foi uma Bomba Calorimétrica da marca IKA modelo C2000 Basic do Laboratório de Análises de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo.

3.7 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

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 16). 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 27 amostras de carvão. O equipamento utilizado foi um Difrátometro SIEMENS 5000 do Instituto de Geociências da UFRGS.

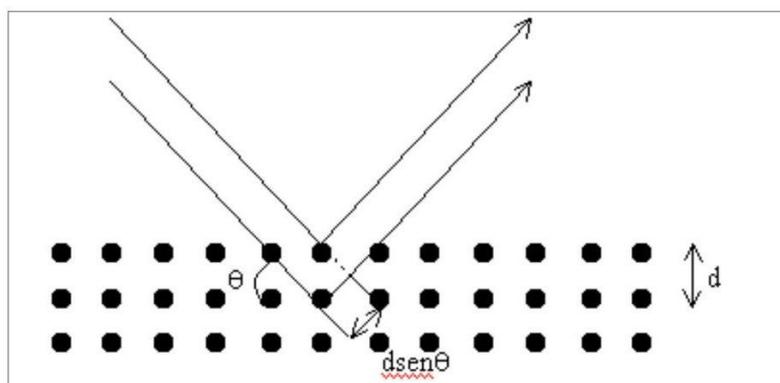


Figura 16: Incidência de um feixe de raios-x sobre um mineral (Skoog, 2002).

3.8 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

O espectrômetro de fluorescência de raios X é um instrumento que determina quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da aplicação de raios X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios X emitidos. A técnica de fluorescência de raios X é não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos, pós.

As análises desse trabalho foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural – LCE, da Universidade Federal de São Carlos-UFSCar em um equipamento SHIMADZU EDX-720/800HS.

3.9 INDICE DE INCHAMENTO LIVRE –FSI (Free Swelling Index)

Usado para se determinar o índice de inchamento livre do carvão no método de bico de bunsen, de acordo com a Norma ASTM D-720. O ensaio do índice de inchamento livre é um método empírico, rápido e de pequena escala para medir as propriedades de inchamento livre do carvão. Os resultados do teste podem ser usados como um indicador das características de coqueificação do carvão, sendo que os valores entre 1 a 2,5 são considerados de fraco poder aglutinante, de 2,5 a 4 de poder aglutinante intermediária e valores >4 são considerados de forte poder aglutinante(figura 17). O valor de 2½ é tido como o inchamento mínimo para um carvão ser considerado coqueificável.

Baseia-se no aumento de volume de uma massa de carvão, quando submetida a aquecimento e tempo controlados, obtendo-se um botão de coque, cujo perfil é comparado a uma série de perfis-padrão.

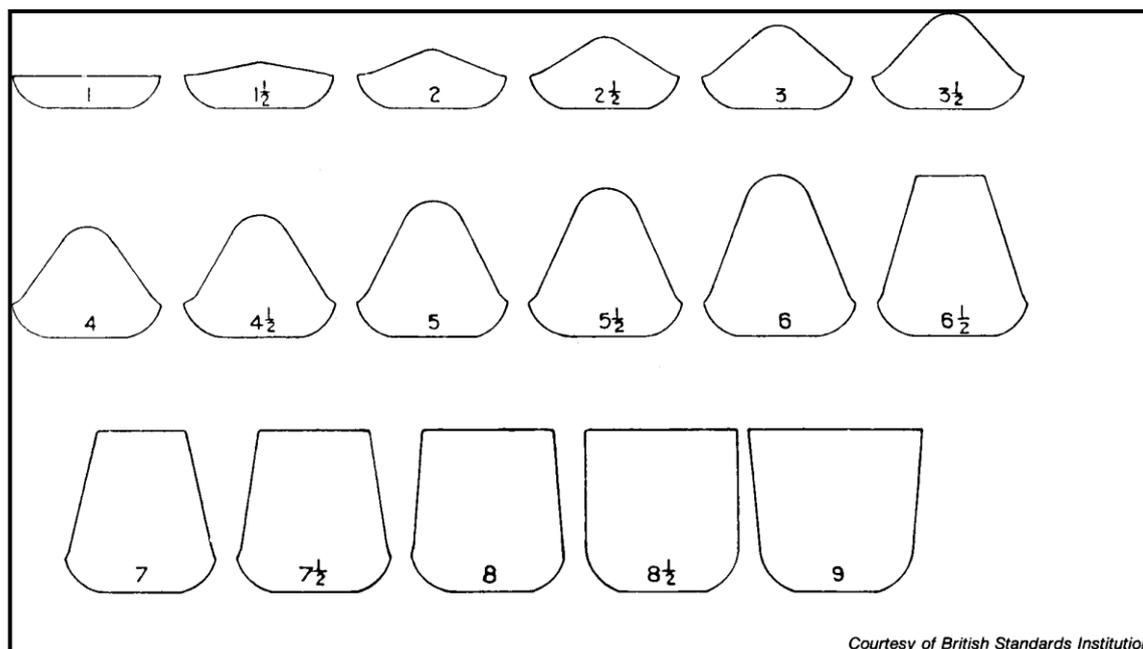


Figura 17: Escala completa de perfis padrão e seus números de índice correspondentes (Modificado ASTM D720-2010).

3.10 FUSIBILIDADE DAS CINZAS

A medição das temperaturas de fusibilidade de cinzas é o método mais usado para prever o comportamento de cinzas dos carvões em temperaturas elevadas. O método consiste na preparação de uma amostra de cinzas a partir da queima do carvão sob condições oxidantes em temperaturas de 800 a 1600°C. A cinza é pressionada em um molde para formar um cone com 19 mm de altura e com uma base de 6,35 mm triangular. O cone é aquecido em um forno a uma taxa controlada para proporcionar um aumento da temperatura de 8°C por minuto. A atmosfera do forno é regulada para fornecer condições oxidantes (O₂) ou redutoras (N₂). Como a amostra é aquecida, as temperaturas em que o cone se funde e se deforma gerando formas específicas, como mostrado na (figura 18). Dentro desse processo, quatro momentos, ou seja, temperaturas específicas são relatadas:

Temperatura de deformação inicial (IT) - a temperatura na qual a ponta da pirâmide começa a se fundir ou mostrar sinais de deformação.

Temperatura de amolecimento (ST) - a temperatura na qual a amostra se deforma para uma forma esférica, onde a altura do cone se iguala à largura na a base ($H = W$). A temperatura de amolecimento é comumente referida como a temperatura de fusão.

Temperatura hemisférica (HT) - a temperatura na qual o cone se fundiu até um nódulo hemisférico e a altura se iguala à metade da largura da base ($H = 1 / 2 W$).

Temperatura de fluidez (FT) - a temperatura na qual o cone de cinzas se fundiu a uma camada quase plana, com uma altura máxima de 1,59 mm.

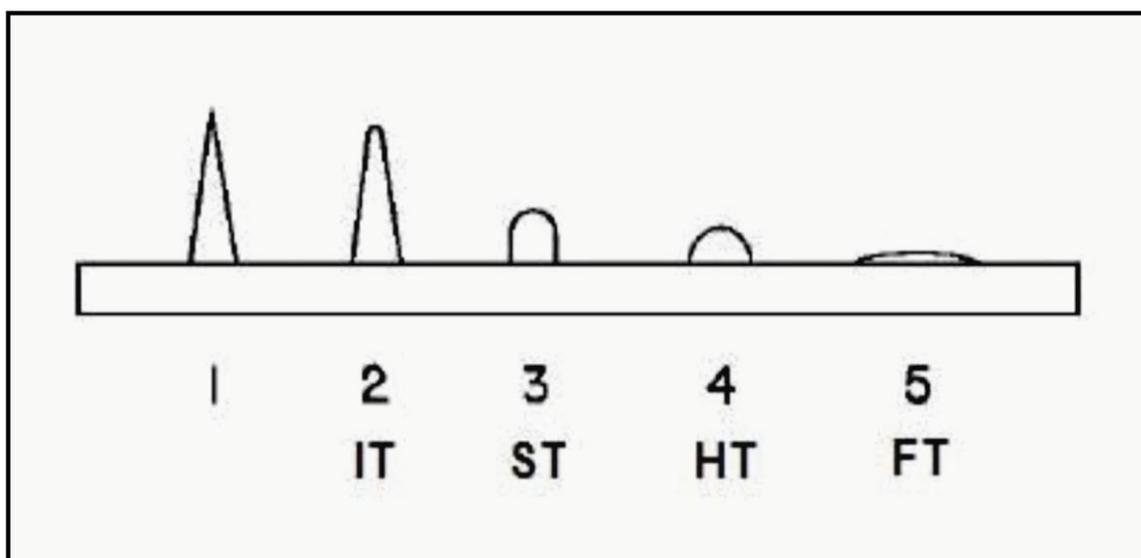


Figura 18: Estágios de deformação dos testes de fusibilidade segundo a norma DIN 51730.

3.11 ANÁLISES PETROGRÁFICAS

Foram realizadas análises petrográficas (figura 19) a fim de caracterizar e classificar os carvões da camada Bonito segundo a norma (ISO 11760, 2005), através da análise quantitativa dos grupos de macerais e determinação do *rank* utilizando-se a medida do poder refletor médio das Vitritas para isso foram confeccionadas seções polidas das amostras.

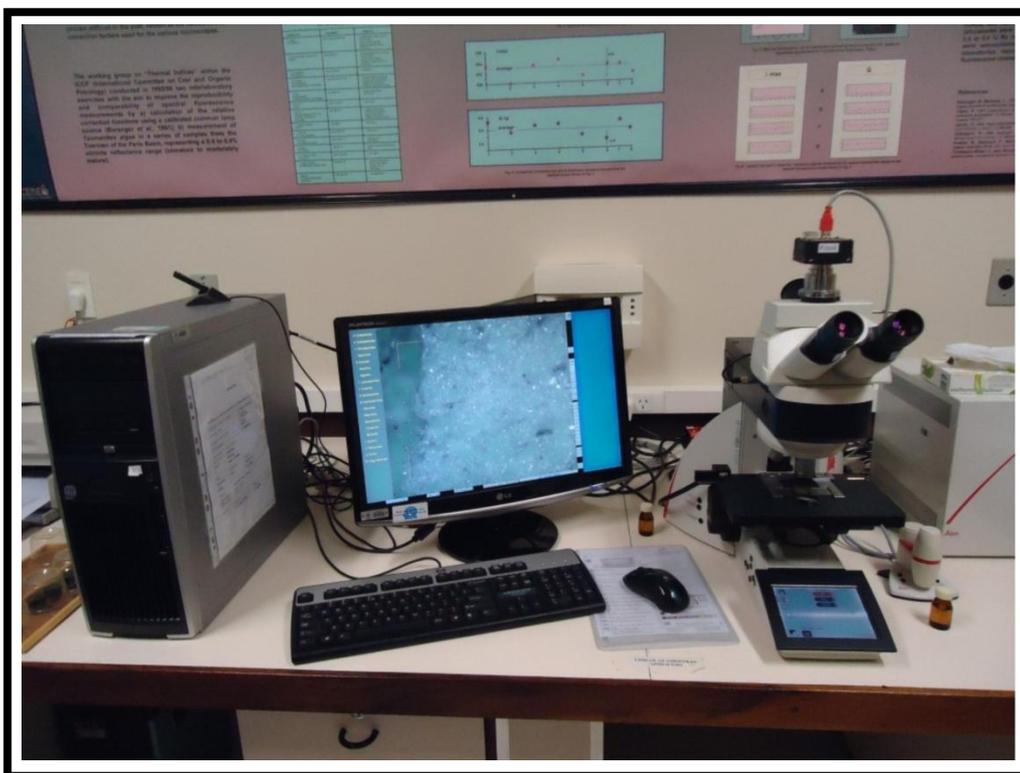


Figura 19: Microscópio Leica DM6000 M utilizado nas análises petrográficas no LACAPETRO - Laboratório de carvão e rochas geradoras de petróleo.

3.11.1 Preparação das Amostras para Análise Microscópica

As amostras foram homogeneizadas em um intervalo granulométrico inferior a 0,84mm e superior a 0,25mm, com o qual foram confeccionadas seções polidas. As seções polidas foram preparadas em uma embutidora metalográfica hidropneumática Teclago com a utilização de resina acrílica. Após a confecção, as seções foram submetidas a desbaste e polimento de uma das faces com lixadeira automática rotativa da marca *Buehler*, modelo

Ecomet4. O lixamento foi realizado com placas de diamante de 45 μ m e 9 μ m e o polimento com suspensão de aluminas de granulometria de 0,3 μ m e 0,05 μ m nos tecidos pellow polishing cloth e silk cloth respectivamente, a uma rotação de 200rpm e com banhos em jatos de água seguidos de intervalos de 2 minutos em ultra som, para lavagem e eliminação de cada tipo de alumina.

3.11.2 Reflectância da Vitrinita Rrandom (%)

Segundo Stach 1982, existe uma nítida relação entre o poder refletor do maceral vitrinita e seu teor de carbono e/ou matéria volátil, significando que o *rank* de um carvão pode ser determinado medindo-se o poder refletor em uma superfície polida.

O método para determinação do *rank* de uma amostra de carvão consiste na realização de 100 medida em cada amostra do poder refletor da vitrinita (ISO-7404/5, 1984), para comparação com padrões de reflectância conhecidos, a média aritmética dessas medidas gerará o valor de grau de carbonificação (*rank*) do carvão analisado (Figura 20). O equipamento utilizado no LACAPETRO foi um Microscópio *Leica DM6000 M* de luz refletida, objetiva de 20X, em óleo de imersão com índice de refração de 1,518 e oculares de 10X com uma câmera digital acoplada a um monitor e conectada a um computador utilizando o programa *Diskus Fossil*. As análises foram 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 11760, 2005).

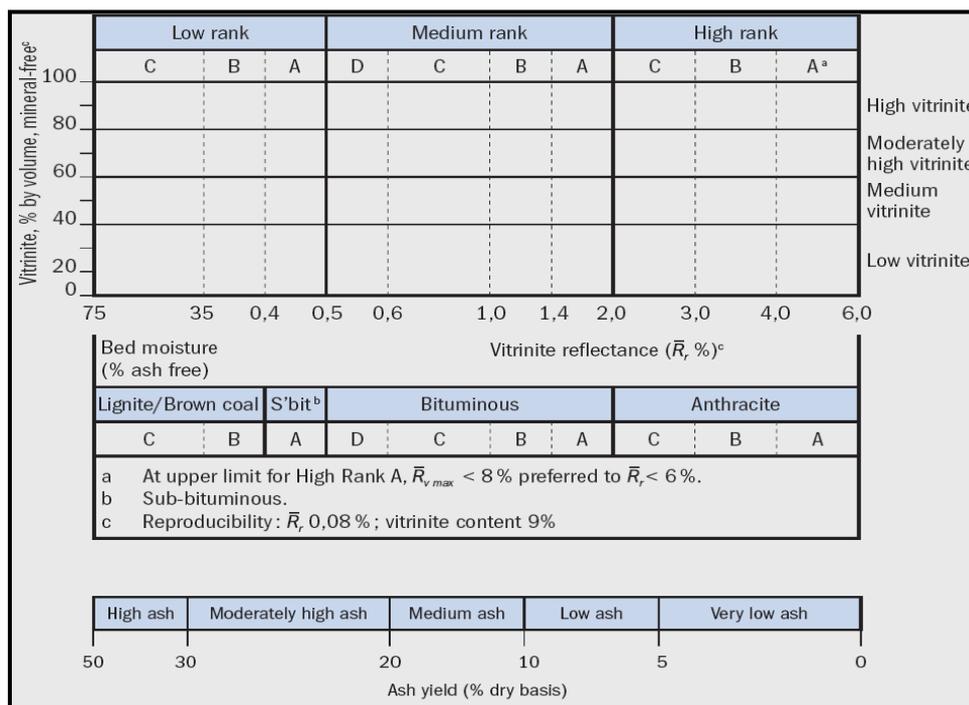


Figura 20: Classificação dos carvões (ISO 11760-2005).

3.11.3 Análise dos Macerais

A análise de macerais segue a norma (ISO-7404/3, 1984), baseia-se na contagem de 500 pontos realizados em linhas com intervalos pré-programados. Essa contagem serve para a identificação e quantificação dos diferentes macerais (Quadro 2) e matéria mineral contidos na amostra. A análise é realizada em microscópio de luz branca refletida e em luz de fluorescência através de excitação usando uma lâmpada de Hg e um filtro azul, com objetiva imersa em óleo. Os resultados da análise petrográfica são expressos em Volume %. O equipamento utilizado no LACAPETRO é o microscópio *Leica DM6000 M* de luz refletida, objetiva de 20X, em óleo de imersão com oculares de 10X, com uma câmera digital acoplada a um monitor e conectada a um computador utilizando o programa *Diskus Fossil*.

Grupos de Macerais	Subgrupo de Macerais	Maceral	Origem
Vitrinita	Telovitrinita	Telinita	Paredes celulares de tecidos lenhosos e parênquimáticos
		Colotelinita	Tecidos lenhosos parênquimáticos do caule, folhas e raízes.
	Detrovitrinita	Vitrodetrinita	Produto da decomposição dos tecidos lenhosos e parênquimáticos
		Colodetrinita	Produto da decomposição dos tecidos lenhosos e parênquimáticos
	Gelovitrinita	Corpogelinita	Primária de estruturas de dentro das células (tanino, secreções) ou secundária como produto da precipitação de géis húmicos
		Gelinita	Formado a partir de colóides
Liptinita		Esporinita	Pólen e esporos
		Cutinita	Cutículas e folhas
		Resinita	Resinas e graxas
		Alginita	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	Maceral secundário no processo de gelificação
		Macrinita	Alteração de substâncias húmicas
		Secretinita	Oxidação de resinas e géis húmicos
		Funginita	Esporos de fungos e tecidos
		Inertodetrinita	Forte fragmentação de outros macerais deste grupo

Quadro 2: Classificação dos grupos macerais segundo ISO-7404/3, 1984.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Descrição de Campo – Litotipos do carvão

A camada é caracterizada por uma grande proporção de carvão impuro. Lentes de pirita são comuns. Há uma tendência de enriquecimento em matéria mineral para o topo da camada nos três perfis. Os Litotipos dominantes são fosco (D) 30-60% e carvão bandado (BC e BD) 35-63%. Enquanto carvão bandado brilhante (BB) e brilhante (B) são raros, não ultrapassando 6% (figura 21).

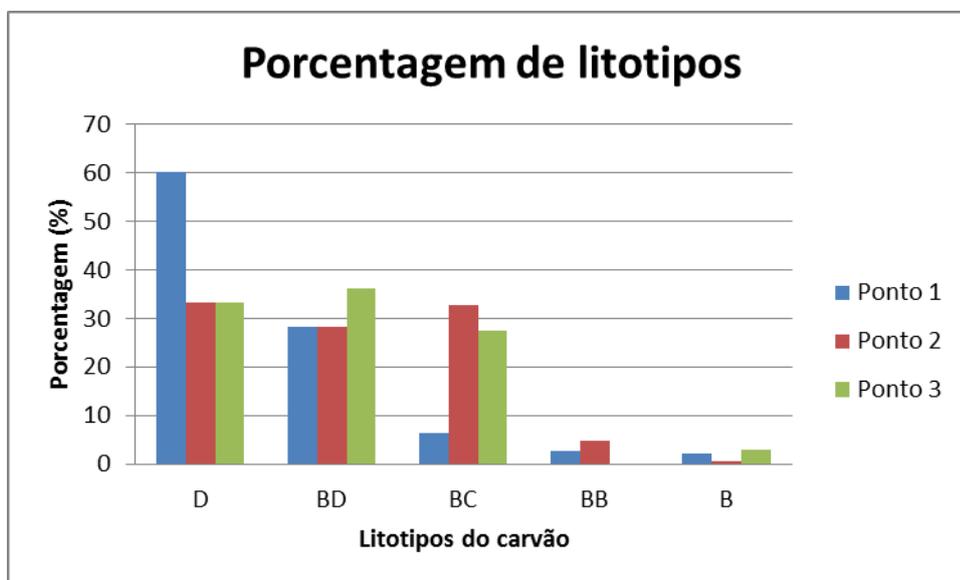


Figura 21: Litotipos do carvão

A predominância do litotipo fosco na camada Bonito para os perfis nos pontos de coleta (figura 22) se reflete no alto teor de inertinita e matéria mineral observados na petrografia. Através dessa relação conclui-se que estas camadas foram formadas durante períodos de elevado nível da água e circulação dentro da turfeira.

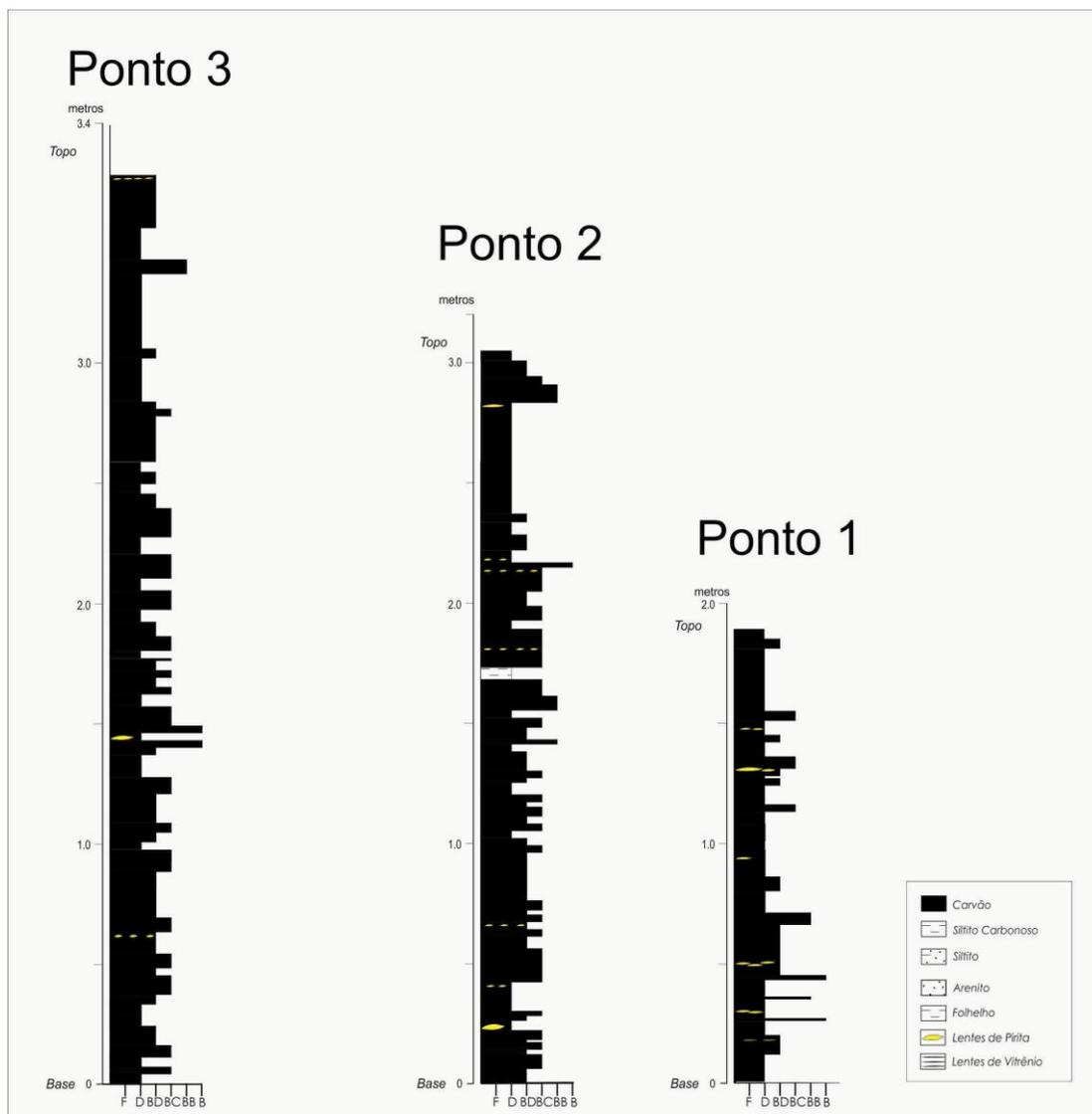


Figura 22: Perfis de litotipos do carvão para os pontos de estudo.

4.2 Beneficiamento Gravimétrico

A partir dos ensaios de afunda-flutua foram elaboradas as curvas de lavabilidade (flutuados e afundados) para a camada Bonito nos três pontos coletados (Apêndice B). Analisando o comportamento das curvas de flutuados da camada nos pontos 1, 2 e 3 (figura 23), nota-se um aumento progressivo do teor de cinzas à medida que o rendimento aumenta. Os teores de cinza nas curvas de flutuados variam aproximadamente de 27 a 60 % para o ponto 1, 26 a 59 % para o ponto 2 e 26 a 57 % para o ponto 3.

Quanto às curvas de afundados (figura 23), o que se observa é um pequeno desvio para a esquerda no final destas curvas, nas faixas de maior densidade (2,2-2,4 e >2,4 g/cm³). Isso indica a redução de massa residual durante a realização das análises de determinação de cinzas (Ferreira, 2012). Essa redução do teor de cinza nas frações de maior densidade se dá por consequência da volatilização da Pirita. Sendo assim, quanto maior a presença de pirita acumulado nas maiores densidades, maior será o desvio ao final das curvas. O teor de cinzas nas curvas dos afundados varia de 60 a 77% para o ponto 1, 59 a 91 % para o ponto 2 e 57 a 82 % para o ponto 3.

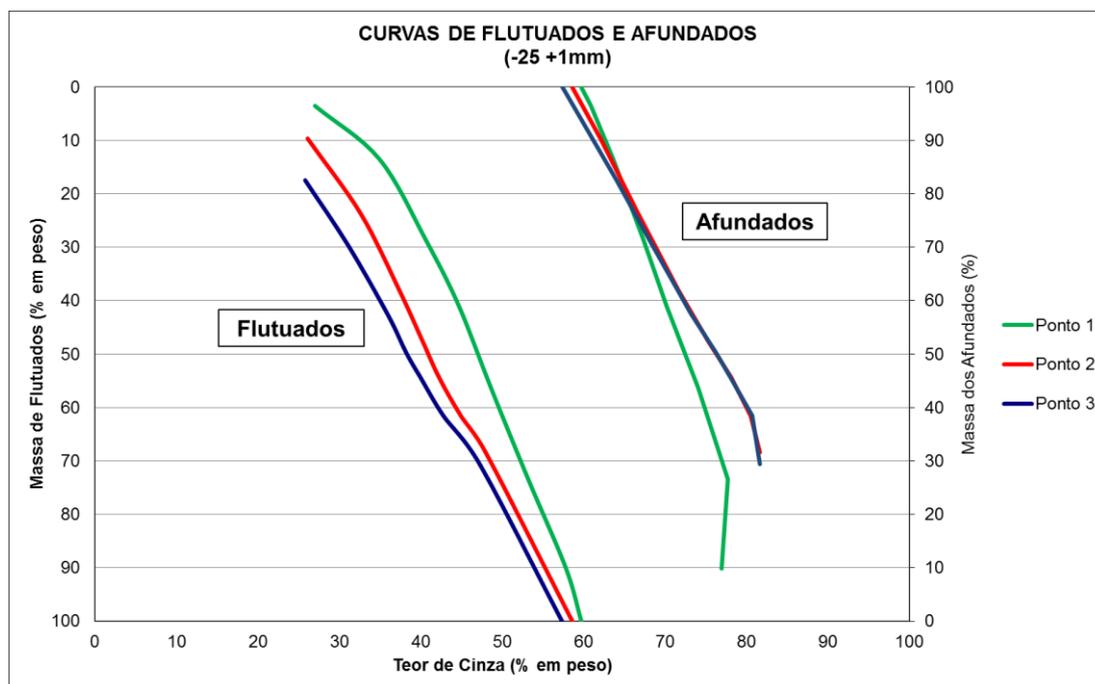


Figura 23: Curvas de flutuados e afundados da Camada Bonito, mostrando a relação entre teor de cinza com a massa de flutuados ou afundados.

De acordo com as curvas densimétricas da camada bonito nos pontos 1, 2 e 3 (figura 24), ocorre uma liberação intermediária da matéria carbonosa, onde a separação entre orgânico e inorgânico se mostra gradativa, exibindo desta forma um espectro amplo de densidades.

Com relação as curvas de tolerância (Near Gravity Material – NGM) (figura 24), quanto maior o seu valor, mais difícil será o beneficiamento destes carvões. Analisando-se as curvas, os altos valores de NGM, nunca abaixo de 12 %, indicam uma grande dificuldade em beneficiar tais carvões. A amostra do ponto 1 apresenta um alto NGM, mostrando-se de difícil beneficiamento em todas as faixas densimétricas. Em contrapartida as amostras dos pontos 2 e 3 apresentam no intervalo densimétrico de 1,9 a 2,2 um menor NGM, indicando uma melhor desagregação da matéria carbonosa nesse intervalo para estes pontos.

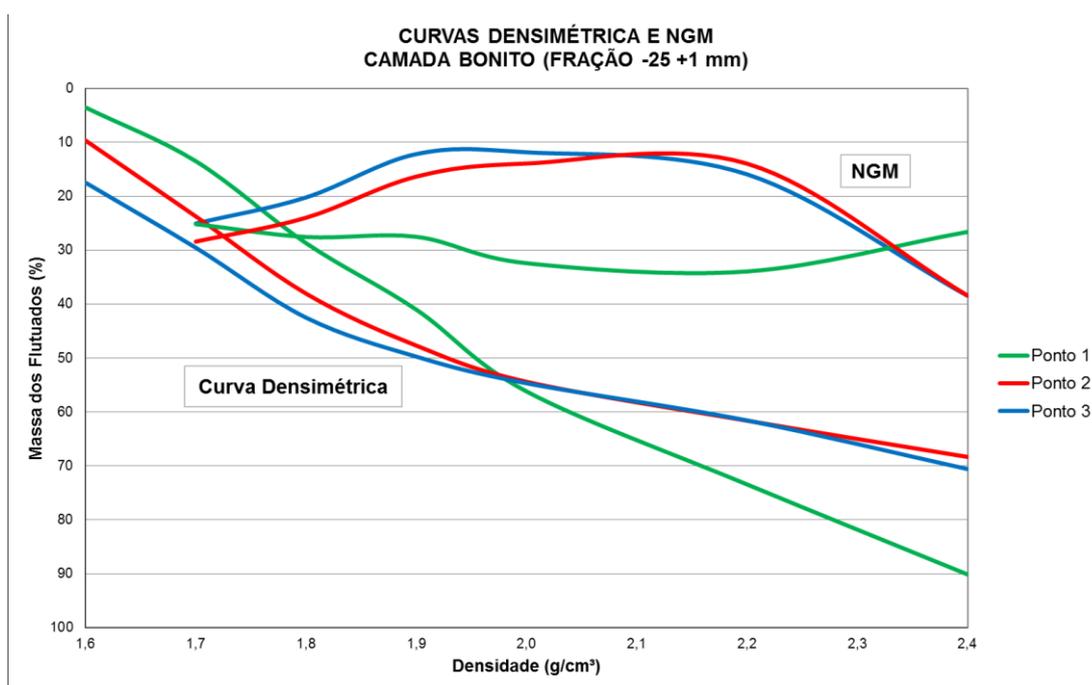


Figura 24: Curvas densimétricas e de NGM.

4.3 Análise Imediata (% em peso)

Quanto ao percentual de umidade das amostras, a camada Bonito mostrou um valor médio de 3,6 % para as amostras brutas, e uma variação de 0,7 a 7,0 para as amostras beneficiadas (apêndice A). Os valores de umidade não apresentam nenhum tipo tendência de variação nas diferentes densidades, se mostrando relativamente estável ao longo do perfil densimétrico (figura 25).

Quanto ao percentual de cinzas das amostras, a camada Bonito mostrou um valor médio de 58 % para as amostras brutas, e uma variação de 26 a 81,6 % (Apêndice A) para as amostras beneficiadas. O menor valor de cinza foi de 25,8 %, encontrado na fração mais leve do ponto 2, e o maior foi de 81,6 % encontrado na fração de maior densidade nos pontos 2 e 3. Observa-se uma correlação entre o aumento progressivo das densidades e um aumento dos teores de cinzas (figura 25).

Para matéria volátil obteve-se um valor médio de 19 % para as amostras brutas, e uma variação de 12,8 a 31,7 %. Nota-se a correlação entre o decréscimo dos valores de matéria volátil, e o aumento do teor de cinza, para o aumento progressivo das densidades (figura 25).

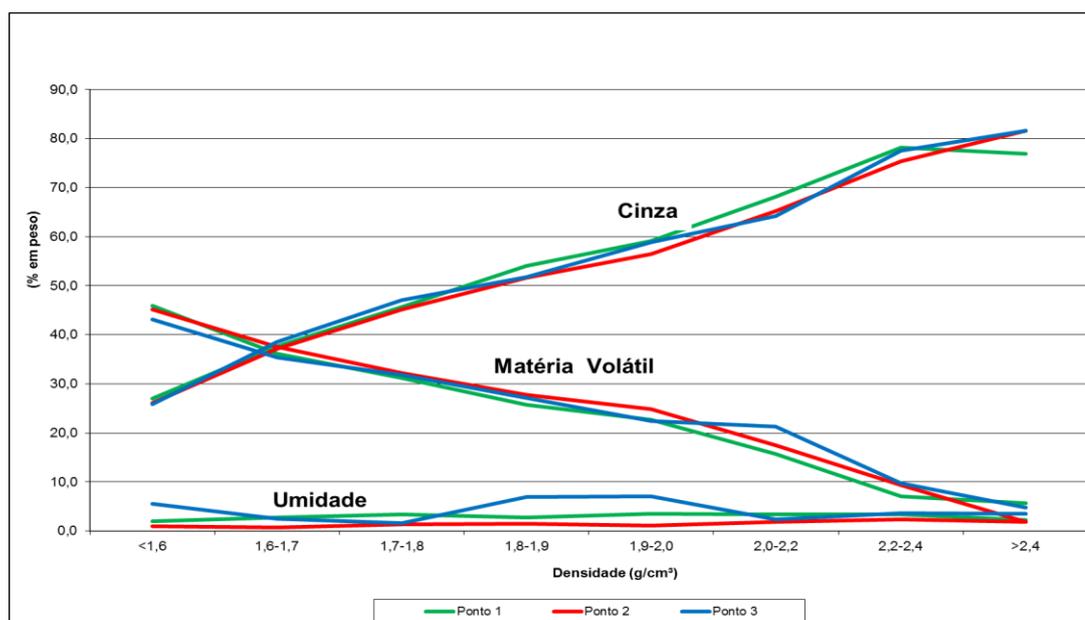


Figura 25: Resultados de análise imediata (Apêndice A).

Para a matéria volátil livre de umidade e cinza (d.a.f), obteve-se um valor médio de 38 %, para as amostras brutas e uma variação de 34 a 80 %. Nota-se um aumento nos valores de matéria volátil em densidades maiores que 2,2 g/cm³, esse comportamento é causado pelo acréscimo da volatilização da pirita, que esta enriquecida nas frações de maior densidade.

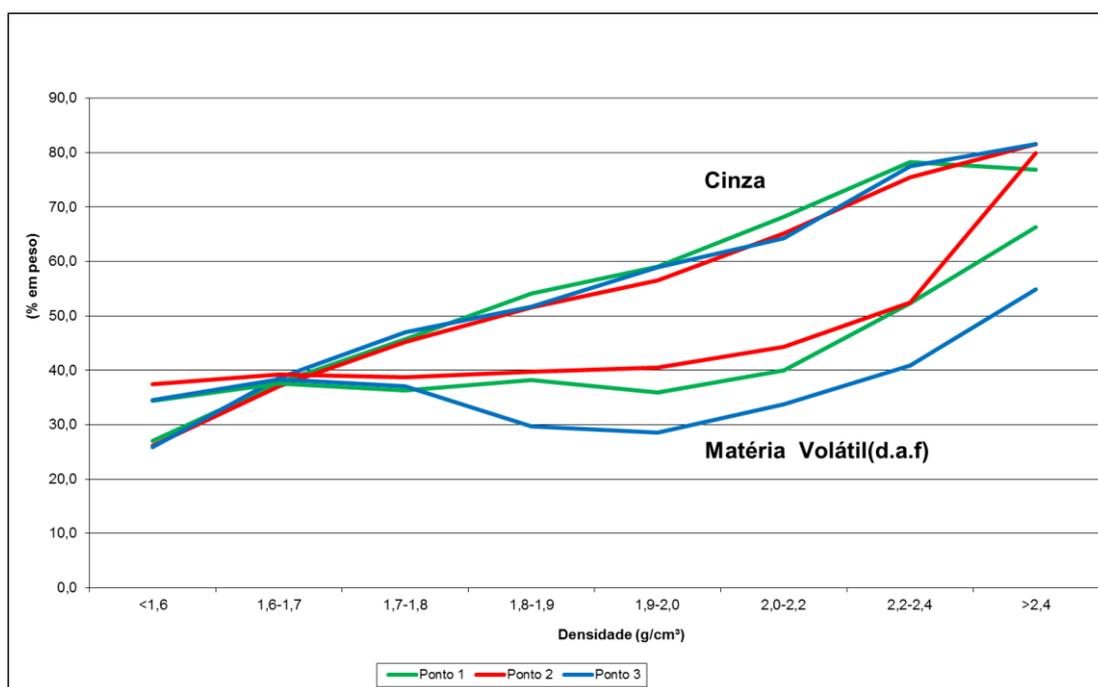


Figura 26: Resultados de análise imediata

4.4 Poder Calorífico

Expresso em Cal/g, o poder calorífico superior apresentou para as amostras brutas para os pontos 1, 2 e 3 valores de 2708, 2871 e 3152 cal/g (apêndice A). Para as amostras beneficiadas observou-se um poder calorífico máximo na fração <1,6 g/cm³ para os três pontos, com valores de 5891, 5968 e 6205 cal/g para os pontos 1, 2 e 3 respectivamente. Com o aumento progressivo da densidade e por consequência do teor de cinzas, ocorre um decréscimo gradual dos valores de poder calorífico como fica evidente no gráfico de poder calorífico vs densidade (figura 27).

4.5 Difração de Raios-X

A mineralogia da matéria mineral das amostras de carvão estudadas, determinada pela difração de raios-X (os difratogramas obtidos para cada amostra estão no Apêndice B, mostrou um predomínio das fases minerais quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e pirita (FeS_2), (quadro 3), ocorrendo secundariamente, plagioclásio ((Ca, Na)Al (Al,Si) Si_2O_8), calcita (CaCO_3), K-feldspato ($(\text{K,Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$) e illita($(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2.n}\text{H}_2\text{O}$). A calcita ocorre sistematicamente no ponto 2, com aparecimento esporádico nas amostras dos pontos 1 e 3. A pirita ocorre em maior abundância na fração de densidade mais pesada $>2,4$ g/cm^3 , para os três pontos. Os resultados qualitativos são expressos no (quadro 3).

		Quartzo	Caulinita	Pirita	Plagioclás	Calcita	K-Feldspato	Ilita
Ponto 1	Bruta	X	X	X	X			
	<1,6	X	X	X				
	1,6-1,7	X	X	X	X		X	
	1,7-1,8	X	X	X	X	X		
	1,8-1,9	X	X	X			X	
	1,9-2,0	X	X	X				
	2,0-2,2	X	X	X	X			
	2,2-2,4	X	X	X	X			X
	>2,4	X	X	X	X			
Ponto 2	Bruta	X	X	X		X		X
	<1,6	X	X	X	X	X		
	1,6-1,7	X	X	X		X		
	1,7-1,8	X	X	X	X	X		
	1,8-1,9	X	X	X	X	X		
	1,9-2,0	X	X	X	X	X		
	2,0-2,2	X	X	X	X	X		
	2,2-2,4	X	X	X		X	X	
	>2,4	X	X	X		X		
Ponto 3	Bruta	X	X	X	X			
	<1,6	X	X	X	X			
	1,6-1,7	X	X	X	X	X		
	1,7-1,8	X	X	X	X			
	1,8-1,9	X	X	X	X			
	1,9-2,0	X	X	X	X	X		
	2,0-2,2	X	X	X	X			
	2,2-2,4	X	X	X	X			
	>2,4	X	X	X	X			

Quadro 3: Resultados qualitativos de difração de raios x.

4.6 Fluorescência de Raios-X

A distribuição dos elementos maiores e traços é baseada nas características do carvão, sendo assim, a proporção dos diferentes elementos nas cinzas foi recalculada para a base do carvão, como detalhado nos (quadro 4 e quadro 5).

4.6.1. Elementos Maiores

Para as amostras estudadas, os elementos maiores de mais alta concentração foram o Silício (Si), seguido por Ferro (Fe), Potássio (K), e Enxofre (S), subordinariamente Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e Titânio (Ti). O alto conteúdo de Si apresentado nas amostras está relacionado à expressiva presença de silicatos, principalmente quartzo e subordinariamente caulinita, plagioclásio e K-feldspato. Os altos índices de Fe e S, principalmente nas frações de densidade maior, está diretamente relacionado à presença de pirita. As percentagens de Al, Ca e Ti, estão provavelmente relacionadas as fases minerais caulinita, plagioclásio e K-feldspato.

O percentual dos elementos é altamente variável ao longo do perfil densimétrico, o Si é o único que apresenta uma tendência clara de aumento de teor concomitantemente ao aumento das densidades, com valores variando de 5,71 á 39,68 % correspondendo aos intervalos <1,6 e 2,2-2,4 g/cm³ respectivamente (quadro 4). O conteúdo de Fe é variável, com um range de 4,53 á 28,06% com valores mais altos correspondendo à fração mais densa. O percentual de S varia de 3,4 á 13,59 %, os valores mais altos de S são atingidos sempre na fração mais densa do perfil, assim como o Fe, isso se deve ao fato de a pirita com sua alta densidade concentrar-se na fração mais densa. O conteúdo de Al apresenta uma variação de 0,0 á 14,52 %, vale destaque o comportamento peculiar desse elemento, que é encontrado na amostra bruta, nas frações de menor densidade, desaparece nas intermediárias, e reaparece na fração de maior densidade, esse comportamento se repete nas amostras dos três pontos. Como não

observou-se uma mudança mineralógica que justifique essa variação, acredita-se que essa mudança esteja relacionada a interações químicas entre os minerais que compõem a amostra e os líquidos orgânicos utilizados no ensaio de beneficiamento. O percentual de K varia de forma caótica com valores entre 2,43 á 13,28 %. O conteúdo de Ca e Ti não apresenta nenhuma tendência de variação com valores indo de 0,56 á 10,33 % e 0,66 á 2,59 % respectivamente.

	Densidade	Cinza	Si	Al	Fe	K	S	Ti	Ca	Total
Ponto 1	Bruta	59,5	23,81	11,37	10,99	6,40	4,25	1,24	1,03	59,09
	<1,6	27,0	8,59	0,18	9,54	2,55	4,25	0,66	0,71	26,48
	1,6-1,7	37,7	14,28	5,38	8,12	3,88	3,96	0,81	0,73	37,16
	1,7-1,8	45,7	19,17	0,00	12,11	6,39	4,74	1,31	0,90	44,62
	1,8-1,9	54,1	24,51	0,00	11,99	8,14	4,39	1,74	1,14	51,90
	1,9-2,0	59,1	27,68	0,00	11,84	8,97	4,11	1,86	1,17	55,63
	2,0-2,2	68,2	33,34	0,00	12,14	11,20	3,40	1,89	1,52	63,49
	2,2-2,4	78,2	39,68	0,00	14,23	13,28	3,52	2,59	1,74	75,03
>2,4	76,9	19,71	9,75	28,06	4,10	13,59	0,74	0,56	76,51	
Ponto 2	Bruta	59,70	21,27	10,87	10,59	6,06	4,91	1,27	4,04	59,00
	<1,6	26,10	7,69	2,98	4,53	2,43	3,94	0,68	3,36	25,62
	1,6-1,7	37,10	13,94	0,00	7,22	5,06	4,30	1,21	4,43	36,16
	1,7-1,8	45,20	19,12	0,00	9,04	6,92	4,59	1,47	2,86	43,99
	1,8-1,9	51,60	21,99	0,00	11,14	7,76	4,83	1,57	2,68	49,97
	1,9-2,0	56,50	23,79	0,00	13,63	8,52	5,34	1,53	1,92	54,72
	2,0-2,2	65,20	29,14	0,00	13,95	10,02	4,94	2,06	2,45	62,57
	2,2-2,4	75,40	34,95	0,00	14,30	11,65	4,09	2,50	5,52	73,00
>2,4	81,60	20,89	11,41	22,80	4,82	9,29	1,22	10,33	80,76	
Ponto 3	Bruta	55,90	20,98	12,02	11,58	6,18	5,53	1,40	1,61	59,30
	<1,6	25,80	5,71	3,90	5,42	2,48	4,40	0,87	1,45	24,24
	1,6-1,7	38,60	13,44	6,41	5,68	3,94	3,81	1,04	2,28	36,60
	1,7-1,8	47,00	19,28	0,00	9,49	6,59	4,65	1,61	2,31	43,94
	1,8-1,9	51,70	22,02	0,00	12,08	7,69	4,98	1,69	1,81	50,26
	1,9-2,0	58,90	23,43	0,00	13,81	8,28	4,88	1,90	2,67	54,98
	2,0-2,2	64,20	27,17	0,00	17,00	9,23	5,55	1,95	2,51	63,41
	2,2-2,4	77,50	34,45	0,00	17,98	12,43	4,29	2,41	1,72	73,28
>2,4	81,60	24,89	14,52	22,61	6,74	9,43	1,41	1,28	80,88	

Quadro 4: Concentração de elementos maiores em porcentagem na base do carvão.

4.6.2. Elementos Traços

Os elementos-traços estão apresentados no quadro 5, onde os teores são representados em parte por milhão (ppm). Os elementos mais abundantes são de Cromo (Cr), Zircônio (Zr), Vanádio (V) e Rubídio (Rb). Chama a atenção os altos teores de Bromo (Br) presentes em todas as amostras beneficiadas, a sua ausência nas amostras brutas serve como um bom indicador de que esse elemento é um contaminante advindo do Bromofórmio utilizado no beneficiamento.

	Densidade	Cinza	Cr	Zr	V	Rb	Sr	Ni	Cu	Zn	Mn	Y	Br	Pb	Ag	As
Ponto 1	Bruta	59,5	838,95	737,8	600,95	380,8	309,4	309,4	291,55	232,05	226,1	202,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	<1,6	27,0	405	990,9	405	132,3	202,5	0	340,2	677,7	259,2	234,9	1387,8	n.d.	n.d.	175,5
	1,6-1,7	37,7	591,89	682,37	467,48	324,22	211,12	301,6	294,06	320,45	n.d.	173,42	1907,62	n.d.	n.d.	105,56
	1,7-1,8	45,7	1037,39	n.d.	662,65	786,04	479,85	676,36	447,86	n.d.	n.d.	260,49	6297,46	n.d.	n.d.	123,39
	1,8-1,9	54,1	1228,07	n.d.	784,45	1455,29	643,79	670,84	432,8	292,14	357,06	286,73	14066	n.d.	1612,18	135,25
	1,9-2,0	59,1	1264,74	1518,87	738,75	1843,92	626,46	537,81	466,89	n.d.	n.d.	218,67	27103,26	n.d.	n.d.	330,96
	2,0-2,2	68,2	1227,6	1732,28	n.d.	2284,7	770,66	552,42	443,3	n.d.	n.d.	245,52	29210,06	n.d.	1923,24	409,2
	2,2-2,4	78,2	1055,7	1728,22	1274,66	2299,08	938,4	461,38	516,12	n.d.	n.d.	406,64	22459,04	n.d.	n.d.	578,68
>2,4	74,9	1273,3	269,64	359,52	14,98	149,8	359,52	262,15	239,68	426,93	179,76	n.d.	299,6	n.d.	n.d.	
Ponto 2	Bruta	59,70	1164,15	853,71	471,63	471,63	435,81	370,14	n.d.	191,04	973,11	179,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	<1,6	26,10	482,85	957,87	441,09	263,61	214,02	258,39	247,95	195,75	997,02	156,6	592,47	n.d.	n.d.	n.d.
	1,6-1,7	37,10	1083,32	1146,39	582,47	697,48	415,52	597,31	400,68	252,28	1343,02	218,89	2656,36	n.d.	n.d.	n.d.
	1,7-1,8	45,20	1351,48	1500,64	659,92	953,72	537,88	709,64	474,6	0	854,28	284,76	4723,4	n.d.	n.d.	n.d.
	1,8-1,9	51,60	1388,04	1470,6	706,92	1217,76	624,36	737,88	521,16	397,32	701,76	299,28	8245,68	n.d.	n.d.	n.d.
	1,9-2,0	56,50	1469	n.d.	813,6	1378,6	751,45	774,05	536,75	322,05	536,75	220,35	10972,3	n.d.	n.d.	n.d.
	2,0-2,2	65,20	1362,68	1545,24	984,52	1721,28	880,2	665,04	489	286,88	788,92	286,88	17310,6	n.d.	n.d.	n.d.
	2,2-2,4	75,40	1425,06	n.d.	882,18	1839,76	1221,48	573,04	610,74	n.d.	1628,64	309,14	15502,24	n.d.	n.d.	n.d.
>2,4	81,60	1281,12	628,32	391,68	252,96	432,48	408	318,24	n.d.	2146,08	146,88	2023,68	n.d.	n.d.	367,2	
Ponto 3	Bruta	55,90	793,78	n.d.	793,78	346,58	469,56	n.d.	290,68	324,22	469,56	206,83	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	<1,6	25,80	291,54	1109,4	771,42	278,64	203,82	n.d.	247,68	1274,52	500,52	170,28	629,52	n.d.	n.d.	n.d.
	1,6-1,7	38,60	741,12	n.d.	679,36	447,76	339,68	347,4	308,8	409,16	768,14	154,4	976,58	n.d.	n.d.	n.d.
	1,7-1,8	47,00	1297,2	n.d.	1066,9	940	676,8	n.d.	460,6	808,4	770,8	263,2	3933,9	n.d.	1066,9	n.d.
	1,8-1,9	51,70	1344,2	1354,54	940,94	1116,72	687,61	677,27	537,68	832,37	584,21	320,54	5009,73	n.d.	n.d.	n.d.
	1,9-2,0	58,90	1348,81	1413,6	1042,53	1242,79	789,26	712,69	589	353,4	930,62	341,62	7062,11	n.d.	n.d.	n.d.
	2,0-2,2	64,20	1335,36	n.d.	879,54	1335,36	930,9	680,52	526,44	353,1	1014,36	333,84	10265,58	n.d.	n.d.	n.d.
	2,2-2,4	77,50	1379,5	1751,5	1209	1953	1108,25	697,5	604,5	472,75	682	317,75	11632,75	n.d.	n.d.	n.d.
>2,4	81,60	1101,6	758,88	538,56	228,48	416,16	375,36	293,76	473,28	579,36	195,84	1925,76	301,92	n.d.	48,96	

Quadro 5: Concentração de elementos traços em parte por milhão (ppm), n.d.= não identificado .

4.7 Índice de Inchamento Livre FSI

As amostras apresentaram um índice de FSI de valor 1 (quadro 6), o que indica a quase inexistência de propriedades plásticas e um baixo poder aglutinante. Isso pode-se explicar pelo alta porcentagem de cinza nas amostras e a porcentagem baixa à intermediária de macerais reativos. Por não possuir um inchamento significativo, pode-se dizer de antemão que as amostras estudadas não são interessantes para fabricação de coque. Para utilização como recurso energético, o carvão que possuir poder aglutinante baixo torna-se interessante, pois evita a formação de cascões nas caldeiras.

	Densidades(g/cm ³)	Cinza (%)	FSI	Reativos (%)
Ponto 1	Bruta	59,5	1,0	23,7
	<1,6	27,0	1,0	50,7
	1,6-1,7	37,7	1,0	34,5
Ponto 2	Bruta	59,7	1,0	25,7
	<1,6	26,1	1,0	48,2
	1,6-1,7	37,1	1,0	38,6
Ponto 3	Bruta	55,9	1,0	36,6
	<1,6	25,8	1,0	51,1
	1,6-1,7	38,6	1,0	32,7

Quadro 6: Índice de inchamento livre.

4.8 Fusibilidade Da Cinza

Para os carvões da camada Bonito, a microscopia de aquecimento das cinzas em meio oxidante (O₂), indicou temperaturas variando de 1250 a 1520°C para a amostra coletada no ponto 1, 1210 a 1440°C para o ponto 2 e 1240 a 1520°C para o ponto 3 (apêndice C).

Os valores mais altos de fusibilidade ocorrem em amostras do ponto 3 (figura 29) que apresenta 1290 °C para início da deformação e 1520 °C para temperatura de fluidez. Em contrapartida, os valores mais

baixos são encontrados no ponto 2 que apresenta fusão iniciando-se a 1210 °C e atingindo temperatura de fluidez em 1420 °C.

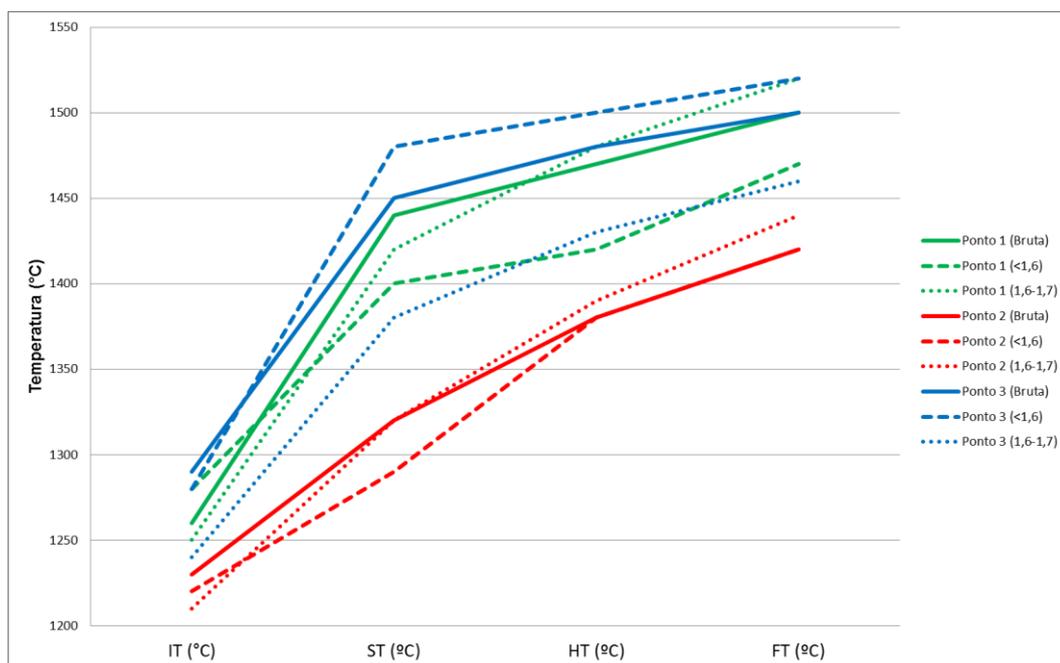


Figura 29: Temperatura versus estágios de fusibilidade.

De forma sucinta, as baixas temperaturas de fusibilidade do ponto 2, estão relacionadas ao aumento das proporções de calcita, plagioclásios e K-feldspatos, considerados minerais fundentes. Já as cinzas com alta temperatura de fusibilidade, resultam do decréscimo da concentração de minerais fundentes e aumento da quantidade de mineiras e fazes refratárias tais como quartzo, caulinita e pirita, tal como o Ponto 3.

4.9 Análises Petrográficas

4.9.1. Reflectância da Vitrinita em amostras da camada Bonito

Os resultados revelaram uma distribuição homogênea dos valores da reflectância $R_{random}(\%)$ nas amostras da camada Bonito, mostrando

um valor médio de 0,77%. Para os Pontos 1,2 e 3, foram obtidos valores de 0,78%, 0,78% e 0,75 % respectivamente (apêndice D).

Os resultados obtidos permitiram sugerir para os três pontos, um *rank* de carvão Betuminoso Alto Volátil B (figura 30), mesmo nível de *rank* obtido por poder calorífico (figura 28).

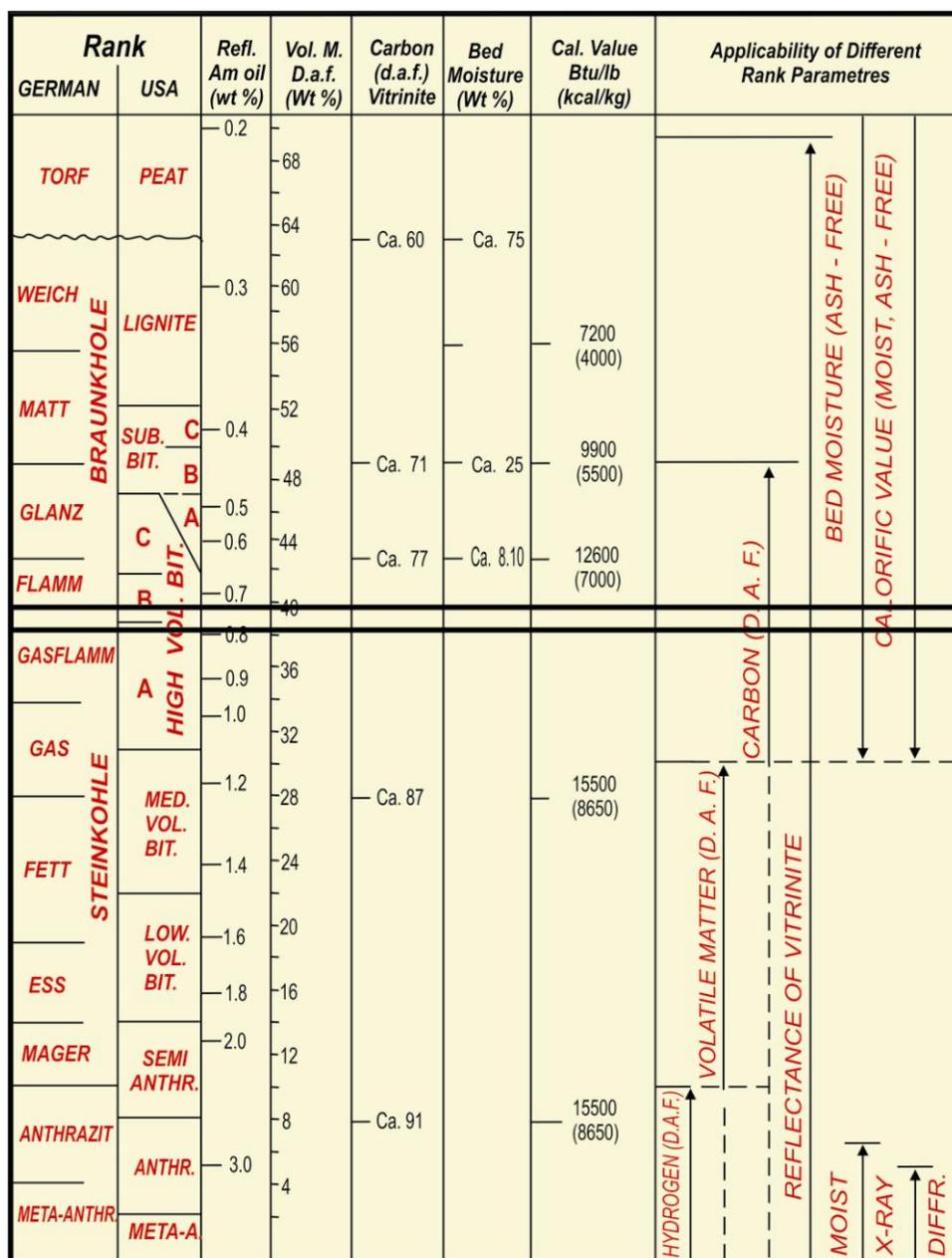


Figura 30: Diagrama de Taylor *et al.* (1998) utilizado para indicação do grau de carbonificação das amostras de carvão. Destaque em quadro preto para o intervalo de reflectância observado na camada Bonito.

4.9.2. Análise de Macerais

Os resultados das análises petrográficas são sempre expressos em porcentagem em volume.

4.9.2.1. Amostras Brutas da camada Bonito

A composição petrográfica das amostras brutas (sem matéria mineral) é variável (figura 31). A Vitrinita apresenta uma variação de 21,7 a 46,2 %tendo como maceral mais importante a colodetrinita. A Liptininita varia de 10,4 a 29,0 %tendo como maceral de maior ocorrência a esporininita. E a Inertinita varia de 38,1 a 49,3 %tendo como maceral mais abundante a inertodetrinita (Apêndice E). A camada no ponto 1 apresenta o grupo da inertinita como maceral mais abundante, já para os pontos 2 e 3 os macerais do grupo da vitrinita são ligeiramente mais abundante, com valores quase equivalentes de inertinita.

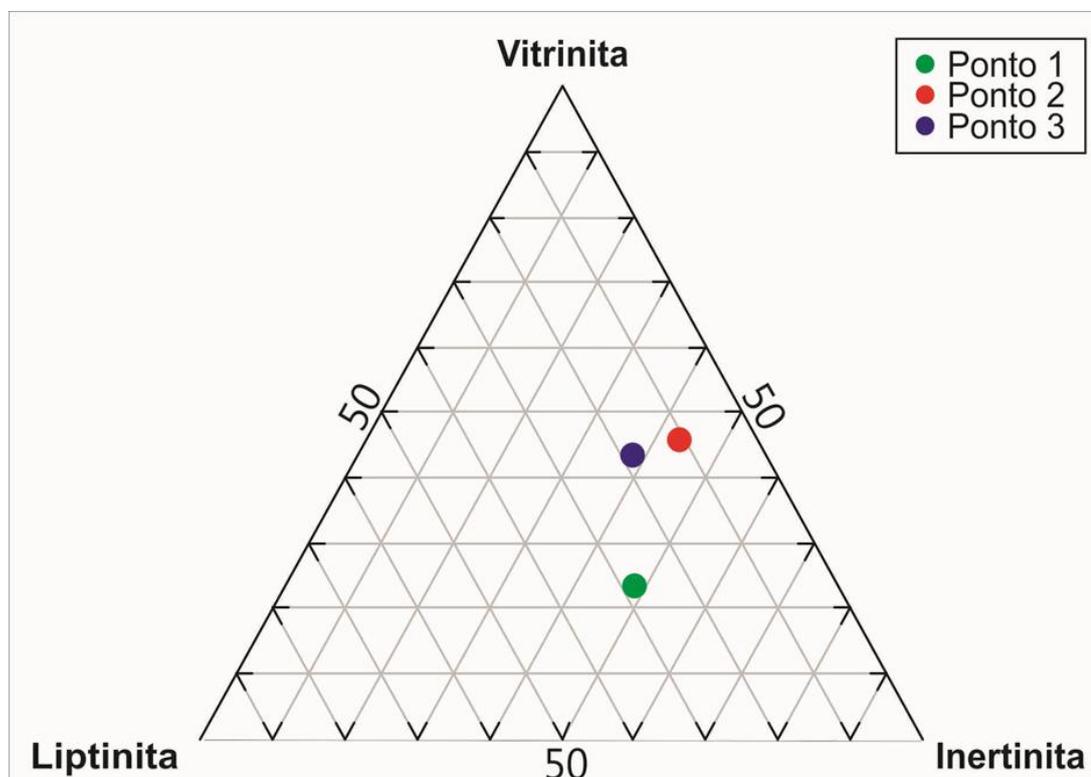


Figura 31: Diagrama ternário mostrando a composição de grupos de macerais (sem matéria mineral) das amostras brutas da camada Bonito (vol.%).

Incluindo a matéria mineral, o grupo vitrinita apresenta um range de 9 a 24 %, liptinita 4,4 a 12 % e inertinita de 18,4 a 21,2%. A matéria mineral determinada por análise microscópica apresenta um range de 44,4 a 58,6 % (Apêndice E). Dentro da matéria mineral, a argila é o mais abundante com valores variando de 38,6 a 50,2 % secundariamente ocorre, quartzo, pirita e carbonato.

4.9.2.2. Amostras Beneficiadas

A composição petrográfica das amostras que passaram por beneficiamento é altamente variável. No caso da vitrinita (figura 32), ela apresenta os maiores valores de ocorrência na fração mais leve, significando que ela tem suas partículas predominantemente com densidade relativa menor que 1,6 g/cm³. Com o aumento progressivo da densidade de separação, sua proporção de ocorrência cai de forma linear, porém na densidade > 2,4 g/cm³ observa-se uma inversão na tendência de queda, possivelmente causada por partículas de vitrinita que associadas à pirita acabam perdurando até densidades maiores no beneficiamento.

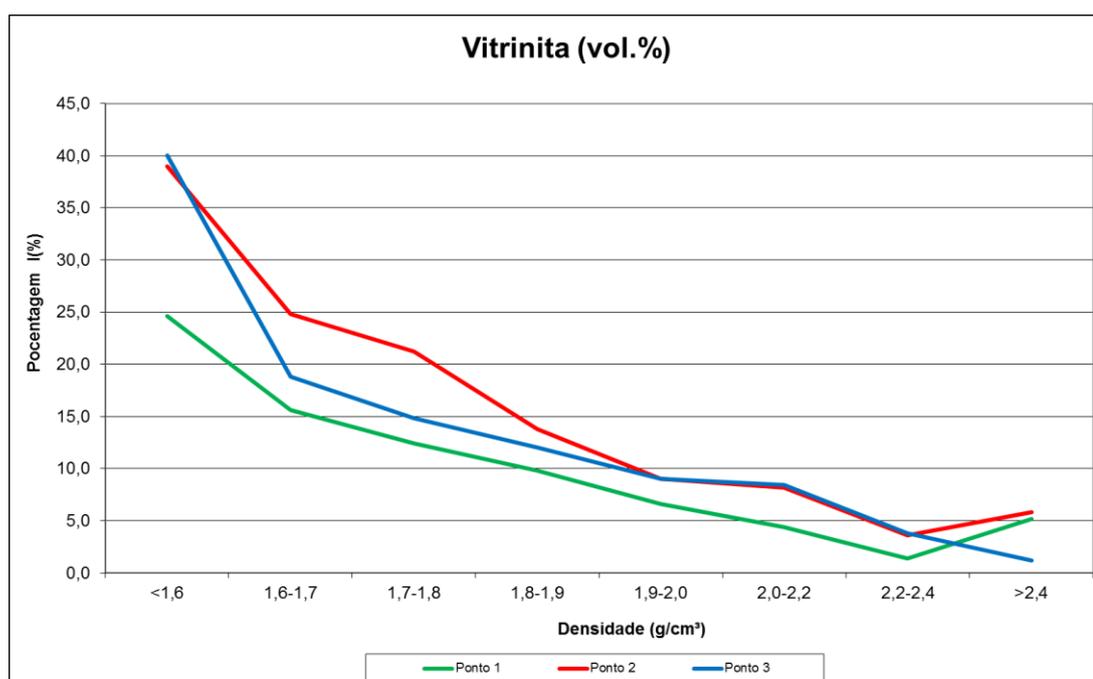


Figura 32: Gráfico de porcentagem de vitrinita versus densidade.

A inertinita (figura 33) apresenta ocorrência significativa entre os intervalos de <1,6 a 1,8-1,9 g/cm³, com os maiores valores de ocorrência na fração 1,6-1,7 g/cm³. Observa-se que a partir da fração 1,9 g/cm³, com o aumento progressivo da densidade, sua proporção de ocorrência apresenta uma tendência linear de queda.

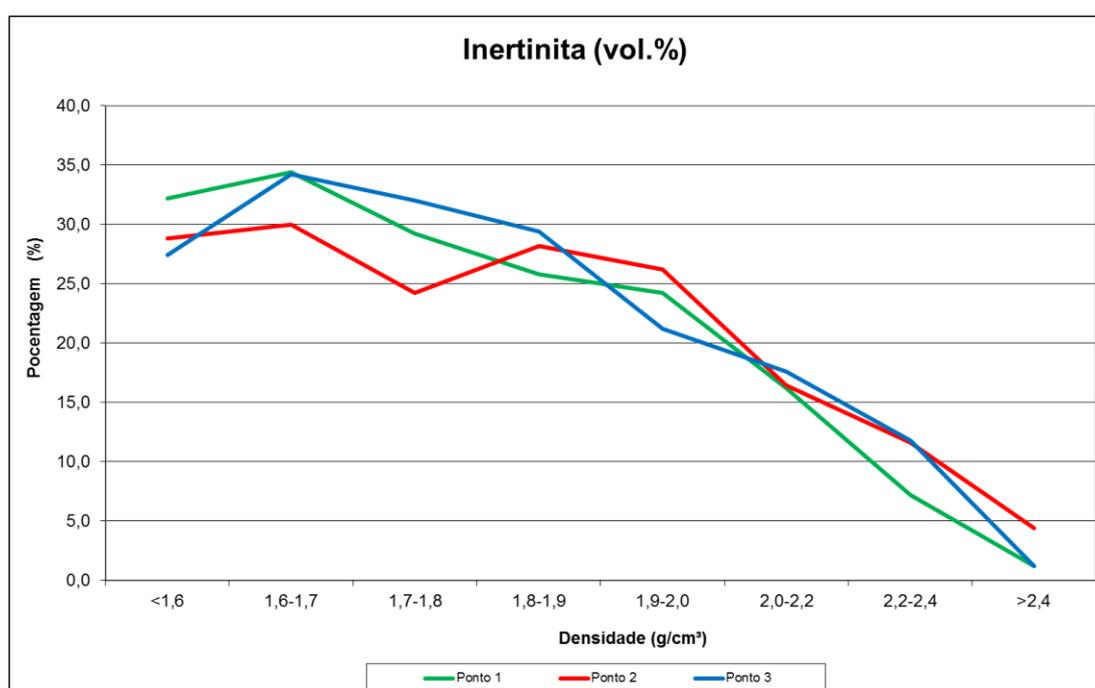


Figura 33: Gráfico de porcentagem de inertinita versus densidade

A liptinita (figura 34) não apresenta nenhum tipo de padrão de comportamento com o nível de densidade, apesar de segundo a bibliografia ela ser o grupo maceral de mais baixa densidade. Esse arranjo caótico pode ser explicado pela natureza das partículas de liptinita, que tem como origem partes vegetais como esporos, cutículas e resinas. Esses materiais de pequeno tamanho normalmente ocorrem dispersos dentro do material carbonoso ou da matéria mineral, por consequência, em granulometrias grossas não se consegue uma desagregação das partículas de liptinita, e por consequência elas não são separadas de forma ordenada pela diferença de densidade.

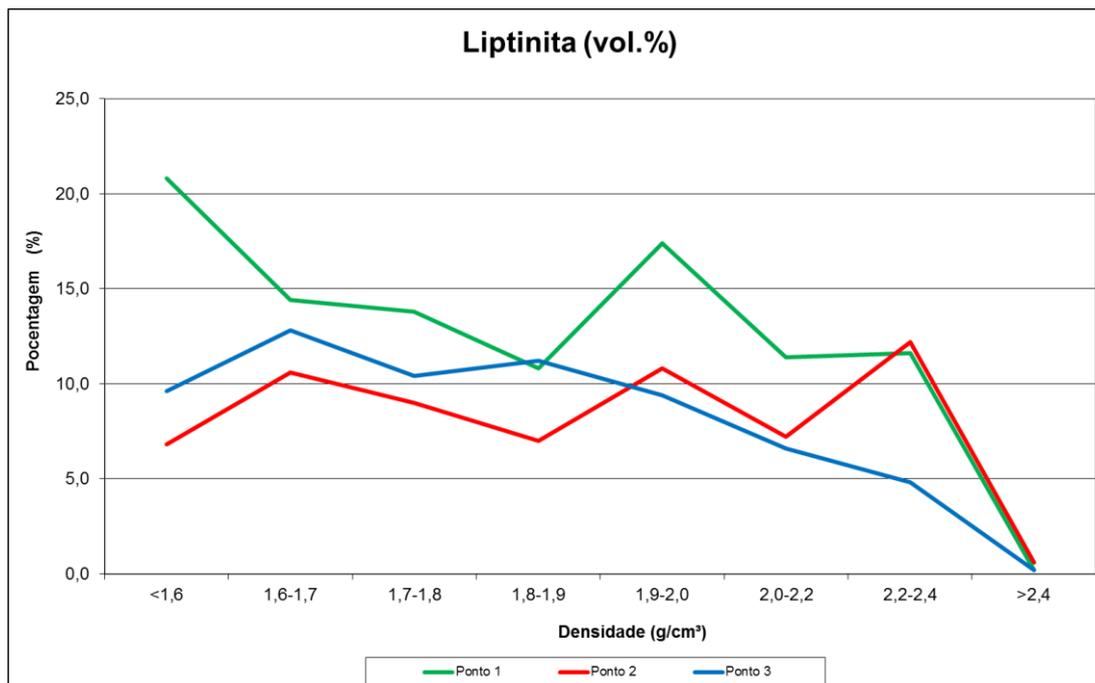


Figura 34: Gráfico de porcentagem de liptinita versus densidade

A matéria mineral apresenta os menores valores na fração de menor densidade, com o aumento progressivo da densidade sua proporção de apresenta uma tendência linear de aumento (figura 35), o mineral mais abundante é a argila, com exceção da fração de maior densidade onde argila e pirita se equivalem (apêndice E).

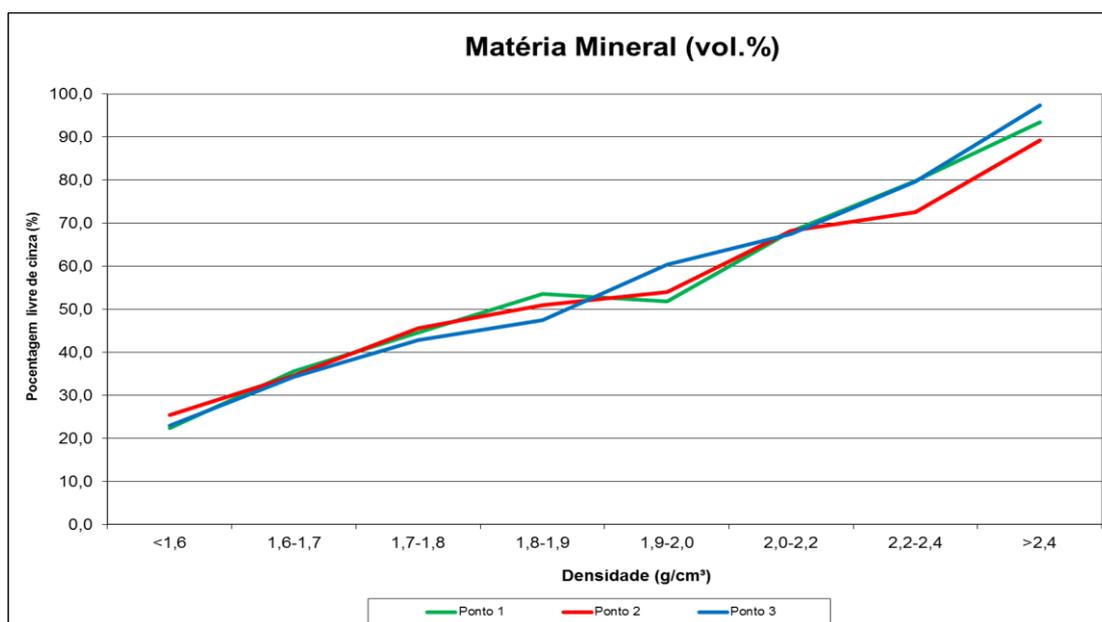


Figura 35: Gráfico de porcentagem de matéria mineral versus densidade

4.9.3. Classificação

O sistema de classificação internacional (figura 36), fornece um quadro geral para que carvões possam ser avaliados, ao contrário do *rank* que fornece unicamente informações sobre o estágio de carbonificação, a classificação unificada leva em consideração informações de conteúdo de vitrinite e teor de cinzas. Para as amostras brutas da camada Bonito obteve-se uma classificação para o ponto 1 de (Médio Rank C, Baixa Vitrinite, Alta cinza), para o ponto 2 de (Médio Rank C, Média Vitrinite, Alta cinza) e para o ponto 3 (Médio Rank C, Média Vitrinite, Alta cinza).

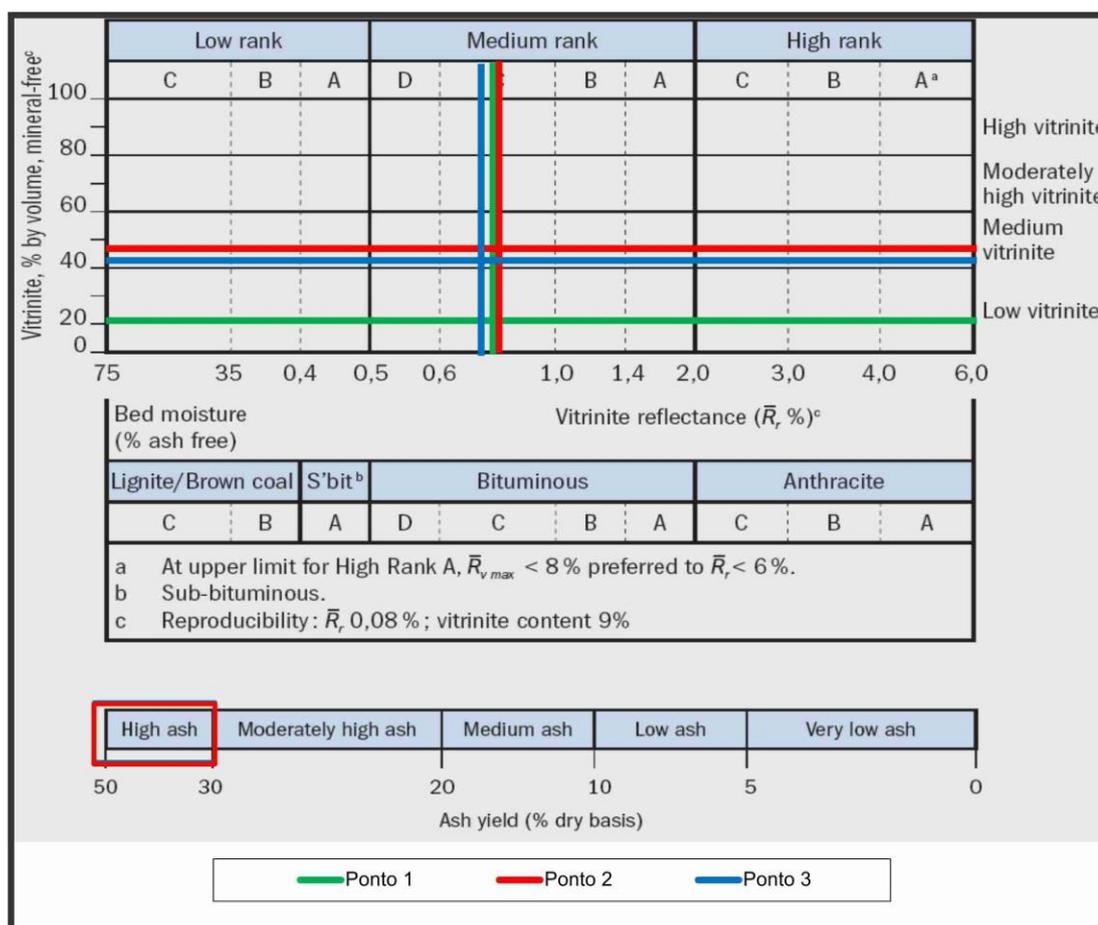


Figura 36: Classificação ISO 11760 para as amostras dos pontos do trabalho.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A camada Bonito apresenta um predomínio de litotipos do tipo fosco, com uma tendência de enriquecimento em fosco em direção ao topo da camada. Essa característica nos permite inferir um ambiente com lamina d'água profunda na turfeira no momento da deposição da camada. A abundância do litotipo fosco reflete-se no alto teor de cinzas apresentado pela da camada, nunca inferior a 55 %, e no fato de Inertinita ser o grupo maceral mais abundante.

Os valores de reflectância da Vitrinita para as amostras da camada Bonito mostraram-se homogêneos, indicando um *rank* de betuminoso alto volátil B para a camada em ambos os pontos. A camada Bonito em suas amostras brutas tem o grupo da Inertinita como mais abundante, tendo a inertodetrinita como maceral mais abundante.

O carvão da camada Bonito, não apresenta uma boa liberação orgânico-inorgânico no beneficiamento gravimétrico. Isso deve-se a natureza da matéria mineral, que encontra-se finamente dispersa no carvão da camada, carvão este que é composto predominantemente por uma intercalação á nível milimétrico, entre carvão fosco e carvão brilhante como mostrado nos perfis.

Nas amostras de carvão da camada Bonito submetidas a beneficiamento observa-se que com o aumento da densidade dos líquidos utilizados, ocorre um aumento gradativo do teor de cinzas, e inverso a

isso, uma queda nos valores de matéria volátil, poder calorífico e carbono fixo.

Quartzo, caulinita e pirita são as fases minerais predominantes na fração inorgânica da camada, apresentando-se a presença significativa de calcita nas amostras do ponto 2, o que possivelmente está ligado aos mais baixos valores de fusibilidade da cinza apresentados pelas amostras desse ponto, visto que a calcita é tida como um mineral fundente.

A Camada Bonito apresentou um teor de cinza mínimo de 26 %, o que fica acima do limite teórico para carvões coqueificantes, corroborando com esse dado, as amostras que tiveram o seu FSI analisado não apresentaram valores maiores que 1, condição obrigatória para que um carvão seja coqueificável, isso deve-se principalmente à predominância de macerais não reativos (inertinita) sobre reativos (vitritina) na composição da camada e do alto teor de cinzas, apesar de seu *rank* estar em patamares fracamente aglutinantes. A camada Bonito individualmente não apresentou frações coqueificáveis para a metodologia de beneficiamento utilizada neste trabalho, porém o carvão da camada pode ser utilizado na siderurgia, para a formação de misturas com carvão importado.

Em contrapartida as amostras apresentaram um alto potencial para obtenção de carvão vapor (energético), com teores de cinza em torno de 44% facilmente obtíveis por beneficiamento e com uma recuperação alta, em torno de 60 % de massa. Os valores para poder calorífico, matéria volátil e temperatura de fusão das cinzas obtidos também estão dentro das especificações para utilização como carvão vapor.

BIBLIOGRAFIA

- Aboarrage, A. M. & Lopes, R. da C. *Projeto A Borda Leste da Bacia do paraná: integração geológica e avaliação econmica*. Porto Alegre : DNPM/CPRM, 1986. 18 v
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1983. *Amostragem de carvão mineral bruto e/ou beneficiado*. Rio de Janeiro, ABNT, 30p . (NBR 8291)
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1985. *Ensaio densimétricos*. Rio de Janeiro, ABNT, 9p. (NBR 8738)
- Aborrage, A.M. & Lopes, R.C.1986. *Projeto A Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econmica*. Porto Alegre, DNPM/CPRM.18 v.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 1991. Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05. *Standard Test Methods for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. Philadelphia, PA. ASTM. p. 324-325. (D 3173-87)
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 199. *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Sec. 05.05.ASTM.p.326-328. (D 3174-89)
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 1991. *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05.ASTM.p.329-331. (D 3175-89a)
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 1991. *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Sec 05.05.ASTM.p.266-273. (D 2015-91)
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 2007. *Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Section 5, Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, V. 05.06: Gaseous Fuels; Coal and Coke, p. 11. (D 2013)
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 2010. *Standard Test Method for Expansion or Contraction of Coal by the Sole-Heated Oven*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Section 5: Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, V. 05.06 Gaseous Fuels; Coal and Coke. p. 11. (D 2014)
- ASTM. American Society for Testing and Materials.2011. *Standart Practice for Mechanical Sampling of Coal*. Philadelphia, Pa. Annual Book of ASTM Standards. Section 5: Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, V. 05.06 Gaseous Fuels; Coal and Coke. (D 2014)
- ASTM. American Society for Testing and Materials.2010. *Standart Test Method for Free-Swelling Index Coal*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Section 5: Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, V. 05.06 Gaseous Fuels; Coal and Coke. (D 720)
- ASTM. American Society for Testing and Materials. 2010. *Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Section 5: Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, V. 05.06 Gaseous Fuels; Coal and Coke. (D 5373)

- ASTM. American Society for Testing and Materials. 2010. *Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash*. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standards. Section 5: Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, V. 05.06 Gaseous Fuels; Coal and Coke. (D 1857)
- Bertol, M.A.; César, S. B.; Maciel, L.A.C. ; Muller, A.A.; Santos, H.M. e Schimitt, J.C.C. - 1987 - *Perfil Analítico do Carvão* - Porto Alegre - DNPM - 140 p.
- Brown, M.T. 2011. *Caracterização petrológica e química dos carvões utilizados em usinas termelétricas brasileiras e as cinzas geradas no processo de combustão*. Porto Alegre, 101 p. Dissertação de Mestrado, PPGeo/IG-UFRGS.
- Bustin, R.M., Cameron, A., Grieve, D., Kalkreuth, W. 1989. *Coal Petrology – Its Principles, Methods and Applications*, 3rd Ed. Geological Association of Canada, Short Course Notes, Victoria, British Columbia, 230p.
- Caye, B. R; Pozza, E. V; Fabricio, J. A. C; Suffert, T. 1975. *Projeto carvão no pré-Barro Branco*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, 75p.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil. *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos. Folha de Criciúma – SH.22-X-B. escala 1:250.000.*
- COLUNA WHITE. Estratigrafia da bacia do Paraná no sul do estado de Santa Catarina, Brasil. Florianópolis: Secretaria de Estado da Tecnologia, Energia e Meio Ambiente, 1994. 68 p. Série Textos Básicos de Geologia e Recursos Minerais de Santa Catarina, n. 4.
- Corrêa da Silva, Z.C. 2004. Coal facies studies in Brazil: a short review. *International Journal of Coal Geology*, vol. 58, pp. 119-124.
- Diessel, C., 1965. *Correlation of macro-and micropetrography of some New South Wales coals*. Proceedings 8th Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, vol.6, p. 669-677.
- DNPM. Informativo Anual da Indústria Carbonífera, 2000. Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral. Inf. An. Carbonif. Brasília, Ano XV, Jul. 2000, 217 pp.
- Ferreira, K.S. 2012. *Caracterização das camadas superiores e inferiores da jazida de Candiota para estudos futuros de beneficiamento gravimétrico visando o uso energético*. Porto Alegre, 210p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Garavaglia, L, Biléssimo, L.D., Gomes, C.J.B. 2011 Avaliação Tecnológica para o emprego do carvão da camada Bonito na geração termoelétrica e aproveitamento através de tecnologias limpas. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO, 3., 2011,. Gramado. *Anais*. Gramado, CD-ROM
- Hagemann, H.W.; Hollerbach, A. 1979. Relationship Between the Macropetrographic and Organic Geochemical Composition of Lignites. In: Douglas, A .G. (Ed.) *Advances in Organic Geochemistry*. Pergamon Press: p.631-638.
- Hough, D. C., Sanyal, A., 1987. The role of petrography in the classification and combustion of coal. In: *Energy World* , no 146, p.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.

ICCP, 1998. The new vitrinite classification. International Committee for Coal and Organic and Petrology (ICCP System 1994). *Fuel* 77, p. 349–358.

ICCP, 2001. The new inertinite classification. International Committee for Organic and Coal Petrology, ICCP System, *Fuel* 80, p. 459–471.

Ika Werke, 2000. Manual IKA Calorimeter System, C2000 basic/ C2000 control. Operating instructions. USA. Disponível em: <www.ika.net>. Acesso em: 10 set. 2011.

ISO-7404/5, 1984. Methods for the Petrographic Analysis of Bituminous Coal and Anthracite. Part 5: *Method of determining Microscopically the Reflectance of Vitrinite*. 11p. (First Edition).

ISO-7404/3. 1985. Methods for the Petrographic Analysis of Bituminous Coal and Anthracite. Part 3. *Methods of determining maceral group composition*. 4p.

ISO-11760, 2005. *Classification of Coals*. (First Edition). Disponível em: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38898 acessado em: mar.2009.

Kalkreuth, W. and Leckie, D.A. (1989): Sedimentological and petrographical characteristics of Cretaceous strand plain coals: a model for coal accumulation from the North American western interior sea way. In: , Lyons, P.C. and Alpern, B., (Ed) *Peat and Coal: Origin, Facies and Depositional Models; International Journal of Coal Geology*, Vol. 12, p. 381–424.

Kalkreuth, W., Holz, M., Kern, M.L., Machado, G., Mexias, A., Silva, M.B., Willet, 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, Brasil. *International Journal of Coal Geology*, 68, p. 79-116.

Kalkreuth, W., Holz, M.; Mexias, A.; Balbinot, M.; Levandowski, J., Willet, J., Finkelman, R., Burger, H. 2010. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 84: p.213-236.

KSG - Kentucky Geological survey. Disponível em: <http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm> Acesso: 05 dez. 2012.

Kern, M. L. 2002. *Avaliação do potencial gerador de metano das jazidas de Chico Lomã e Santa Terezinha, nordeste do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 182p. Dissertação de Mestrado, PPGeo/ IG-UFRGS.

Krebs, A. S. J.; Grazia, C. A.; Amaral, J. E.; Casé, M. G.; Branco, P. DE M.; Oliveira, R. L.; Silva, V. R. 1982. *Programa carvão energético no estado de Santa Catarina: relatório final*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, 5 V. 82 p.

Krebs, A. S. J. 1983. *Projeto carvão na área da Mina Esperança: relatório final de pesquisa*. Porto Alegre: DNPM/CPRM, 92 p.

Levandowski, J. 2009. *Petrologia e Geoquímica das camadas de carvão e sua relação com gás natural determinado no poço CBM 001-ST-RS, Bacia do Paraná*. Porto Alegre, 81 p. Dissertação de Mestrado, PPGeo/IG-UFRGS.

McClung, J.D., Geer, M.R., 1979. Properties of Coal and coal impurities. In: Leonard, J.W. *Coal Preparation*. New York: The American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, INC, 1-19p.

- Marchioni, D.L., 1980. Petrography and depositional environment of the Liddell Seam, Upper Hunter Valley, New South Wales. *International Journal of Coal Geology*, 1: p.35-61.
- Marchioni, D. L. and Kalkreuth, W., 1991. Coal facies interpretations based on lithotypes and maceral variations in Lower Cretaceous (Gates Formation) coals of Western Canada. *International Journal of Coal Geology*, 18: p.125-162.
- Monteiro, C.V. 2004. *O Combustível de Ontem*. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra Brasil, p. 80.
- Milani, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. Porto Alegre, 225p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milani, E.J. & Ramos, V.A. 1998. Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*. 28(4):473-484.
- Milani, E.J. 2000. *Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental e a Evolução Geológica da Bacia do Paraná*. In: Holz, M.; De Ros, L.F. (eds) *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/UFRGS. 275-302 p.
- Milani, E.J., França, A.B., Schneider, R.L. 2004. Bacia do Paraná. In: *Cartas Estratigráficas das Bacias Sedimentares Brasileiras*. Feijó, F.J. (editor), Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da Petrobras, 8, p. 68-82 p.
- Osório, E., Vilela, A.C.F., Sampaio, C.H. 2008. *Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos*. Brasília: 24 p : il. 2008. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/rede_carvao/21%20Nota%20tecnica_Carvao%20Mineral%20e%20Coque_03.pdf> Acesso em: 16 de outubro de 2011.
- Redivo, R.V. 2002. *Caracterização Tecnológica Do Carvão Das Camadas Barro Branco e Bonito Para Fins Energéticos na Região de Criciúma – SC*. São Paulo, 95. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade De São Paulo.
- Ruiz, A. S. 2009. *Flotação do Carvão Contido no Rejeito da Barragem El Cantor*, São Paulo, 94 p. Dissertação de Mestrado, Departamento de engenharia de minas e de petróleo/USP São Paulo.
- SAMPAIO, C. H. ; TAVARES, L. M. M. 2005. *Beneficiamento Gravimétrico: Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade*. 1. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS. 603 p.
- Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. & Nogueira, A.A. 1974. *Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBG, v.1, p. 41-66.
- Schopf, J.M. 1956. A definition of coal. *Economic Geology*, 51: 521-527.
- Sibilia, J.P., A guide to materials characterization and chemical analysis. Morristown: VCH Publishers, 1988.
- Simão, G., Zilli, C., Kalkreuth, W. 2012 *Análises Petrográficas e Físico-Químicas em Diferentes Frações Densimétricas dos Carvões das Camadas Barro Branco e Bonito Inferior da Jazida Sul Catarinense*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santo. *Anais...* Santos, SBG, Cd-Rom

Suárez-Ruiz, I., Crelling, J.C. 2008. *Applied Coal Petrology: The Role of Petrology in Coal Utilization*. London: Elsevier, 388 p.,.

Stach, E., Mackowsky, M.Th., Teichmüller, M., Taylor, G., Chandra, G., Teichmüller, R. 1982. *Coal Petrology*, 3.ed. Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger. 535p.

Stopes, M. C. 1919. *On the four visible ingredients in banded bituminous coals*. Proceedings of the Royal Society Bull., v. 90, p. 470-487.,.

Süffert, Telmo, 1997. *Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina -Porto Alegre* : CPRM, 40p.

White, I. C. 1908. *Relatório final da comissão de estudos das minas de carvão de pedra no Brasil*. Rio de Janeiro: DNPM, 300p.

Taulbee, D.N., Poe, S.H., Robl, T.L., and Keogh, R., 1989. Density gradient centrifugation separation and characterization of macerals groups from a mixed maceral bituminous coal. *Energy & Fuels*, 3, p. 662-670.

Taylor, G.H., Teichmüller, Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R & Robert, P. 1998. *Organic Petrology*. Berlin, 704p.

Zalán, P. V.; Wolf, S.; Conceição, J. C.; Marques, A.; Astolfi, M. A.; Vieira, I. S.; Appi, V. T.; Zanotto, O. A. 1990. Bacia do Paraná. In: Gabaglia, G. P. R.; Milani, E. J. (Eds.), *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*. Petrobras, Rio de Janeiro, pp. 135–168.

Apêndice A

Quadro A1: Contendo todos os resultados de análises imediatas e poder calorífico superior (PCS) para as amostras dos três pontos do trabalho expressos em % em peso.

		Densidades	Cinza (%)	Umidade (%)	Mat. Vol. (%)	Mat. Vol (daf)	Carb. Fixo (%)	PCS	PC (d.a.f %) Cal/g
12-067	Ponto 1	Bruta	59,5	3,6	18,0	35,6	22,5	2708,0	6936,1
12-147		<1,6	27,0	2,0	27,1	34,4	45,9	5891,0	8234,6
12-148		1,6-1,7	37,7	2,7	26,1	37,6	36,2	4947,0	8161,0
12-149		1,7-1,8	45,7	3,4	23,1	36,3	31,2	4128,0	7869,8
12-150		1,8-1,9	54,1	2,7	20,2	38,1	25,7	3359,0	7521,2
12-151		1,9-2,0	59,1	3,5	18,2	35,9	22,7	2857,0	7238,7
12-152		2,0-2,2	68,2	3,4	16,1	39,9	15,7	2037,0	6631,1
12-153		2,2-2,4	78,2	3,4	14,8	52,3	7,0	1093,0	5190,2
12-154		>2,4	76,9	2,2	17,5	66,2	5,6	1397,0	6183,7
		Densidades	Cinza (%)	Umidade (%)	Mat. Vol. (%)	Mat. Vol (daf)	Carb. Fixo (%)	PCS	PC (d.a.f %) Cal/g
12-068	Ponto 2	Bruta	59,7	3,5	19,3	39,2	21,0	2870,5	7381,2
12-155		<1,6	26,1	1,0	28,7	37,5	45,2	5968,0	8157,4
12-156		1,6-1,7	37,1	0,7	25,4	39,3	37,5	5010,5	8022,0
12-157		1,7-1,8	45,2	1,4	22,6	38,7	32,2	4217,0	7804,5
12-158		1,8-1,9	51,6	1,5	20,7	39,7	27,7	3554,0	7454,8
12-159		1,9-2,0	56,5	1,1	18,7	40,5	24,8	3023,5	7027,9
12-160		2,0-2,2	65,2	1,9	17,3	44,3	17,5	2339,5	6852,9
12-161		2,2-2,4	75,4	2,3	15,2	52,4	9,4	1316,0	5475,5
12-162		>2,4	81,6	1,9	16,6	79,9	1,8	827,0	4581,6
		Densidades	Cinza (%)	Umidade (%)	Mat. Vol. (%)	Mat. Vol (daf)	Carb. Fixo (%)	PCS	PC (d.a.f %) Cal/g
12-069	Ponto 3	Bruta	55,9	3,6	20,9	39,2	23,2	3152,0	7414,3
12-163		<1,6	25,8	5,5	31,1	34,5	43,1	6205,0	8849,2
12-164		1,6-1,7	38,6	2,5	26,0	38,3	35,4	4884,0	8158,4
12-165		1,7-1,8	47,0	1,6	21,2	37,0	31,8	4150,0	7957,5
12-166		1,8-1,9	51,7	6,9	21,2	29,6	27,1	3640,0	8094,8
12-167		1,9-2,0	58,9	7,0	18,7	28,5	22,4	2945,0	7704,8
12-168		2,0-2,2	64,2	2,4	14,5	33,8	21,3	2497,0	7146,4
12-169		2,2-2,4	77,5	3,6	12,8	40,9	9,7	1271,0	5859,8
12-170		>2,4	81,6	3,5	13,6	54,9	4,8	854,0	4809,6

Apêndice B

Quadro B1: Dados utilizados de beneficiamento do ponto 1.

CAMADA BONITO - CARBONIFERA CATARINENSE - BONITO I - FRAÇÃO -25 + 1 mm									
FRAÇÕES					FLUTUADO		AFUNDADO		NGM
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm3)	Massa (g)	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	Somatório de Massa (M1) (%)	Teor de cinzas Massa acumulada	Somatório de Massa (M2)	Teor de cinzas Massa acumulada	
-1,6	1,6	195,2	3,53	27,00	3,53	27,00	100,00	59,70	-
+1,6 -1,7	1,7	550,8	9,96	37,70	13,49	34,90	96,47	60,90	25,15
+1,7 -1,8	1,8	840,1	15,19	45,70	28,68	40,62	86,51	63,57	27,53
+1,8 -1,9	1,9	682,3	12,34	54,10	41,02	44,67	71,32	67,37	27,50
+1,9 -2,0	2,0	838,6	15,16	59,10	56,19	48,57	58,98	70,15	32,39
+2,0 -2,2	2,2	952,7	17,23	68,20	73,41	53,18	43,81	73,97	33,93
+2,2 -2,4	2,4	923,4	16,70	78,20	90,11	57,81	26,59	77,72	26,59
+2,4	2,4	546,8	9,89	76,90	100,00	59,70	9,89	76,90	-
TOTAL	-	5529,9	100,0	59,70	-	-	-	-	-

Quadro B2: Dados de beneficiamento do ponto 2.

CAMADA BONITO - CARBONIFERA RIO DESERTO - CRUZ DE MALTA - FRAÇÃO -25 + 1 mm									
FRAÇÕES					FLUTUADO		AFUNDADO		NGM
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm3)	Massa (g)	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	Somatório de Massa (M1) (%)	Teor de cinzas Massa acumulada	Somatório de Massa (M2)	Teor de cinzas Massa acumulada	
-1,6	1,6	991,9	9,66	26,10	9,66	26,10	100,00	58,59	-
+1,6 -1,7	1,7	1444,7	14,07	37,10	23,72	32,62	90,34	62,07	28,39
+1,7 -1,8	1,8	1470,9	14,32	45,20	38,05	37,36	76,28	66,67	23,96
+1,8 -1,9	1,9	989,9	9,64	51,60	47,68	40,24	61,95	71,64	16,34
+1,9 -2,0	2,0	688,1	6,70	56,50	54,38	42,24	52,32	75,33	13,91
+2,0 -2,2	2,2	740,9	7,21	65,20	61,60	44,93	45,62	78,09	13,93
+2,2 -2,4	2,4	690,1	6,72	75,40	68,32	47,93	38,40	80,52	38,40
+2,4	2,4	3254,1	31,68	81,60	100,00	58,59	31,68	81,60	-
TOTAL	-	10270,6	100,0	58,59	-	-	-	-	-

Quadro B3: Dados de beneficiamento do ponto 3.

CAMADA BONITO - CARBONIFERA BELLUNO - LAURO MULLER - FRAÇÃO -25 + 1 mm									
FRAÇÕES					FLUTUADO		AFUNDADO		NGM
Faixa densimétrica	Densidade (g/cm3)	Massa (g)	Massa (%)	Teor de Cinzas (%)	Somatório de Massa (M1) (%)	Teor de cinzas Massa acumulada	Somatório de Massa (M2)	Teor de cinzas Massa acumulada	
-1,6	1,6	1336,0	17,47	25,8	17,47	25,80	100,00	57,33	-
+1,6 -1,7	1,7	922,7	12,06	38,6	29,53	31,03	82,53	64,00	25,03
+1,7 -1,8	1,8	991,3	12,96	47,0	42,49	35,90	70,47	68,35	20,20
+1,8 -1,9	1,9	553,3	7,23	51,7	49,73	38,20	57,51	73,16	12,16
+1,9 -2,0	2,0	376,7	4,93	58,9	54,65	40,06	50,27	76,25	11,82
+2,0 -2,2	2,2	527,6	6,90	64,2	61,55	42,77	45,35	78,14	15,92
+2,2 -2,4	2,4	689,9	9,02	77,5	70,57	47,21	38,45	80,64	38,45
+2,4	2,4	2250,6	29,43	81,6	100,00	57,33	29,43	81,60	-
TOTAL	-	7648,1	100,0	57,33	-	-	-	-	-

Apêndice C

Figura C1: Difratoograma da amostra bruta coletada no ponto 1

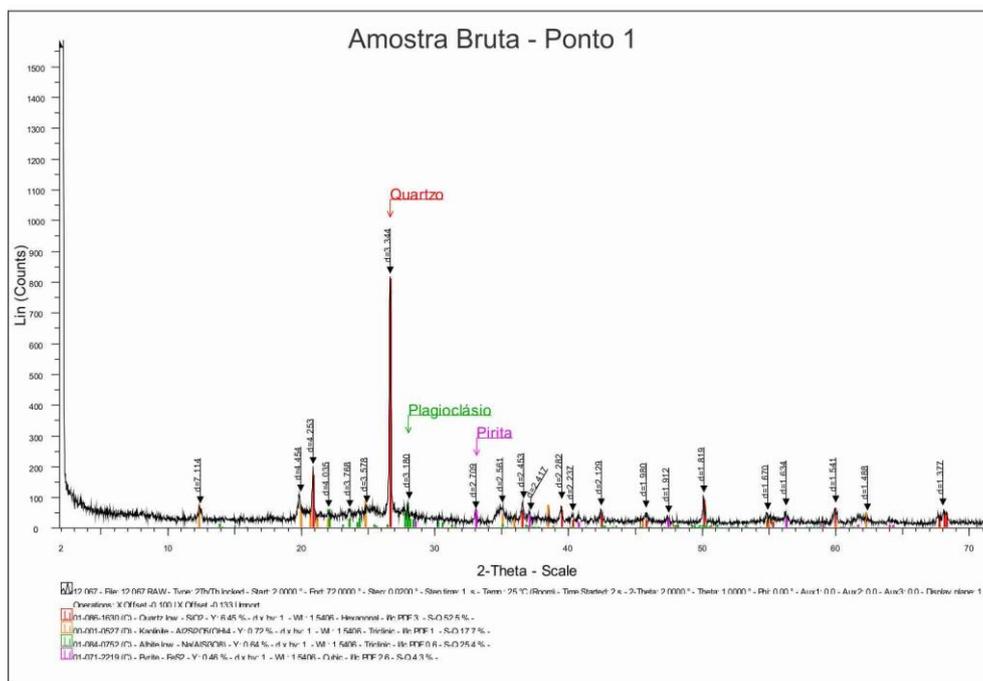


Figura C2: Difratoograma da amostra bruta coletada no ponto 2

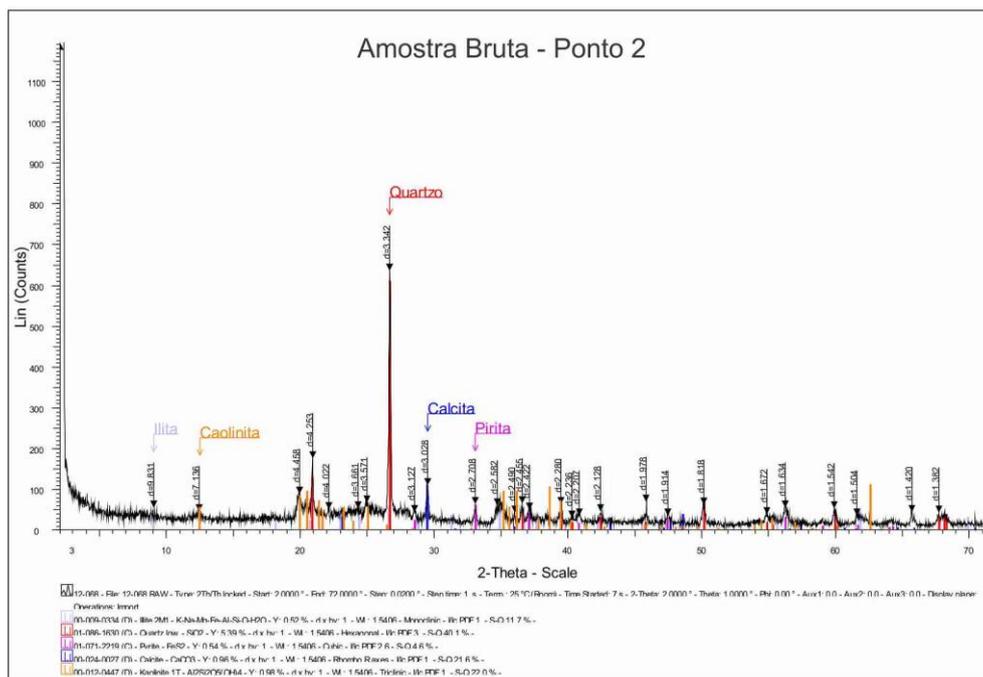
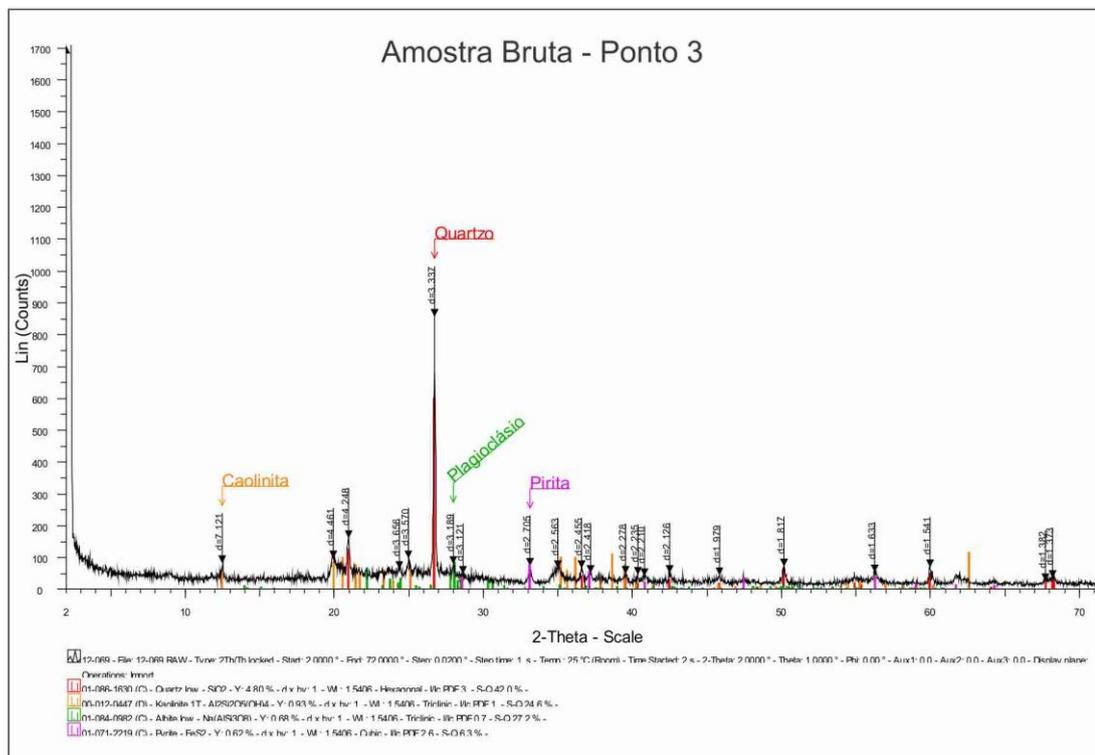


Figura C3: Difratoograma da amostra bruta coletada no ponto 3



Apêndice D

Quadro D1: Contendo todos os resultados de temperatura para os testes de fusibilidade da cinza das amostras dos três pontos do trabalho.

	Densidades(g/cm ³)	Cinza (%)	IT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)
Ponto 1	Bruta	59,5	1260	1440	1470	1500
	<1,6	27,0	1280	1400	1420	1470
	1,6-1,7	37,7	1250	1420	1480	1520
Ponto 2	Bruta	59,7	1230	1320	1380	1420
	<1,6	26,1	1220	1290	1380	1420
	1,6-1,7	37,1	1210	1320	1390	1440
Ponto 3	Bruta	55,9	1290	1450	1480	1500
	<1,6	25,8	1280	1480	1500	1520
	1,6-1,7	38,6	1240	1380	1430	1460

IT – Temperatura inicial de deformação

ST – Temperatura de amolecimento

HT – Temperatura de Hemisférica

FT – Temperatura de Fluidez

Apêndice E

Figura E1: Histograma da análise de reflectância da Vitritina para a amostra bruta do ponto 1.

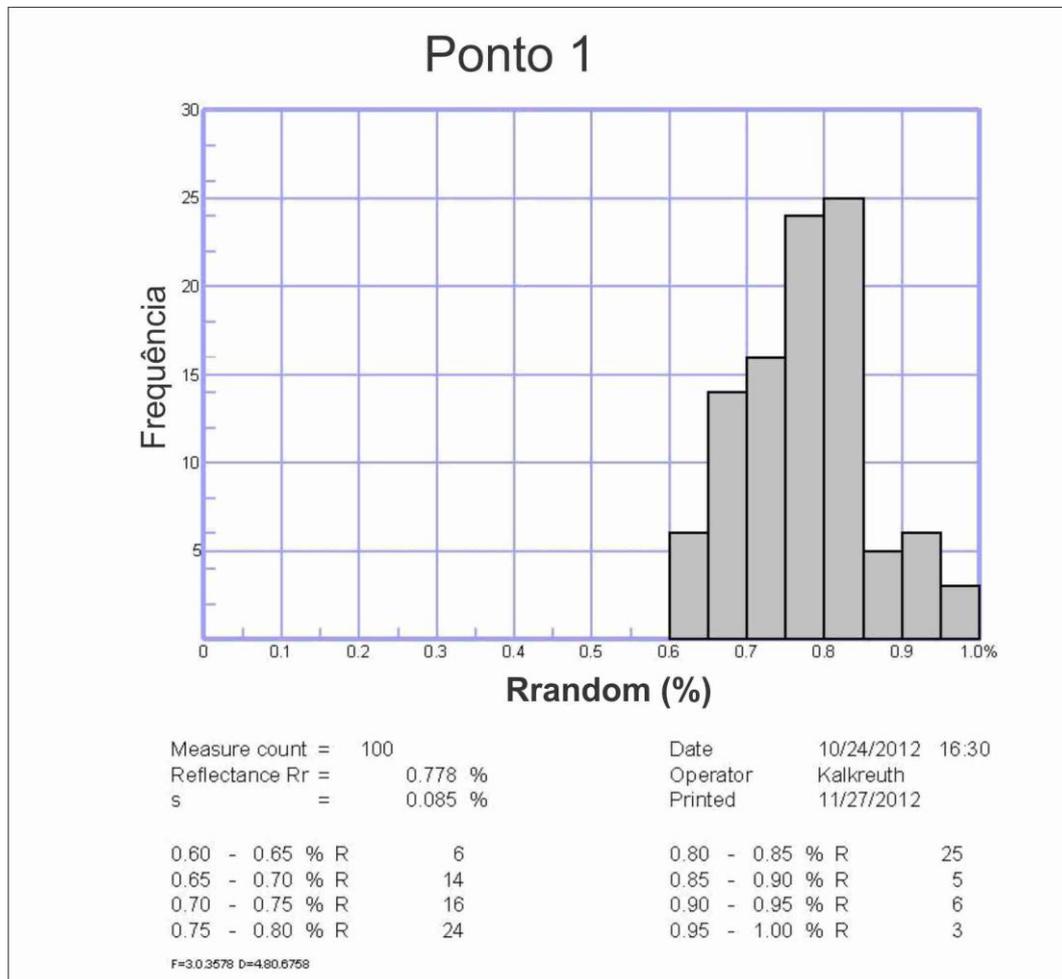


Figura E2: Histograma da análise de reflectância da Vitritina para a amostra bruta do ponto 2.

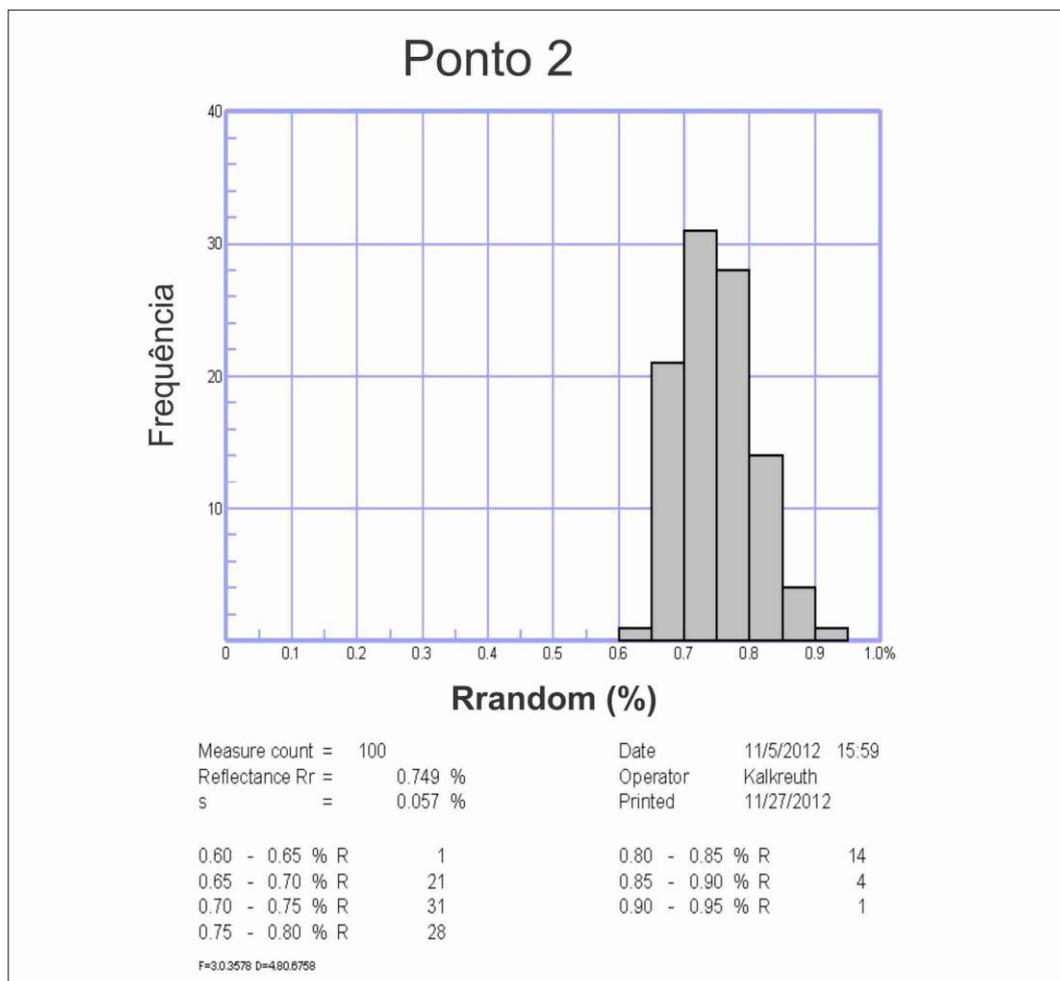
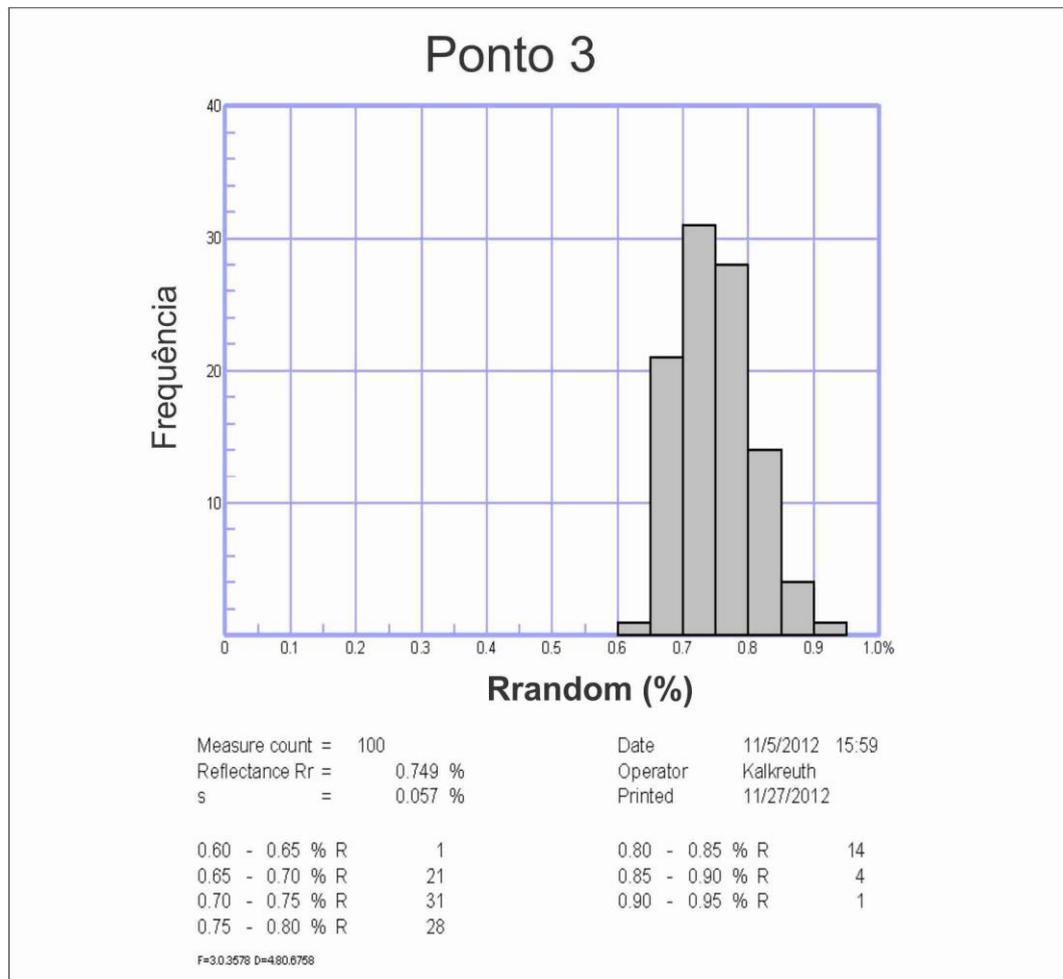


Figura E3: Histograma da análise de reflectância da Vitritina para a amostra bruta do ponto 3.



Apêndice F

Quadro F3: Petrografia das amostras do Ponto 1, em vol.%.

Empresa	C. Catarinense																	
Mina	Bonito																	
Amostra #	12-067		12-147		12-148		12-149		12-150		12-151		12-152		12-153		12-154	
Tipo	Bruta		>1,6		1,6-1,7		1,7-1,8		1,8-1,9		1,9-2,0		2,0-2,2		2,2-2,4		>2,4	
	MM	Sem MM																
Colotelinita	3,2	7,7	7,0	9,0	0,2	0,3	0,6	1,1	1,4	3,0	0,2	0,4	0,2	0,6		0,0		0,0
Colodetrinita	4,6	11,1	15,2	19,6	11,2	17,4	9,4	17,0	5,8	12,5	4,8	10,0	2,4	7,5	1,0	5,0	2,6	39,4
Corpogelinita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Vitrodetrinita	1,2	2,9	2,4	3,1	4,2	6,5	2,4	4,3	2,6	5,6	1,6	3,3	1,8	5,6	0,4	2,0	2,6	39,4
Total Vitrinita	9,0	21,7	24,6	31,7	15,6	24,2	12,4	22,4	9,8	21,1	6,6	13,7	4,4	13,8	1,4	6,9	5,2	78,8
Esporinita	6,4	15,5	8,2	10,6	3,8	5,9	2,8	5,1	1,0	2,2	4,0	8,3	5,6	17,5	5,4	26,7		0,0
Cutininita	1,0	2,4	2,8	3,6	3,2	5,0	4,2	7,6	4,0	8,6	3,4	7,1	1,2	3,8	0,2	1,0		0,0
Resinita		0,0		0,0	0,2	0,3	0,2	0,4		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Alginita	0,2	0,5		0,0		0,0	0,6	1,1		0,0	0,4	0,8		0,0		0,0		0,0
Liptodetrinita	4,4	10,6	9,8	12,6	7,2	11,2	6,0	10,8	5,8	12,5	9,6	19,9	4,6	14,4	6,0	29,7	0,2	3,0
Total Liptinita	12,0	29,0	20,8	26,8	14,4	22,4	13,8	24,9	10,8	23,3	17,4	36,1	11,4	35,6	11,6	57,4	0,2	3,0
Fusinita	2,6	6,3	5,0	6,4	2,4	3,7	1,0	1,8	2,4	5,2	1,0	2,1	1,0	3,1	0,4	2,0		0,0
Semifusinita	8,0	19,3	15,8	20,4	13,6	21,1	13,4	24,2	5,2	11,2	3,8	7,9	1,6	5,0	0,8	4,0	0,4	6,1
Inertodetrinita	9,2	22,2	11,4	14,7	17,8	27,6	14,4	26,0	17,8	38,4	18,6	38,6	13,4	41,9	6,0	29,7	0,8	12,1
Macrinita	0,6	1,4		0,0	0,4	0,6	0,4	0,7	0,4	0,9	0,8	1,7	0,2	0,6		0,0		0,0
Micrinita		0,0		0,0	0,2	0,3		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Esclerotinita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Total Inertinita	20,4	49,3	32,2	41,5	34,4	53,4	29,2	52,7	25,8	55,6	24,2	50,2	16,2	50,6	7,2	35,6	1,2	18,2
Total M.O	41,4	100,0	77,6	100,0	64,4	100,0	55,4	100,0	46,4	100,0	48,2	100,0	32,0	100,0	20,2	100,0	6,6	100,0
Argila*	45,4		17,2		29,8		37,6		48,2		44,0		61,0		72,6		32,0	
Quartzo*	9,6		3,6		3,4		4,2		3,6		3,8		4,6		2,2			
Pirita*	3,6		1,6		2,4		2,8		1,8		4,0		2,4		5,0		61,4	
Carbonato																		
MM Total	58,6		22,4		35,6		44,6		53,6		51,8		68,0		79,8		93,4	

Quadro F2: Petrografia das amostras do Ponto 2, em vol.%.

Empresa	C. Rio Deserto																	
Mina	Cruz de Malta																	
Amostra #	12-068		12-155		12-156		12-157		12-158		12-159		12-160		12-161		12-162	
Tipo	Bruta		<1,6		1,6-1,7		1,7-1,8		1,8-1,9		1,9-2,0		2,0-2,2		2,2-2,4		>2,4	
	MM	Sem MM																
Colotelinita	6,0	14,2	8,8	11,8	4,2	6,4	2,2	4,0	1,8	3,7		0,0	0,6	1,9	0,4	1,5	2,6	24,1
Colodetrinita	12,0	28,3	29,4	39,4	17,6	26,9	15,0	27,6	9,4	19,2	6,4	13,9	6,0	18,9	2,6	9,5	2,4	22,2
Corpogelinita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Vitrodetrinita	1,6	3,8	0,8	1,1	3,0	4,6	4,0	7,4	2,6	5,3	2,6	5,7	1,6	5,0	0,6	2,2	0,8	7,4
Total Vitrinita	19,6	46,2	39,0	52,3	24,8	37,9	21,2	39,0	13,8	28,2	9,0	19,6	8,2	25,8	3,6	13,1	5,8	53,7
Esporinita	1,4	3,3	3,0	4,0	4,6	7,0	3,2	5,9	2,2	4,5	2,6	5,7	2,8	8,8	1,6	5,8	0,2	1,9
Cutininita	1,0	2,4	2,0	2,7	2,0	3,1	2,6	4,8	2,0	4,1	2,2	4,8	0,8	2,5	0,8	2,9		0,0
Resinita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	0,2	0,4	0,2	0,6	0,6	2,2		0,0
Alginita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Liptodetrinita	2,0	4,7	1,8	2,4	4,0	6,1	3,2	5,9	2,8	5,7	5,8	12,6	3,4	10,7	9,2	33,6	0,4	3,7
Total Liptinita	4,4	10,4	6,8	9,1	10,6	16,2	9,0	16,5	7,0	14,3	10,8	23,5	7,2	22,6	12,2	44,5	0,6	5,6
Fusinita	3,2	7,5	11,6	15,5	7,4	11,3	7,0	12,9	4,4	9,0	6,2	13,5	4,0	12,6	2,0	7,3	0,8	7,4
Semifusinita	5,2	12,3	7,2	9,7	9,6	14,7	7,0	12,9	6,2	12,7	2,8	6,1	2,2	6,9	1,2	4,4	2,2	20,4
Inertodetrinita	9,4	22,2	9,8	13,1	12,2	18,7	9,8	18,0	17,4	35,5	17,0	37,0	10,2	32,1	8,4	30,7	1,4	13,0
Macrinita	0,6	1,4	0,2	0,3	0,6	0,9	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4		0,0		0,0		0,0
Micrinita		0,0		0,0	0,2	0,3	0,2	0,4		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Esclerotinita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Total Inertinita	18,4	43,4	28,8	38,6	30,0	45,9	24,2	44,5	28,2	57,6	26,2	57,0	16,4	51,6	11,6	42,3	4,4	40,7
Total M.O	42,4	100,0	74,6	100,0	65,4	100,0	54,4	100,0	49,0	100,0	46,0	100,0	31,8	100,0	27,4	100,0	10,8	100,0
Argila*	50,2		21,2		28,8		40,8		43,6		44,6		55,2		60,8		58,8	
Quartzo*	1,8		2,8		3,6		2,6		5,2		4,6		5,8		5,0		3,0	
Pirita*	2,4		1,0		1,4		1,6		1,6		4,2		6,4		4,0		11,4	
Carbonato	3,2		0,4		0,8		0,6		0,6		0,6		0,8		2,8		16,0	
MM Total	57,6		25,4		34,6		45,6		51,0		54,0		68,2		72,6		89,2	

Quadro F3: Petrografia das amostras do Ponto 3, em vol.%.

Empresa	C. Belluno																	
Mina	Lauro Muller																	
Amostra #	12-069		12-163		12-164		12-165		12-166		12-167		12-168		12-169		12-170	
Tipo	Bruta		<1,6		1,6-1,7		1,7-1,8		1,8-1,9		1,9-2,0		2,0-2,2		2,2-2,4		>2,4	
	MM	Sem MM																
Colotelinita	7,6	13,7	14,2	18,4	2,8	4,3	2,0	3,5	1,0	1,9	1,6	4,0	0,8	2,5	0,6	2,9		0,0
Colodetrinita	15,4	27,7	22,4	29,1	14,4	21,9	11,8	20,6	10,8	20,5	5,6	14,1	7,0	21,5	2,6	12,7	0,6	23,1
Corpogelinita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Vitrodetrinita	1,0	1,8	3,4	4,4	1,6	2,4	1,0	1,7	0,2	0,4	1,8	4,5	0,6	1,8	0,6	2,9	0,6	23,1
Total Vitrinita	24,0	43,2	40,0	51,9	18,8	28,6	14,8	25,9	12,0	22,8	9,0	22,7	8,4	25,8	3,8	18,6	1,2	46,2
Esporinita	6,0	10,8	6,0	7,8	7,0	10,6	5,2	9,1	6,6	12,5	4,0	10,1	2,4	7,4	0,8	3,9		0,0
Cutinina	0,6	1,1	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	1,4	0,4	0,8	0,8	2,0		0,0		0,0		0,0
Resinita		0,0	0,4	0,5	0,4	0,6		0,0	0,4	0,8		0,0	0,4	1,2		0,0		0,0
Alginita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Liptodetrinita	3,8	6,8	2,6	3,4	5,0	7,6	4,4	7,7	3,8	7,2	4,6	11,6	3,8	11,7	4,0	19,6	0,2	7,7
Total Liptinita	10,4	18,7	9,6	12,5	12,8	19,5	10,4	18,2	11,2	21,3	9,4	23,7	6,6	20,2	4,8	23,5	0,2	7,7
Fusinita	4,0	7,2	14,0	18,2	17,6	26,7	11,4	19,9	10,0	19,0	3,8	9,6	5,0	15,3	2,0	9,8	0,2	7,7
Semifusinita	6,6	11,9	4,6	6,0	3,4	5,2	3,8	6,6	4,2	8,0	2,4	6,1	1,0	3,1	0,4	2,0		0,0
Inertodetrinita	10,2	18,3	6,6	8,6	11,6	17,6	16,2	28,3	14,4	27,4	14,4	36,4	11,0	33,7	9,4	46,1	1,0	38,5
Macrinita	0,4	0,7	2,2	2,9	1,6	2,4	0,6	1,0	0,6	1,1	0,6	1,5	0,4	1,2		0,0		0,0
Micrinita		0,0		0,0		0,0		0,0	0,2	0,4		0,0	0,2	0,6		0,0		0,0
Esclerotinita		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Total Inertinita	21,2	38,1	27,4	35,6	34,2	52,0	32,0	55,9	29,4	55,9	21,2	53,5	17,6	54,0	11,8	57,8	1,2	46,2
Total M.O	55,6	100,0	77,0	100,0	65,8	100,0	57,2	100,0	52,6	100,0	39,6	100,0	32,6	100,0	20,4	100,0	2,6	100,0
Argila*	38,6		19,4		29,4		36,2		41,2		53,2		57,6		67,4		56,2	
Quartzo*	3,0		1,4		2,6		4,6		3,6		3,8		1,6		4,0		0,4	
Pirita*	2,0		1,8		1,6		1,6		2,4		3,0		8,0		8,2		40,0	
Carbonato	0,8		0,4		0,6		0,4		0,2		0,4		0,2				0,8	
MM Total	44,4		23,0		34,2		42,8		47,4		60,4		67,4		79,6		97,4	