

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DO BENEFICIAMENTO A SECO DO CARVÃO DA
MINA DE CANDIOTA-RS**

Por

Edison Thaddeu Pacheco

Orientador: Prof.Dr.-Ing Carlos Hoffmann Sampaio

Banca Examinadora:

Dr. Jorge Dariano Gavronski

Dr. Washington Aliaga Pizarro

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter

Porto Alegre, 2008

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DO BENEFICIAMENTO A SECO DO CARVÃO DA
MINA DE CANDIOTA-RS**

Por

Edison Thaddeu Pacheco

Porto Alegre, 2008

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr.-Ing Carlos Hoffmann Sampaio pela orientação, estímulo e dedicação proporcionado.

Ao professor Dr. Carlos Petter pelas orientações e sugestões a este estudo.

À Companhia Riograndense de Mineração-CRM pela disponibilidade de seu pessoal e material para a realização deste estudo.

À Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica-CGTEE pelo apoio financeiro para a realização das análises e dos ensaios no jig a seco na Universidade de RWTH-Aachen, Alemanha.

Ao colega Edison Petter Filho pela parceria e ajuda nesse estudo.

As pessoas que foram estagiários e me ajudaram neste estudo Mirela, Wild, Patrícia, Luciana, Ariane, Aline, Alexandre, Rodrigo e Thiago.

Aos colegas e amigos do Laprom pelas sugestões, observações e pela paciência.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 - INTRODUÇÃO	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 – Origem do Carvão	4
2.1.1 – Evolução e desenvolvimento da flora	4
2.1.2 - Clima	5
2.1.3 – Degradação do material vegetal	6
2.1.4 – Ambiente deposicional	6
2.1.5 – Tipos de Depósito	7
2.1.6 – Sedimentação do carvão	7
2.1.7 - Coalificação	9
2.1.7.1 – Degradação bioquímica	9
2.1.7.2 – Degradação físico-química	10
2.1.8 – <i>Rank</i> do carvão	11
2.1.9 – Classificação dos constituintes organo-petrográfico	13
2.1.9.1 – Propriedades petrográficas	14
2.1.10 - Maceral	16
2.1.10.1 - Vitrinita	16
2.1.10.2 - Liptinita	17
2.1.10.3 - Inertinita	18
2.1.10.4 – Matéria mineral	19
2.2 – Geologia do Carvão	19
2.2.1 – Carvões gonduânicos	19
2.2.2 – Carvões brasileiros	21
2.2.2.1 – Bacia carbonífera do Rio Grande do Sul	21
2.2.2.2 – Bacia carbonífera de Santa Catarina	23
2.3 – Reserva e Produção	25
2.4 – Beneficiamento a Seco	28
2.4.1 – Teoria hidrodinâmica	29
2.4.1.1 – Aceleração diferencial	29
2.4.1.2 – Sedimentação retardada diferencial	30
2.4.1.3 – Consolidação ou percolação intersticial	30
2.4.2 – Teoria da energia potencial	30
2.4.3 – Jigue a seco ou pneumático	31
2.4.4 - Funcionamento	32
3 – MATERIAL E METODOLOGIA	40
3.1 - Material	40
3.2 - Metodologia	40
3.2.1 – Coleta de material	40
3.2.2 – Separação granulométrica	40
3.2.3 – Ensaios de afunda-flutua	41
3.2.4 – Análises químicas e físicas	41
3.2.5 – Ensaios de beneficiamento gravimétrico	41

3.2.6 – Imperfeição Tromp	43
3.2.7 – Ensaio de combustão e análises dos gases	43
3.2.8 – Análise econômica e de sensibilidade	43
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5 - CONCLUSÕES	74
BIBLIOGRAFIA	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de situação das jazidas de carvão no Rio Grande do Sul	23
Figura 2: Mapa de situação das jazidas de carvão de Santa Catarina	24
Figura 3: Exemplo de jigue a seco ou pneumático	33
Figura 4: Equipamento de beneficiamento a seco utilizado pelo CUMT	35
Figura 5: Esquema do funcionamento do Allair	38
Figura 6: Jigue a ar	42
Figura 7: Curva densimétrica da Camada Superior a partir dos resultados do ensaio de afunda-flutua	48
Figura 8: Curva densimétrica da Camada Inferior a partir dos resultados do ensaio de afunda-flutua	49
Figura 9: Curva do teor de cinza verso massa acumulada da Camada Superior	49
Figura 10: Curva do teor de cinza verso massa acumulada da Camada Inferior	50
Figura 11: Curva do NGM da Camada Superior	50
Figura 12: Curva do NGM da Camada Inferior	51
Figura 13: Curva do teor de enxofre acumulado da Camada Superior	52
Figura 14: Curva do teor de enxofre acumulado da Camada Inferior	52
Figura 15: Resultado mássico do beneficiamento do jigue a seco da Camada Superior	56
Figura 16: Resultado mássico do beneficiamento do jigue a seco da Camada Inferior	57
Figura 17: Resultado mássico do beneficiamento do jigue a seco das Camada Superior e Inferior	58
Figura 18: Curva de Tromp do jigue a seco do Banco Superior	59
Figura 19: Curva de Tromp do jigue a seco do Banco Inferior	59
Figura 20: Curva de payback em anos	71
Figura 21: Gráfico aranha apresentando os parâmetros sensíveis ao projeto	72

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Parâmetros do <i>rank</i> do carvão	11
Tabela II – Classificação dos carvões pelo <i>rank</i>	12
Tabela III – Classificação dos rank dos carvões de acordo com as normas Alemã (DIN) e Norte Americana (ASTM)	13
Tabela IV – Classificação das cores com uso da fluorescência nos carvões	15
Tabela V – Reservas ao longo dos Períodos Geológicos	21
Tabela VI – Reservas e produção mundial	26
Tabela VII – Reservas brasileiras de carvão mineral	27
Tabela VIII – Produção bruta, beneficiada e o valor comercial	27
Tabela IX – Fluxo de comércio exterior	27
Tabela X – Petrografia dos carvões e poder refletor da vitrinita de Candiota	44
Tabela XI – Amostras enviadas aos Laboratórios e seus respectivos pesos	45
Tabela XII – Ensaio granulométrico da Camada Superior e análises imediata e elementar	46
Tabela XIII - Ensaio granulométrico da Camada Inferior e análises imediata e elementar	46
Tabela XIV – Ensaio granulométricos com vários top size da mistura das Camadas Superior (50%) e Inferior (50%)	47
Tabela XV – Resultado do ensaio de afunda-flutua e análises químicas da Camada Superior	48
Tabela XVI - Resultado do ensaio de afunda-flutua e análises químicas da Camada Inferior	48
Tabela XVII – Resultado das análises químicas dos carvões da Camada Candiota	56
Tabela XVIII – Resultado do ensaio de afunda-flutua do produto e rejeito do Banco Superior	58
Tabela XIX - Resultado do ensaio de afunda-flutua do produto e rejeito do Banco Inferior	59
Tabela XX – Resultados dos ensaios de combustão comparando os carvões ROM e o beneficiado do Banco Superior	60
Tabela XXI - Resultados dos ensaios de combustão comparando os carvões ROM e o beneficiado do Banco Inferior	60
Tabela XXII – Temperatura da chama dos carvões ROM e jigado para cada Camada	61
Tabela XXIII – Variação da absorção de calor na zona de radiação	61
Tabela XXIV – Variação da transferência de calor convectiva	62
Tabela XXV – Variação estimada da disponibilidade de calor total	63
Tabela XXVI – Investimento da planta industrial para 500 t/h	65
Tabela XXVII – Custo operacional dos 10 jigues (500 t/h)	65
Tabela XXVIII – Custo operacional da planta industrial para 500 t/h	66
Tabela XXIX – Demosntrativo econômico da instalação do jigue (valores anuais)	70
Tabela XXX – Fluso de caixa de 10 jigues sem imposto e sem empréstimo	71
Tabela XXXI – Resumo da análise de risco	71

LISTA DE SÍMBOLOS

CRM	Companhia Riograndense de Mineração
CGTEE	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
ROM	<i>Rom of mine</i>
NPV	<i>Near present value</i> ou valor presente
%	Porcentagem
mm	Milímetro
m ³ /t	Metro cúbico por tonelada
t/m ²	Tonelada por metro quadrado
t/ano	Tonelado por ano
MWh	Mega watt hora
TIR	Taxa interna de retorno
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
pH	Potencial de hidrogênio
°C	Graus centígrados
Kg/cm ²	Kilograma por centímetro quadrado
Mpa	Mega pascal
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
NCB	<i>Coal Board in Britain</i>
µm	Micrômetro
R\$	Moeda brasileira – real
USITESC	Usina Termelétrica Sul Catarinense
m ³ /min.m ²	Metro cúbico por minute vezes metro quadrado
Hz	Hertz
ADMFB	<i>Air dense medium fluidized bed</i>
CUMT	<i>Mineral Research Center of China University of Mining and Technology</i>
TC1	Correia transportadora número 1 da CRM
kg	quilograma
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia

RESUMO

O presente estudo, em escala laboratorial, tem como objetivo a viabilização de utilizar o jigue a seco nos carvões da jazida de Candiota/RS, tendo em vista a impossibilidade do beneficiamento a úmido, devido ao material ser muito higroscópico. Com esta característica, é necessário a secagem após o tratamento, tornando o processo inviável economicamente.

Nos ensaios de beneficiamento a seco, obteve-se como resultados uma diminuição nos teores de cinza (de 5,61%) e enxofre total (de 1,49%) e uma majoração no poder calorífico (de 5,75%). No teste de combustão, verificou-se que houve uma retração de SO₂ em média de 37% e um ganho energético de 10,45%. Com estes dados, a necessidade da usina termelétrica de consumo de carvão é de 2.614.071,60 t/ano se comparado com o atual de 2.921.460 t/ano. Baseando-se nos dados do carvão jigado, a empresa mineira (CRM) terá que lavar 3.556.560 t/ano de carvão ROM, necessitando, assim, de 10 jigues a seco para planta de beneficiamento.

Utilizando-se dos dados alcançados e das informações técnicas fornecidas pela CGTEE, com referência ao consumo de cal pelo processo NIDI de dessulfurização e através do método do Fluxo de Caixa Descontado com os parâmetros de ganhos e custos operacionais e investimento, pode-se analisar e simular o retorno do investimento, margem operacional, NPV (*Net Present Value*) e a intensidade de capital de uma planta completa de jigagem a seco. Pelo resultado do Fluxo de Caixa, conseguiu-se um retorno do investimento (*payback*) no ano 10, a margem operacional de 66% com uma taxa de atualização de 14%.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se afirmar que a utilização do jigue a seco é viável, não só tecnicamente como economicamente, para o carvão da jazida de Candiota.

ABSTRACT

The present study, in scale laboratorial, has as objective the viabilization of using the jig the dry in the coals of the bed of Candiota/RS, tends in visit the impossibility of the benefiting of humid, due to the material to be a lot of hygroscopic. With this characteristic, it is necessary the drying after the treatment, turning the unviable process economically.

In the rehearsals of benefiting the dry, was obtained as results of decrease in the ash tenors (of 5,61%) and total sulfur (of 1,49%) and an increase in the calorific power (of 5,75%). In the test of combustion, it was verified that there was a retraction of SO₂ in media of 37% and it is one of the energy earnings of 10,45%. With these data, the need of the thermal power (thermoelectric) plant of consumption of coal is of 2.614.071,60 t/year if compared with the current of 2.921.460 t/year. Basing on the data of the coal jigged, the mining company (CRM) he/she will have to cultivate 3.556.560 t/year of coal ROM, needed, like this, of 10 jigs. There is dry for the plant of benefiting.

Being using the reached data and of the technical information supplied by CGTEE, with reference to the consumption of whitewash for the process NIDI desulphurization and through the method of the Cash flow Discounted with the parameters of earnings and operational costs and investment, it can be analyzed and to simulate the return of the investment, operational margin, NPV (Near Present Value) and the intensity of capital of a complete plant of jig the dry. For the result of the cash flow, a return of the investment was achieved (payback) in the year 10, the operational margin of 66% with a discount rate of using of 14%.

With base in the results obtained in this study, it can be affirmed that the use of the jig the dry is viable, not only technically with economically, for the coal of the bed of Candiota.

1 - INTRODUÇÃO

As jazidas carboníferas do Rio Grande do Sul estão localizadas na borda sudeste da Bacia do Paraná. As camadas de carvão ocorrem, litoestratificadamente, na Formação Rio Bonito, Grupo Guamá, Supergrupo Tubarão (Schneider *et al.* 1974) e fazem parte da seqüência deposicional IV da megasseqüência Carbonífera Eotriássica de caráter geral transgressivo, conforme Milani *et al.* (1994). Na base da seqüência IV, ocorrem depósitos fluviais (de mar baixo), que evoluem para condições favoráveis à formação de turfeiras, provavelmente associada a uma paleogeografia de lagos.

Com base nos estudos de petrografia do carvão (Ade, 1993) e da estratigrafia de seqüências (Alves, 1994), Alves & Ade (1996) e Silva (1999), consideram que os carvões da jazida de Candiota foram depositados em um sistema laguna-barreira. Posteriormente, Holtz (1998) estendeu a idéia para as principais camadas de carvão situadas na Formação Rio Bonito, no Rio Grande do Sul.

De acordo com Lopes (1995), as repetições das camadas de carvão, estudadas nas regiões citadas acima, estão relacionadas a fatores locais de condicionamento da evolução dos sistemas deposicionais que contribuíram para a formação do registro sedimentar e fechamento de lagunas com formação de pântanos atrás de sistemas de barreiras. O registro da sedimentação gonduânica, nesses setores, segundo este autor, inicia por rochas areno-pelíticas rítmicas, paraconglomerados e folhelhos pretos, relacionados à Formação Rio do Sul, do Grupo Itararé. O Grupo Guatá ocorre completo, com as Formações Rio Bonito e Palermo. As rochas características da Formação Rio Bonito, na região, estão representadas por arcóseos grossos a conglomerados, paraconglomerados, siltitos cinzas a cinza-escuros e carbonosos, carvão e arenitos quartzosos finos e médios.

Dois bancos de carvão, com aproximadamente 2 m de espessura, intercalados por uma camada de argilito de 80 cm, são atualmente minerados pela CRM. Com cobertura na faixa de 10 m para a camada Candiota, a mineração se processa a céu aberto. A relação estéril/minério está na faixa de 1,8 m³/t de carvão ROM, e o rendimento, apenas para a camada Candiota, é de 7 t/m².

Do ponto de vista técnico, o carvão de Candiota apresenta as seguintes características: o teor de cinzas do carvão ROM é da ordem de 50% para a Camada Superior e 52% para a Camada Inferior; o teor de enxofre total fica em torno de 2,0%, sendo que menos de 0,9% corresponde a enxofre orgânico. O enxofre sulfático

apresenta valores baixos de 0,3%; a classificação do carvão de Candiota segundo o *rank*, de acordo com os resultados de análises químicas de concentrado de vitrênio, poder refletor médio das vitrinitas e poder calorífico é sub-betuminoso C.

O carvão no Brasil corresponde a 65% das reservas energéticas não renováveis, com reservas medidas que totalizam 3,1 bilhões de toneladas. Candiota é a maior jazida de carvão do país, com uma participação de 55% das reservas medidas totais. Tendo como consumidor básico a usina termoeletrica pertencente à CGTEE, localizada ao lado da jazida.

Depois de minerado, o carvão é cominuído a -100 mm em uma instalação de britagem da própria CRM e transportado para a termoeletrica, onde é pulverizado e queimado em caldeiras com as seguintes características: (1) grande quantidade de finos apresentando teores de cinzas altos; (2) a matéria orgânica apresenta baixa liberação; (3) o teor de enxofre total deste carvão é baixo nas fracos granulométricas menores, evidenciando a liberação da pirita sob a forma de nódulos; (4) apresenta grande porosidade, inviabilizando a utilização de água no seu beneficiamento.

O objetivo deste estudo é obter um carvão com menores percentuais de enxofre, de calcários e de matéria mineral, através de um processo de beneficiamento com jigagem a seco, resultando numa queima com baixas emissões de gases e de particulados.

A metodologia empregada terá as seguintes etapas: caracterização para o beneficiamento das amostras de carvão coletadas para os ensaios de beneficiamento em jigagem a ar, tais como: ensaios granulométricos e análises de cinza, enxofre total, matéria volátil, poder calorífico; definição da granulometria ótima do beneficiamento a seco do carvão de Candiota; análise da eficiência do beneficiamento nesta planta com a determinação da eficiência *Tromp* e o erro provável do processo de jigagem a seco; definição dos parâmetros básicos de combustão, análises de pré-viabilidade através do método de Fluxo de Caixa Descontado e de sensibilidade pelo gráfico *spider*.

Os dados obtidos após o beneficiamento a seco foram uma redução nos teores de cinza de 5,61%, de enxofre total de 1,49% e um aumento no poder calorífico na ordem de 5,75%. Nos testes de combustão, os resultados foram uma diminuição de SO₂ em média de 37% e um ganho energético de 10,45%.

Baseando-se nestes dados, calculou-se a quantidade de carvão jigado necessário para o processamento da usina termoeletrica que é de 2.614.071,60 t/ano, e a quantidade de material que a companhia mineradora (CRM) envia atualmente à usina é de

2.921.460 t/ano, ocorrendo uma redução na produção da CRM de 307.568,40 t/ano de carvão.

Com este volume de material jigado, há necessidade de 3.556.560 t/ano de carvão ROM, indicando, assim, uma planta de beneficiamento de 10 jigues com capacidade de 500 t/h.

Através do estudo de Pré-viabilidade, foram obtidos os seguintes parâmetros econômicos: o *payback* no ano dez (10), margem operacional de 66%, uma taxa interna de retorno (TIR) de 18,97% com uma taxa de atualização de 14%. E, pelo gráfico spider, que é baseado no percentual em função do NPV, mostra que o projeto tem uma sensibilidade na quantidade de cal, no consumo específico do carvão em relação ao MWh e no ganho operacional.

Com estes resultados, pode-se afirmar que a utilização dos jigues a seco nos carvões da jazida de Candiota é viável tanto economicamente como tecnicamente e, como produto final, será um carvão com maior poder calorífico, menor teor de cinza e de enxofre, resultando numa baixa emissão de gases poluentes e de partículas na atmosfera.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, dar-se-á uma idéia da formação do carvão, da geologia dos locais de coleta, dos macerais e minerais componentes desta rocha orgânica, *rank* do carvão e do jigge a seco.

2.1 – Origem do carvão

O carvão se origina a partir da turfa depositada em pântanos e para tal é necessário conhecer a evolução e desenvolvimento da flora, o clima e do ambiente deposicional, segundo Teichmüller *et al.* 1975.

2.1.1– Evolução e desenvolvimento da flora

Os Antracitos são conhecidos desde o Algonciano Huronciano Médio de Michigan. Eles são muito raros e impuros, mas, sob microscópio, as estruturas das plantas são visíveis nestes carvões mais antigos.

No Devoniano Inferior, cresceram plantas submersas (Psilophytas) em lagos rasos e desenvolveram camadas pouco espessas de carvão com bandas finas de vitrinita. A formação de verdadeiras jazidas de carvão só foi possível no Devoniano Superior, quando acontecem desenvolvimentos das plantas terrestres por todos os continentes, e as de importância economicamente aconteceram no Carbonífero Inferior. Neste período, formou-se o carvão betuminoso, advindo da grande quantidade de florestas de pântano, nos quais desenvolveram árvores de até 30 metros (Lepidodendron e Sigillaria). Contudo, as comunidades de plantas formadoras de carvão do Carbonífero não se aproximavam da variedade das floras de tempos geológicos mais recentes.

As camadas de depósitos de carvão do Permiano se formaram predominantemente a partir de Gimnospermas Cordaites, que se tornaram importantes contribuidores para a formação de turfas no Carbonífero Superior.

No Jurássico e Cretáceo Inferior, as Gimnospermas são as principais formadoras de carvão. O desenvolvimento muito rápido da flora, entre o Cretáceo Inferior e Superior, originou pântanos de floras ricas de Angiospermas do Cretáceo Superior e Terciário da América do Norte, Europa, Japão e Austrália. Comparando-os com a flora do Carbonífero, as plantas do

Mesozóico e, particularmente, as do Terciário, são muito mais diversas e especializadas, resultando em espessos depósitos de turfa com vários tipos de fácies diferentes.

2.1.2– Clima

Quanto mais quente e úmido o clima, mais exuberante é a flora, e os pântanos de florestas se tornam mais dominantes em relação aos pântanos de juncos e musgos. Um pântano tropical se renova em 7 a 9 anos, e, durante, este tempo as árvores podem atingir até 30 metros de altura.

No Carbonífero Superior, as turfás predominavam nas zonas de clima quente e úmido, formando depósitos ricos em carvões. Contudo, no Hemisfério Sul, existem depósitos de carvão que se acumularam em clima temperado úmido ou mesmo em clima frio, por exemplo, os carvões gonduânicos do Permiano inter e pós-glacial.

Jazidas de carvão que foram depositadas em climas úmidos e quentes contêm bandas largas de carvão brilhantes, originadas de troncos grossos. Por outro lado, as jazidas que se originaram em climas temperados ou frios contêm relativamente pouco carvão brilhante. Por exemplo, os carvões gonduânicos pós-glaciais, que freqüentemente se formaram a partir de uma flora relativamente raquítica, são os finos dentríticos. Os argilominerais, que são típicos destes carvões, podem ter sido carregados para dentro dos pântanos, quase sem árvores, a partir de montanhas circundantes que ainda eram desprovidas de vegetação.

Com o aumento do calor, não somente a planta cresce, como também a taxa de decomposição aumenta. Conseqüentemente, até poucas décadas atrás, pensava-se que turfás so atingiam grandes espessuras em zonas temperadas. Mais recentemente, contudo, as grandes áreas pantanosas com espessuras de turfa de mais de 30 metros têm sido descobertas nos trópicos.

Alguns carvões do Gondwana foram acumulados em clima frio, sendo entremeados com tilitos glaciais. Camadas de carvões que foram depositadas em climas tropicais e subtropicais são geralmente caracterizadas pela presença de bandas brilhosas originadas de material lenhoso. Por outro lado, os carvões originados de clima frio são os levemente bandeados e finamente detrital, como resultado da escassez de grandes árvores dentro da turfa pantanosa (Bustin *et al.* 1983).

2.1.3– Degradação do material vegetal

A degradação dos vegetais depende da umidade ou da água e do acesso de oxigênio do ar, sendo que os componentes minerais terão uma certa influência catalítica neste processo. Este tipo de processo ocorre de diversas maneiras: os plasma e sacarídios tornam-se voláteis e são os mais fáceis de se degradarem; o linhito e celulose são mais resistentes a este processo e só ocorrem sob a ação dos agentes orgânicos; as cutículas, esporos, polens, resinas, ceras e graxas são os componentes mais difíceis de se degradarem, e isto só surge com a elevada temperatura no estágio do carvão hulha, isto é, o primeiro estágio de carbonificação.

Durante o processo de formação da turfa, a degradação dos detritos vegetais ocorre sob a ação de agentes orgânicos, enzimas, fungos e, principalmente, bactérias. Esta última, quando supersaturada em água, provoca a fermentação da lignina e celulose.

2.1.4 – Ambiente deposicional

A grande distribuição lateral, a espessura, a composição e a qualidade do carvão são determinadas pelo ambiente de deposição. A formação e preservação de significantes depósitos de turfa requerem um ambiente de alta produtividade orgânica e uma subsidência contínua e lenta, próxima da superfície d'água subterrânea ou da superfície da turfa, no qual o pântano de turfa é protegido por longos períodos da invasão de águas marinhas ou por afluência de sedimentos clásticos. Esta condição aparentemente ocorreu no passado e também no presente em ambientes de *paralic* (costa marinha) ou *limnic*, que são áreas relativamente estáveis tectonicamente, tal como, a bacia intracratônica (Bustin *et al.* 1983).

Os depósitos de carvão podem ser considerados de dois níveis:

1. macroscópica – em que a sedimentologia do carvão (turfa) é colocada na perspectiva do ambiente de sedimentação;
2. microscópica – realiza-se uma tentativa de interpretar a sedimentologia existente nas turfeiras, nos pântanos e nos charcos que geralmente envolvem estudos detalhados de carvão.

A forma topográfica que precede o ambiente de sedimentação do carvão pantanoso, sobre o qual se desenvolve, afeta a sua espessura e a extensão lateral.

2.1.5- Tipos de depósitos

Existem dois tipos de depósitos de carvões, segundo Gammidge (2001): os parálicos e os *limnic* (límnicos). Os depósitos parálicos dão a entender que havia uma conexão de hidrológica com o mar no tempo da deposição da turfa. Estes podem ser encontrados ao longo de planícies litorâneas, lagunas de barreira, estuários e deltas. A turfa que forma ambiente isolado na praia, por exemplo, em bacias com pouca subsidência, produzem depósitos de carvão de *limnic*.

Os *limnics*, segundo Bustin, 1983, são os carvões depositados nas regiões entre montanhas, onde o nível de água era controlado através de condições locais em vez de regionais. As camadas de carvão são comumente resultado da subsidência local devido à falha e são geralmente caracterizadas por camadas grossas de extensão lateral limitada. Os materiais orgânicos dos depósitos de carvões *limnic* podem ser alóctones ou autóctones.

2.1.6 – Sedimentação do carvão

Para descrever a sedimentologia, é comum usar a descrição de fácies do carvão. Segundo Teichmüller *et al.* (1975), o fácies é expresso no conteúdo de maceral e de mineral do carvão e através de certas propriedades químicas, que são largamente independentes do *rank*.

Os seguintes fatores determinam as características básicas do fácies de carvão:

- Tipo de deposição (autóctone ou alóctone) – autóctone são carvões que se desenvolveram de plantas que se acumularam *in situ*, formando turfeiras ou sendo transportadas a pequenas distâncias (*hipautochthonous*). A evidência para uma origem autóctone é a maioria dos carvões incluem fragmentos de raízes, troncos em crescimento, enquanto que as alóctones se desenvolveram de plantas que foram transportadas por consideradas distâncias de seus sítios originais, ou foram redepositadas. Eles são geralmente ricos em material mineral e por isso de qualidade mais pobre.
- Comunidades de plantas que formam a turfa - em climas temperados úmidos, esta sucessão seria representada pelo desenvolvimento de uma turfa em lagos, lentamente preenchida através de crescimento de planta, acima dos fundos de lago, lama, limo detrítal, turfa de cana, turfa de floresta e turfa de musgo. Este

desenvolvimento depende das condições ecológicas presentes, tais como: da superfície de água, da sanidade e do clima;

- Ambiente deposicional, incluindo o pH, atividade bacterial, disponibilidade de enxofre e suplemento de nutrientes – (1) pode-se distinguir o suplemento de nutrientes nos pântanos, dependendo das quantidades abundantes, pequenas ou muito pequenas e que são conhecidas como eutrófico, mesotrófico e oligotrófico. Os baixos pântanos são geralmente eutróficos, porque eles recebem suas misturas através da água subterrânea, que usualmente é trocada pelos conteúdos nutrientes dissolvidos. Elevados pântanos são oligotróficos, desde que eles obtenham água da chuva. Os tipos transicionais, entre os baixos e altos pântanos, são classificados como mesotróficos. A maioria dos carvões betuminosos foram depositados em pântanos eutróficos, onde ocorreram abundantes nutrientes através do transporte regular de vegetação e da inundação dos rios, lagos ou do mar; (2) a acidez de um pântano influencia as bactérias e a decomposição química e estrutural das plantas remanescentes. As turfas de baixo pântanos têm usualmente um pH em torno de 4,8 a 6,5, enquanto que as de altos pântanos variam o pH de 3,3 a 4,6. Além do tipo de base e do fluxo de água, o grau de acidez depende das comunidades de planta, na quantidade de oxigênio e no nível de concentração de ácidos de húmicos que formaram. As quantidades de nitrogênio nos pântanos associadas aos sais minerais são relevantes às atividades bacteriais. Uma pequena razão entre carbono e nitrogênio (C/N) e condição eutrófica promove a atividade bacterial. As proteínas são caracteristicamente concentradas em baixo pântano devido às atividades bacteriais, mas não em alto pântano. A decomposição produz as proteínas, que, mais tarde, são incorporadas às substâncias húmicas, que são mais estáveis e contêm muito nitrogênio. O enxofre tem um especial papel nas turfeiras e nas lamas orgânicas, reduzindo os sulfatos para o enxofre, e, deste modo, possibilita a formação de pirita a marcasita. O ferro está presente em todos os minerais silicatados ou nas águas subterrâneas, pois carregam os íons de ferro. Conseqüentemente, a pirita singenética aparece com freqüência em carbo-argilitos ou em microlitotipo em argila marinha; (3) a temperatura da superfície da turfa representa um importante fa-

tor na decomposição primária. Em climas quentes e úmidos, a ação bacteriana é mais intensa que em zonas de temperadas, e os processos puramente químicos também se processam mais rapidamente. A temperatura ideal para destruir a bactéria da celulose na turfa está entre 35 a 40 °C.

- Potencial redox (aeróbica e anaeróbica) – O potencial redução-oxidação (Eh) é de extrema importância na determinação da turfeira. Se houver uma grande quantidade de oxigênio e estiver disponível em água subterrânea corrente ou se houver acesso à atmosfera, a turfa pode oxidar completamente para produtos gasosos. Quando há pouca disponibilidade de oxigênio, ocorre como um resultado da bactéria aeróbica e atividade fúngica. A turfificação ocorre com restrição de suplemento de oxigênio, mas algum oxigênio é requerido para formar o ácido húmico do linhito. Durante a putrefação da bactéria anaeróbica, a atividade fúngica consome oxigênio e organismos, resultando na geração de metano, dióxido de carbono e hidrogênio, conforme Bustin (1983)

2.1.7 - Coalificação

A transformação do material vegetal em carvão é composta por dois estágios, degradações bioquímica e geoquímica, conforme Gammidge, 2001.

2.1.7.1 – Degradação bioquímica

A degradação bioquímica consiste da ação de bactérias que vivem na água, onde a matéria orgânica está sendo depositada, porque há uma cooperação de fungos. Estes organismos atacam as substâncias mais facilmente degradáveis, os carboidratos, e, posteriormente, os mais resistentes, tais como: as cascas, cutículas, resinas e ceras. A matéria vegetal, na fase inicial, decompõe-se na presença de uma certa quantidade de oxigênio e pelas bactérias aeróbicas. À medida que a matéria orgânica é acumulada e soterrada, a degradação ocorre em condições de ausência de oxigênio, e o papel principal é exercido pelas bactérias anaeróbicas.

A hidrólise, a oxidação e a polimerização são os principais processos químicos que ocorrem nesta degradação, e no suceder destas reações, há uma liberação de dióxido de carbono (CO₂, na presença de oxigênio), metano (CH₄, sob condições anaeróbicas) e amônia (NH₃).

As toxinas podem interromper as atividades orgânicas ocasionadas pela deposição de sedimentos no pântano, causando um lapso no processo de degradação, o qual resulta numa maior ou menor quantidade de carboidratos. Se apresentar a primeira opção, sobrarão poucos carboidratos, e o resíduo será composto por componentes resistentes, tais como: resinas, cutículas e graxas.

Dependendo da quantidade de precipitação pluviométrica, varia a quantidade de toxinas. Se o volume de água aumenta, a concentração de toxinas diminui, e o avanço da degradação do material orgânico aumenta. Se o volume de água é menor, aumenta a quantidade de toxinas.

A humificação afeta, primeiramente, a parte central e, após, a parte externa (as paredes) das células dos vegetais, que consistem em celulose, hemicelulose e lignina, que são a combinação mais resistente. O processo de humificação começa com a oxidação da planta e é atacada através de organismos aeróbios, como fungos, insetos e bactérias aeróbicas. Os hidrocarbonetos são extraídos do tecido, e o resíduo do material é enriquecido em oxigênio e carbono. Semifusinita, um maceral do grupo da inertinita, pode ser formado desta maneira.

A coalificação bioquímica termina quando atinge o *rank* de carvão sub-betuminoso e quando substâncias húmicas polimerizam.

2.1.7.2 – Degradação físico-química

O início desta fase é caracterizado pela subsidência gradual da matéria orgânica degradada, onde ocorre um aumento na temperatura e pressão. A influência destes dois parâmetros no carvão é a perda de voláteis e um aumento percentual de carbono. Na região de Ostrawa-Tcheco, os voláteis diminuem em 1% a cada 100 metros de profundidade. Na bacia de Rhur-Alemanha, em 2,3% e, no norte de França, diminuem em 3,1%. Isto é bem provável que seja provocado pela pressão das camadas sobrepostas ao carvão, a qual, para cada 100 metros de camada de densidade de 2,5 g/cm³, a pressão é de 25 kg/cm² ou 25 Mpa.

Nas regiões onde houve tectonismo, a qualidade do carvão aumenta, devido a apresentarem teores menores de voláteis se comparados com regiões que não sofreram o evento de orogenia. Como por exemplo, os carvões da Silésia-Polônia, próximos aos eventos tectônicos, têm um teor de 32% de voláteis, e a mesma camada, porém mais afastada, tem 39%.

A temperatura tem uma influência na qualidade do carvão, através das intrusões magmáticas. Estas, juntamente com a pressão, são responsáveis pelo aumento do rank do carvão. Constatou-se que, em muitas bacias, a qualidade do carvão aumenta mais sensivelmente com a profundidade do que a horizontalmente em direção às zonas perturbadas tectonicamente.

As características e as propriedades de um carvão dependem da matéria orgânica, da maneira como transcorreram os processos bioquímicos e físico-químicos e da sua duração após o soterramento da matéria-prima.

2.1.8 - Rank do carvão

O *rank* de um carvão se refere ao grau de coalificação suportado pela matéria orgânica, sendo calculado pelo conteúdo da mistura, da energia específica, da refletância da vitrinita ou da matéria volátil, estes são os parâmetros do rank. (Gammidge, 2001; Correia da Silva *et al*, 1987).

Tabela I – Parâmetros do rank do carvão, segundo Diessel (1992).

Estágios do rank	% Carbono (daf)	% Matéria volátil (daf)	Energia específica MJ/kg	% Umidade <i>in situ</i>	% Reflectância da vitrinita	
					<i>random</i>	<i>máxima</i>
Madeira	50	>65	-	-	-	-
Turfa	60	>60	14,7	75	0,20	0,20
Carvão Marrom	71	52	23	30	0,40	0,42
Sub-betuminoso	80	40	33,5	5	60,00	0,63
Carvão betuminoso alto volátil	86	31	35,6	3	0,97	1,03
Carvão betuminoso médio volátil	90	22	36	<1	1,47	1,58
Carvão betuminoso médio volátil	91	14	36,4	1	1,85	1,97
Semi-antracito	92	8	36	1	2,65	2,83
Antracito	95	2	35,2	2	6,55	7

Segundo Bustin *et al.* (1983), a classificação do carvão nunca foi uma tarefa simples, devido à complexidade das propriedades químicas e físicas e seus usos variados. A multiplicidade de esquemas de classificação para os carvões tem sido propostos durante anos usando, assim, uma variedade de parâmetros como termos de referência.

Em 1981, foi utilizado, nos Estados Unidos, o sistema padrão ASTM – *American Society for Testing and Materials*, nos quais foram baseados na matéria volátil a no valor calorífi-

co, não estando incluso os parâmetros geológicos. A classificação da ASTM, conforme Tabela II, começa com o linhito no fim da tabela, e o antracito, no topo da mesma, onde se pode notar um progressivo aumento no grau de metamorfismo. Este espectro de maturidade ou metamorfismo é dividido em linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito. O grupo é baseado na matéria mineral livre, matéria volátil, umidade e de valor calórico. As razões por usar os dois parâmetros (matéria volátil e valor calórico) em vez de um, é devido à obtenção de resultados dos valores clóricos que vão do linhito ao betuminoso A, enquanto que a matéria volátil inicia no meta-antracito e termina no carvão betuminoso de médio volátil. Abaixo do rank do carvão betuminoso médio-volátil contendo matéria volátil, ocorrem pequenas alterações, e estas são irregulares e erráticas, enquanto que o betuminoso médio volátil a alto volátil, o conteúdo de matéria volátil aumenta muito mais que o aumento do metamorfismo. A situação mostra uma inversão do valor calórico, com um aumento maior ou menor na regularidade no final da escala de *rank*, alcançando o topo no estágio médio-volátil do *rank*.

Tabela II – Classificação dos carvões pelo *rank*, segundo ASTM (1981)

Classe	Grupo	Limites de fixação do carbono %		Limites de matéria volátil %		Limites de valor colérico Btu/libra		Características de aglomeração
		Igual ou maior que	Menor que	Maior que	Igual ou menor que	Igual ou maior que	Menor que	
I. Antracito	Meta-antracito	98	-	-	2	-	-	não aglomeração
	Antracito	92	98	2	8	-	-	
	Semi-antracito	86	92	8	14	-	-	
II. Batuminoso	Carvão betuminoso baixo volátil	78	86	14	22	-	-	aglomeração comum
	Carvão betuminoso médio volátil	69	78	22	31	-	-	
	Carvão betuminoso alto volátil A	-	69	31	-	14.000	-	aglomeração
	Carvão betuminoso alto volátil B	-	-	-	-	13.000	14.000	
	Carvão betuminoso alto volátil C	-	-	-	-	11.500	13.000	
III. Sub-betuminoso	Carvão sub-betuminoso A	-	-	-	-	10.500	11.500	não aglomeração
	Carvão sub-betuminoso B	-	-	-	-	9.500	10.500	
	Carvão sub-betuminoso C	-	-	-	-	8.300	9.500	
IV. Linhito	Linhito A	-	-	-	-	6.300	8.300	não aglomeração
	Linhito B	-	-	-	-	-	6.300	

Existem outras classificações, uma delas é a utilização do tipo de *coking* junto com matéria volátil, na qual foi adotada pela *National Coal Board in Britain – NCB*. Neste esquema, os carvões são divididos em grupos e classes que são identificados por código de três dígitos. Outra, a International Classification para carvões do tipo sub-betuminoso A do sistema ASTM, tem sido proposto com muitas similaridades com o sistema NCB: ele identifica a vari-

idade de carvões com um código de três dígitos, caracterizando o rank pela matéria volátil e valor calórico e, também, utilizando o índice de calor e de resfriamento. (Berkowitz, 1979)

Outra classificação é a alemã, a DIN, que é baseada nos estágio de coalificação e este nas propriedades físicas e químicas do carvão, conforme Tabela III.

Tabela III: Classificação dos rank dos carvões de acordo com a norma Alemã (DIN) e a Norte Americana (ASTM) (Stach *et al.*, 1982)

Rank		Ref. R _{m oil}	Vol. M. d.a.f. %	Carbon d.a.f. Vitrinite	Bed Moisture	Cal. Value Btu/lb (kcal/kg)	Applicability of Different Rank Parameters	
German	USA							
Torf	Peat	0.2	68					
Weich-	Lignite	0.3	64	ca. 60	ca. 75			
		0.4	60					
Matt-		0.5	56		ca. 35	7200 (4000)		
Glanz-	Sub-Bit. C	0.4	52					
	Sub-Bit. B	0.48	48	ca. 71	ca. 25	9900 (5500)		
Glanz-	Sub-Bit. A	0.52	44					
	Bit. A	0.6	40	ca. 77	ca. 8-10	12600 (7000)		
Flamm-	Bit. B	0.7	36					
Gasflamm-	Bit. A	0.8	32					
	High Vol. Bituminous	1.0	28					
Gas-	Medium Volatile	1.2	24	ca. 87		15500 (8650)		
Fett-	Bituminous	1.4	20					
	Low Volatile	1.6	16					
Ess-	Bituminous	1.8	12					
	Semi-Anthracite	2.0	8					
Mager-	Anthracite	3.0	4	ca. 91		15500 (8650)		
Anthrazit	Anthracite	4.0						
Metá-Anthr.	Meta-A							

2.1.9 – Classificação dos constituintes organo-petrográfico

Os carvões não são substâncias homogêneas, mas consistem de vários constituintes, que recebem o nome de maceral. Este varia amplamente a composição química e as propriedades físicas, porém não é cristalino, enquanto que os minerais inorgânicos têm uma composi-

ção química bem definida, e os minerais são cristalinos. Em carvões de baixo *rank*, em particular, podem ser divididos em tipo de maceral e variedade de maceral.

Atualmente, os macerais são divididos em três grupos, que são: a vitrinita, a liptinita e a inertinita. Em carvões de baixo *rank*, a humanita é usada no lugar da vitrinita, junto à maior variedade de macerais e de submacerais distinguíveis. As propriedades físicas e químicas dos macerais como composição fundamental, umidade contida, dureza, densidade e pela característica petrográfica diferem amplamente. Estas diferenças nas propriedades químicas e físicas são refletidas no comportamento tecnológico do maceral.

2.1.9.1 – Propriedades petrográficas

As propriedades do carvão são descritas através de microscópio com as luzes transmitida e refletida. A primeira pode ser usada até o *rank* de carvão betuminoso de baixo volátil, já nos níveis de *rank* mais altos o material orgânico fica opaco. No microscópio, a luz refletida tem a vantagem de se obter a classificação dos carvões, desde o *rank* da turfa ao antracito, podendo ser analisado quantitativamente e qualitativamente. Os parâmetros principais que distinguem o maceral em luz de incidente são:

- Reflectância e anisotropia – em carvões de baixo a médio *rank*, os três grupos de macerais podem ser distinguidos pelos diferentes níveis de cinza ou de reflectância, onde:
 - liptinita: são cinza-escuro, marrom e com baixa reflectância;
 - vitrinita: são de tons de cinza médio e com uma média reflectância;
 - inertinita: com cinza claro a branco e com alta reflectância.

Com o aumento do *rank*, as diferenças em reflectância entre os macerais diminuem devido a uma convergência das propriedades químicas e físicas. Com aumento do *rank*, o carvão se torna anisotrópico devido à aromatização crescente e à orientação de estrutura molecular. Este efeito é medido em termos de reflectância de máxima e mínima e é expresso como:

$$\text{Anisotropia} = \text{reflectância máxima} - \text{reflectância mínima}$$

Os grupos de macerais da liptinita e inertinita são, de um modo geral, isotrópicos.

- Morfologia, relevo e tamanho-forma, tamanho e estruturas internas são usadas para distinguir macerais, onde a reflectância é similar, mas difere na morfologia. Além das diferenças em morfologia e tamanho, os macerais são caracterizados pelas diferenças em relevo, quando observadas em luz incidente. Este efeito é causado pelas variações na dureza. Os macerais de liptinita, tal como: alginita, esporinita e cutinita tendem a mostrar um relevo positivo, se comparado com a matriz de vitrinita, enquanto que as outras, como resinita, não mostram alguma significância no relevo em comparação com a vitrinita. Os macerais do grupo inertinita é geralmente caracterizado pelo relevo positivo.
- Fluorescência – a fluorescência na microscopia tem sido usada na petrologia do carvão há muitos anos, mas, atualmente com as novas tecnologias, desenvolveram-se métodos e equipamentos em que esta técnica é aplicada com sucesso na petrologia do carvão, em estudos de maturação dos materiais orgânicos (quero-gênio) e em rochas sedimentares. Dos três grupos de macerais, o que tem maior sensibilidade a esta técnica é a liptinita, mostra autofluorescência, quando irradiada com luz azul ou ultravioleta, conforme a tabela III.

Tabela IV – Classificação das cores com o uso da fluorescência nos carvões (Diesel, 1992)

Grupos de macerais	Carvão marrom leve (linhito)	Carvão marrom duro (linhito)	Carvão betuminoso baixo rank	Carvão betuminoso alto rank
Liptinita	forte; verde, amarelo laranja e marrom	forte a moderado; amarelo esverdeado amarelo alaranjado marrom	forte a fraco amaralo, laranja e marrom	não fluoresce
Huminita e vitrinita	forte a fraco; amarelo e marrom ou não fluoresce	muito fraco; marrom; ou não fluoresce	muito fraco; marrom ou não fluoresce	não fluoresce
Inertinita	ou não fluoresce	ou não fluoresce	ou não fluoresce	ou não fluoresce

- Reflectância – Vários pesquisadores observaram que a reflectância da vitrinita é o melhor critério para determinar o *rank* em carvões betuminosos com menos que 30% de matéria volátil e também é utilizado como parâmetro para antracitos, e que ela é comparável ao conteúdo de umidade como um indicador em carvão betuminoso de alta volátil. A classificação da ASTM utiliza vários parâmetros para medir o *rank* de um carvão, tais como: matéria volátil,

quantidade de carbono, percentagem de umidade, valor calórico e a reflectância da vitrinita. O maceral do grupo da vitrinita utilizado para esta medição é a telocolinita, pois a sua forma é límpida, tem uma coloração em tons de cinza claro, e reflectância é em termos mediano aos outros dois grupos, a liptinita e inertinita, este com uma alta reflectância, enquanto que a liptinita é de menor reflectância.

2.1.10 – Maceral

Há três grupos básicos de macerais, que são: a vitrinita derivada da coalificação do tecido da madeira, a liptinita derivada de resinas e partes enceradas de vegetais e a inertinita derivada da parede de célula dos vegetais alteradas pela carbonização e bioquimicamente, segundo a classificação do ICCP System, 1994; Gammidge, 2001; Bustin *et al.* 1983; Stach *et al.* 1975 e Jablonski, 1996)

2.1.10.1 – Vitrinita

Os macerais de vitrinita são derivados da parede da célula do tecido da madeira, que são compostas quimicamente de polímeros, celulose e lignina. Este grupo é o mais abundante constituinte dos carvões com cerca de 50 a 90%. As vitrinitas se formam sob condições úmidas, num nível freático inferior, devido a uma taxa menor de subsidência da bacia de deposição. Neste grupo há dois macerais principais a *collotelinite* (telocolinita) e a *collodetrinite* (desmocolinita).

- *Collotelinite* = telocolinita – a característica mais excelente desta é que sempre tem uma reflectância ligeiramente mais alta que a desmocolinita no mesmo carvão. Isto tende a ocorrer em partículas maiores que usualmente são livres de outros macerais e pirita. A telocolinita não fluoresce quando excitada com a luz ultravioleta e possui menor teor de hidrogênio e matéria volátil que a desmocolinita.
- *Collodetrinite* = desmocolinita - quase sempre a desmocolinita é o maceral mais abundante e apresenta grãos, formando compostos de uma massa, na qual estão dispersos os macerais de liptinita e inertinita. Tem uma cor variando de cinza claro a preto e sempre é anisotrópico.

2.1.10.2 – Liptinita

O maceral liptinita é derivado de partes de vegetais encerados e resinoso, tais como: esporos, cutículas e resinas, que são resistentes ao aquecimento e à diagênese. Eles geralmente constituem cerca de 5 a 15% dos carvões e com uma reflectância que varia de 1,35 a 1,40, sendo bem menor que a vitrinita de um mesmo carvão. Este grupo é muito sensível à coalificação, pois eles tendem a desaparecer em carvão com o *rank* médio volátil e são ausentes nos carvões de *rank* baixo volátil. Quando a liptinita está presente no carvão, tende a conservar os vegetais originais e tem a seguinte classificação:

- *Esporinita* – Este é o maceral mais comum da liptinita e é derivado de um revestimento oleoso fóssil de esporos e pólen. Geralmente, ela tem uma forma de esferóide achatado, podendo mostrar vários tipos de ornamentos. Em seções polidas, à luz incidente, os grãos são paralelos ou próximos ao paralelismo ao plano das camadas do carvão, podendo, também, aparecer sob a forma de discos ou de forma oval, sendo confundido com a resinita.
- *Cutinina* – não é um maceral muito abundante, ele geralmente é encontrado na maioria dos carvões e são derivados da camada exterior encerada de folhas, raízes, e talos. Ocorre como uma fibra longa que, freqüentemente, tem uma superfície que é bastante espessa, e a outra é crenulada. A reflectância é usualmente a mesma que a da esporinita.
- *Resinita* – o maceral resinita é pouco presente na maioria dos carvões abaixo da classificação de betuminoso de médio volátil e são ausentes nos carvões de betuminoso de alto volátil. Ela pode ocorrer de duas maneiras: uma primária, formando-se ao mesmo tempo em que a deposição, com corpos ovóides com um longo eixo de 25 a 200 μm de distância; a secundária, de idade terciária, mostra uma relação com a intrusiva, com uma textura de fluxo, carregando xenólitos de carvão. À análise espectral de fluorescência, a resinita é distinguida de outros macerais e, também, entre os diferentes tipos de resinitas.
- *Alginita* – o maceral alginita é inicialmente diferenciado de outros macerais do grupo da liptinita devido ao alto conteúdo de hidrogênio, aparecendo totalmente preto em superfície polida sob óleo de imersão. Sob a irradiação de ultravioleta aparece com uma coloração amarela pálida, sendo facilmente dis-

tinguida dos outros macerais deste grupo. Nos carvões de baixo *rank*, a alginita exibe uma fraca reflectância e uma forte fluorescência, se comparado com todos os macerais. Ela apresenta uma certa dureza ao polimento, tendo um relevo positivo sobre as superfícies polidas e, também, exibe uma densidade baixa.

2.1.10.3 – Inertinita

O maceral inertinita é derivado da vegetação que tem sido fortemente alterada e degradada no estágio da turfa na formação do carvão, podendo alcançar até 70% nos carvões. O fóssil de carvão vegetal forma a fusinita e a semifusinita. Eles apresentam a maior reflectância de todos os macerais e são distinguidas por seus espectros e estruturas, dos quais podem ser classificados como:

- *Fusinita* – o maceral fusinita é visto na maioria dos carvões e possui a estrutura do carvão vegetal, apresenta uma alta reflectância, é distinguido pela sua textura celular e está geralmente quebrado em pequenos fragmentos.
- *Semifusinita* – o maceral semifusinita tem uma textura celular, possuindo as mesmas características da fusinita, mas apresenta uma reflectância menor que ela.
- *Macrinita* – o maceral macrinita é o menor componente da maioria dos carvões e, usualmente, ocorre como estruturas ovóides, apresentando a mesma reflectância da fusinita.
- *Micrinita* – o maceral micrinita são partículas finas granulares de alta reflectância, podendo ser associada com a liptinita e, às vezes, tem uma aparência de substituir a liptinita de fato.
- *Inertrodetrinita* – o maceral inertrodetrinita consiste numa forte reflexão de finas partículas, normalmente menor que 30 μm . Em geral, eles são fragmentos ou remanescentes da fusinita, semifusinita e macrinita. A reflectância da partícula de inertrodetrinita pode variar dentro de grandes limites, mas sempre é mais alto que a reflectância de vitrinita. A sua cor varia de branco a cinza pálido em luz refletida, e preta e marrom escuro em luz transmitida e são caracterizadas pelo alto conteúdo de carbono e baixo de hidrogênio.

2.1.10.4 – Matéria mineral

Os carvões Gonduânicos têm comumente um teor mais elevado de matéria mineral total, se comparado com os do Carbonífero europeu. Os altos teores destes minerais nos carvões Gonduânicos estão relacionados a vários fatores:

- Uma taxa de subsidência intermitente temporária ou localmente alta, que somente em casos extremos causaria uma deposição alóctone;
- Um relevo fisiográfico considerável próximo da bacia de acumulação;
- Deposição da sedimentação alternada de águas marinhas e da doce;
- Intrusões ígneas geralmente encontrados nos carvões Gonduânicos e que aumentam o teor da matéria mineral da camada afetada, especialmente em relação aos carbonatos.
- Os principais minerais dos carvões Gonduânicos formam-se na fase singenética e epigenética e podem ser agrupados em: silicatos (quartzo, calcedônia, opala), argilo-minerais (caolinita, montmorilonita, ilita), carbonatos (calcita, dolomita, siderita, ankerita, smitsonita, cerusita) sulfetos (pirita, esfarelita, galena, calcopirita, calcosita), sulfatos (gipsita, epsomita, melanterita, jarosita, celesterita, anidrita, barita), hidróxidos (limonita, lepidocrocita, hidrargilita, goetita, diáporo, hematita), cloretos (halita, silvinita), fosfatos (apatita, fosforita) e enxofre elementar.

2.2 – Geologia do carvão

Este tópico foi dividido em carvões gonduânicos e carvões brasileiros para se ter uma melhor compreensão da geologia do carvão, segundo Silva, 1999 e 1994; Ade, 1993; Correia e Silva, 1987a, 1988 e 1992.

2.2.1 – Carvões Gonduânicos

Os grandes depósitos descobertos na Europa e ao leste da América do Norte datam do Período Carbonífero, mesmo conhecendo as variedades de suas propriedades, pois se sabe que eles pertenciam a uma família reconhecível. À medida que as reservas do mundo foram exploradas, tomou-se o conhecimento de depósitos de outros Períodos, desde o Permiano até o Ter-

ciário. As enormes reservas de carvões sub-betuminosos e linhitos com alto teor de umidade, típicos do fim do Mesozóico ou do Terciário, localizados na Europa, oeste da América do Norte, sudoeste da Austrália e outras partes do mundo, tiveram que ser consideradas como outra grande família.

A Geocronologia cita dois grandes períodos de formação destes depósitos: no primeiro, abrange o Carbonífero Inferior e Superior e o Permiano, na Era Paleozóica; no segundo, abrange o Cretáceo Superior (Era Mesozóica) e o Terciário (Era Cenozóica), conforme se pode verificar na tabela V.

Com os diversos estudos realizados no mundo sobre o carvão, os pesquisadores concluíram que estas massas de terra outrora deveriam estar muito próximas, sendo que hoje estão derivadas de suas posições atuais. Como o continente Gonduânico, *Gondwanaland* – nome dado a este supercontinente hipotético – que posteriormente se desfez em continentes e subcontinentes, compartilhando, assim, dos mesmos ambientes climáticos, de sedimentação e geográfico. O início da sedimentação ocorreu no final do Período Carbonífero Superior, porém foi no Período Permiano que ocorreu a formação do carvão.

As condições climáticas, durante a formação dos principais depósitos de carvão do Continente Gonduânico, foram muito diferentes daqueles dos carvões do Carbonífero Europeu. O clima era frio-temperado com alternância de períodos de seca e chuva. Já no final do Permiano, o clima tornou-se quente a quente temperado. A flora caracterizou-se pelas florestas *Glossopteris*, semelhantes às atuais subárticas, estas em contraste com as florestas de *Lepidophyta*, no Hemisfério Norte, eram caracterizadas por árvores com desenvolvimento sob condições tropicais e subtropicais.

Os carvões do Carbonífero europeus têm seu desenvolvimento associado com um geossinclinal, enquanto que os carvões Gonduânicos estão associados às bacias de plataforma continental numa região razoavelmente consolidada. A formação dos depósitos do carvão Gonduânico foi precedida por uma invasão glacial, e os estratos que a seguiram depositaram-se como uma espessa série de sedimentos fluviais, lacustres ou deltaicos, com acumulações intercaladas de camadas de turfa, que posteriormente formaram as jazidas de carvão.

Tabela V – Reservas ao longo dos Períodos geológicos, (Jablonski, 1996 comunicação interna)

Período Geológico	Antracito %	Carvão %	Linhito %	Total %
Terciário	0,04	16,20	38,20	54,44
Cretáceo	0,01	0,25	0,08	0,34
Jurássico	0,18	2,30	1,55	4,03
Triássico	0,27	0,25	0,02	0,54
Permiano	1,58	14,77	0,56	16,91
Carbonífero Superior	0,91	21,31	-	22,22
Carbonífero Inferior	-	1,44	0,08	1,52
Devoniano	-	-	-	-
Total	2,99	56,92	40,49	100,00

Os carvões do Gondwana tendem a ser foscos, contendo mais inertinita e apresentam uma sedimentação sobreposta de arenitos, que são altamente permeáveis, permitindo, assim, a percolação de água subterrânea e também o acesso da matéria mineral, geralmente fina. As fraturas e fissuras pouco se desenvolveram e, como consequência, pouca quantidade de camadas de vitrinita espessas e regulares.

2.2.2– Carvões Brasileiros

Este tópico foi segmentado em Bacias para melhor caracterizá-las devido às suas peculiaridades, tais como: tectonismo, tipos de macerais, bacias formadoras e nomes diferentes para os Membros da Formação Rio Bonito, dentre outras.

2.2.2.1 - Bacia Carbonífera do Rio Grande do Sul

A Bacia do Paraná é uma bacia intratônica desenvolvida sobre a crosta continental e preenchida com rochas sedimentares e vulcânicas, com idade variando do Ordoviciano ao Cretáceo (Zalan *et al.* 1990). Esta bacia está situada na parte centro-leste do Continente Sul-

Americano e ocupa cerca de 1.100.000 km² da área brasileira, além de mais de 300.000 km² distribuídos entre os territórios do Uruguai, Paraguai e Argentina. Segundo Schneider *et al.* (1974), a Bacia do Paraná está preenchida por camadas de 5.000 m de rochas sedimentares paleozóicas, mesozóicas, lavas vulcânicas e, localmente, rochas cenozóicas.

De acordo com Zalan *et al.* (1990), o conjunto de rochas sedimentares e vulcânicas que constituem a bacia, representa a superposição de pacotes depositados, no mínimo, em três diferentes ambientes tectônicos decorrentes da dinâmica de placas, que conduziu à evolução do Gondwana. Os limites da bacia foram muito variáveis no tempo, e, por isso, sua configuração atual não é o registro daquilo que já foi um grande mar diretamente conectado com o Oceano Pacífico Paleozóico.

As jazidas carboníferas do Rio Grande do Sul estão localizadas na borda sudeste da Bacia do Paraná (Fig. 01). As camadas de carvão ocorrem, litoestratificamente, na Formação Rio Bonito, Grupo Guamá, Supergrupo Tubarão (Schneider *et al.* 1974) e fazem parte da seqüência deposicional IV da megasseqüência Carbonífera Eotriássica de caráter geral transgressivo, conforme Milani *et al.* (1994). Na base da seqüência IV, ocorrem depósitos fluviais (de mar baixo), que evoluem para condições favoráveis à formação de turfeiras, provavelmente associada a uma paleogeografia de lagos.

Com base nos estudos de petrografia do carvão (Ade, 1993) e da estratigrafia de seqüências (Alves, 1994), Alves & Ade (1996) e Silva (1999), eles consideram que os carvões da jazida de Candiota foram depositados em um sistema laguna-barreira. Posteriormente, Holtz (1998) estendeu a idéia para as principais camadas de carvão situadas na Formação Rio Bonito no Rio Grande do Sul.

A análise paleoambiental deposicional dos carvões das jazidas do Leão, Pantano Grande, Iruí, Capané e São Sepé permitem a identificação de um sistema flúvio-deltaico, associado a um sistema de barreira litorânea que, em determinado momento da evolução da área, foi afogado por um pulso transgressivo, o qual condicionou a transformação da parte da região em uma plataforma rasa sob intensa ação das ondas e tempestades (Lopes, 1990).

De acordo com Lopes (1995), a repetição das camadas de carvão, estudadas nas regiões citadas acima, estão relacionadas a fatores locais de condicionamento da evolução dos sistemas deposicionais que contribuíram para a formação do registro sedimentar e fechamento de lagunas com formação de pântanos atrás de sistemas de barreiras. O registro da sedimenta-

ção gonduânica, nesses setores, segundo este autor, inicia por rochas areno-pelíticas rítmicas, paraconglomerados e folhelhos pretos, relacionados à Formação Rio do Sul, do Grupo Itararé. O Grupo Guatá ocorre completo, com as Formações Rio Bonito e Palermo. As rochas características da Formação Rio Bonito, na região, estão representadas por arcóseos grossos a conglomerados, paraconglomerados, siltitos cinzas a cinzas-escuros e carbonosos, carvão e arenitos quartzosos finos e médios.

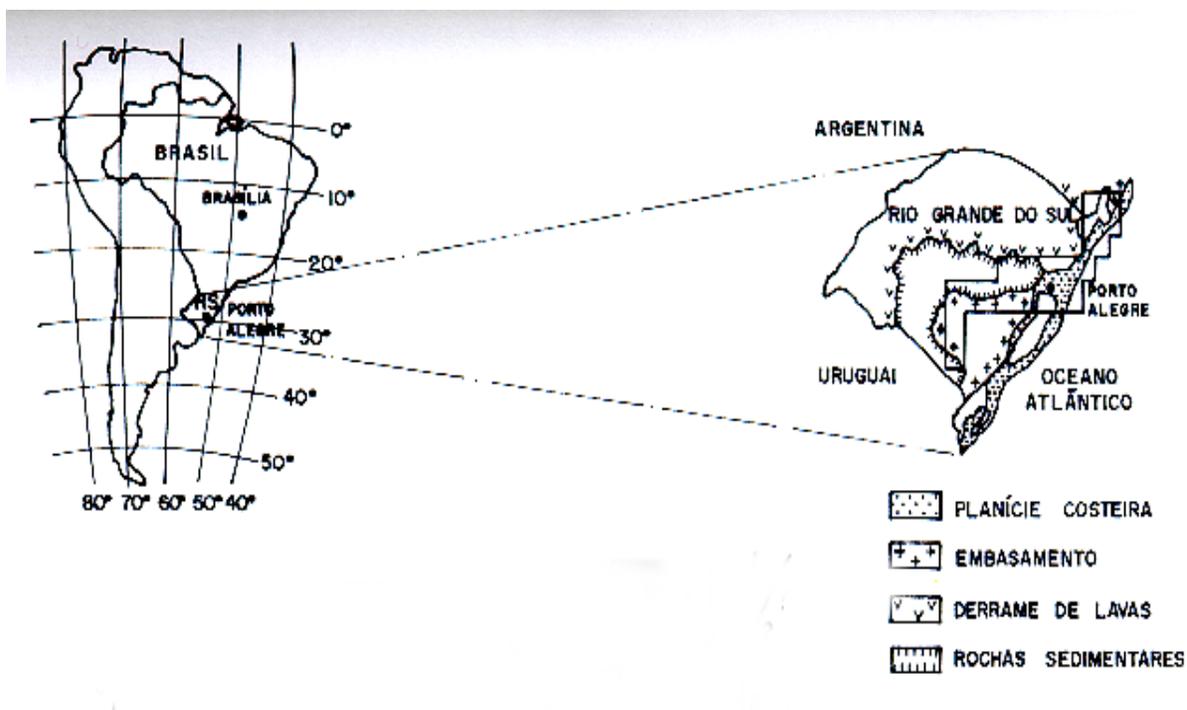


Figura 1: Mapa de situação das jazidas de carvão no Rio Grande do Sul

2.2.2.2 - Bacia Carbonífera de Santa Catarina

A faixa de sedimentos gonduânicos, na qual a jazida de carvão de Santa Catarina está situada na grande depressão periférica da margem oriental da Bacia do Paraná (Fig.02), é formada, de um lado, pelo Escudo Cristalino (a leste) e, de outro, pelo Planalto Basáltico da Serra Geral, conforme Bortoluzzi, 1978.

Esta jazida faz parte do Grupo Tubarão, Subgrupo Guatá, Formação Rio Bonito, onde estão distinguidas as seguintes camadas de carvão, relacionadas de cima para baixo : Treviso, Barro Branco, Irapuá, « A », « B », Ponte Alta, Bonito, Pré bonito, « C » e « D ».

A Formação Rio Bonito é formada de sedimentos eminentemente clásticos, sendo secundário seu conteúdo em rochas químicas (calcárias) e organógenas (calcários e carvões), conforme estabelecido por Schneider *et al.* (1974). Este pacote está dividido, de cima para baixo, em Membros Siderópolis, Paraguaçu e Triunfo, sendo que nos dois primeiros estão as Camadas Barro Branco e Bonito, respectivamente, que são as estudadas neste trabalho. Estas camadas estão separadas entre si por um pacote sedimentar cuja espessura varia de 33,0 a 65,0 metros com uma média aproximada de 47,5 metros. Essas camadas são bem representativas na bacia carbonífera.

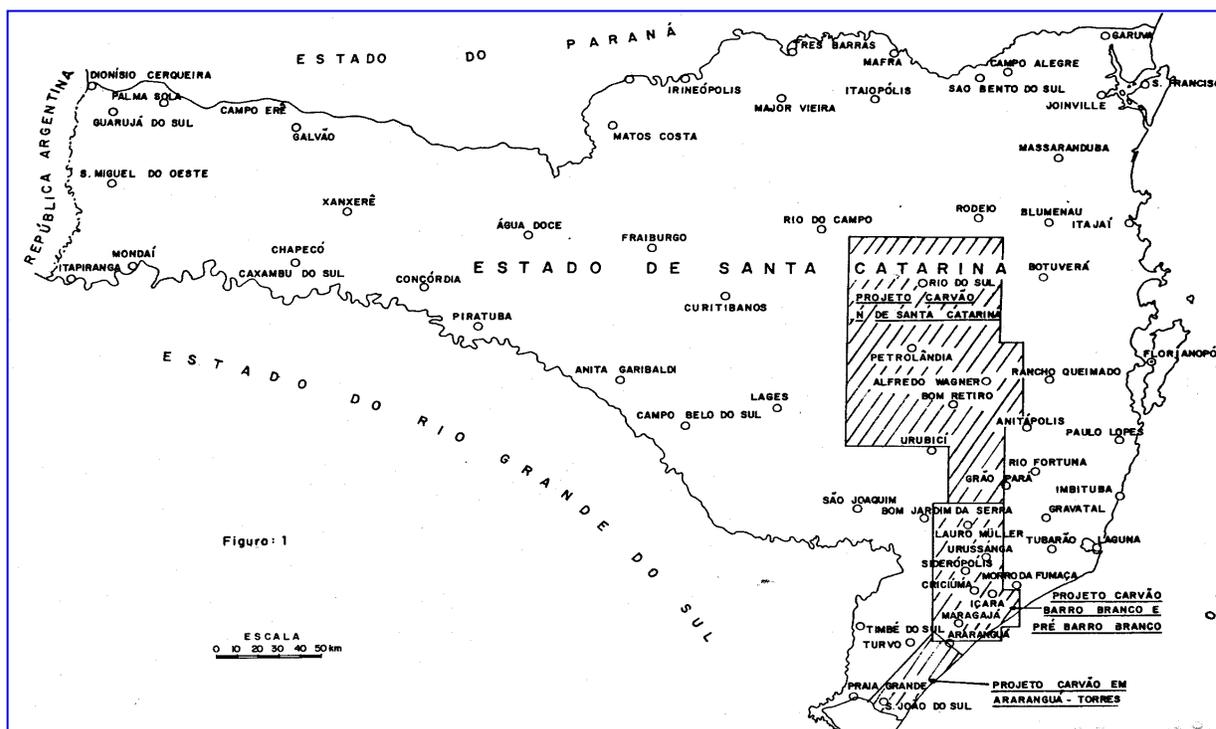


Figura 02: Mapa de situação das jazidas de carvão de Santa Catarina

A camada Barro Branco é a mais importante economicamente, a mais estudada e a mais uniformemente distribuída, constituindo numa referência estratigráfica. Estruturalmente, comporta-se como uma monoclinal com suave mergulho regional de 1° para WSW e também se apresenta intensamente cortada por falhas, com mergulhos de até 15° . Na porção norte da bacia, esta camada ocorre em cotas de até 400 m acima do nível do mar, enquanto ao sul em cotas de até 350 m. De um modo geral são carvões com baixos teores de cinza.

Em essência, este tipo de carvão pode ser designado como carvão opaco listrado, apresentando megásporos e micrósporos em grande quantidade e com mais frequência que as ou-

tras camadas de carvão, indicando que provavelmente se originou mais distante da margem da bacia que as demais. Em resumo, tratam-se de carvões com alto teor em voláteis e um baixo teor de Vitrinita e Exinita, o que não lhes proporcionam elevadas propriedades coqueificantes.

Das camadas anteriores à Barro Branco que merece destaque é a Bonito. Ela comporta-se como uma monoclinal com direção N70°W, mergulhando em 1° para SW. A avaliação desses carvões com base nas análises físicas e químicas tem alto teor de cinza, baixo rendimento metalúrgico, teor de enxofre variável e alto teor em matéria volátil, conforme Bortoluzzi *et al.* (1978), embora sua relação carvão metalúrgico/carvão vapor é de apenas 3,0.

A camada Bonito é muito rica em minerais, especialmente piritita presente, não apenas como nódulos, mas também sob a forma de glóbulos na Trimacerita, indicando um ambiente fortemente redutor na época de sua deposição.

2.3 - Reserva e Produção

A disponibilidade primária mundial de carvão mineral (coqueificável e betuminoso) é da ordem de 908 milhões de toneladas, conforme Tabela IV. A Ásia, Oceania, Europa, Eurásia e os Estados Unidos concentram 92,3% das reservas mundiais. O Brasil participa com 1,1% no total destas reservas. O Rio Grande do Sul responde por 9,4% das reservas do País.

Nos últimos anos, a produção do carvão teve um crescimento muito rápido, e os países que capitanearam este acréscimo foram a China, Índia e os Estados Unidos, haja vista que em 1980 respondiam por 39% da produção mundial e, na atualidade, respondem por 61% do total. Já a Europa reduziu sua produção em, aproximadamente, 40% ante a produção mundial no mesmo período.

A China consumiu 37% de carvão mineral no mundo, absorvendo quase toda a produção interna. Em 2005, este país, individualmente, representou 77% do crescimento do consumo. Fora a China, o consumo foi bem modesto, elevando-se em apenas 1.8%, entretanto acima da média dos últimos dez anos, que foram de 1.5%. Os Estados Unidos e a Índia dividiram este papel, o primeiro para atenuar os efeitos do aumento no preço do gás e o segundo, para substituir a importação de petróleo e gás.

A oferta mundial de geração elétrica é de 39% para carvão, 17% para gás natural, 17% para nuclear, 17% para hídrico, 8% para petróleo e 2% para outras fontes. No Brasil têm-se 93% para hídrico, 4% para petróleo e gás natural, 2% para carvão mineral e 1% para nuclear.

Tabela VI – Reservas e produção mundial (Sumário Mineral 2006-DNPM)

Discriminação	Reservas		Produção		
	Carvão (milhões t)	Participação (%)	Carvão (Milhões t)		Participação (%)
	2005	2005	2004	2005	2005
América do Norte	254.432	28,0	1.084	1103	18,8
Canadá	6.576	0,7	66	65	1,1
Estados Unidos	246.643	27,1	1.008	1.028	17,6
México	1.211	0,1	10	10	0,2
América do Sul e Central	19.893	2,2	68	74	1,3
Brasil	10.113	1,1	5	6	0,1
Colômbia	6.611	0,7	54	59	1,0
Outros	3.169	0,3	8	9	0,2
Europa e Eurásia	287.095	31,6	1.184	1.192	20,4
Alemanha	6.739	0,7	208	203	3,5
Cazaquistão	31.279	3,4	87	86	1,5
Federação Russa	157.010	17,3	282	298	5,1
Polônia	14.000	1,5	162	160	2,7
Ucrânia	34.153	3,8	81	78	1,3
Outros	43.914	4,8	365	367	6,3
África	50.336	5,5	249	253	4,3
África do Sul	48.750	5,4	243	247	4,2
Zimbábue	502	0,1	4	4	0,1
Outros	1.084	0,1	2	2	0,0
Ásia e Oceania	296.889	32,7	2.992	3.230	55,2
Austrália	78.500	8,6	361	369	6,3
China	114.500	12,6	1.992	2.190	37,4
Índia	92.445	10,2	408	426	7,3
Indonésia	4.968	0,5	132	135	2,3
Outros	6.476	0,7	99	109	1,9
Total	908.645	100,0	5.577	5.852	100,0

Fontes: BP Statistical Review of World Energy 2006 e DNPM

O Brasil teve um crescimento constante durante a década de 90; após, estabilizando em um patamar em torno de 6×10^6 t, O Rio Grande do Sul possui a maior reserva medida do país com 79,33%, Santa Catarina com 20,56%, Paraná com 0,06%, São Paulo com 0,03% e Maranhão com 0,02%, conforme Tabela VII. Em termos de faturamento, o carvão de Santa Catarina participa com 64,94%, o Rio Grande do Sul com 32,84% e o Paraná com 2,22%; isto é devido ao poder calorífico superior dos carvões catarinenses, dentro de um total de R\$ 321.000.000,00.

Tabela VII - Reservas brasileiras de carvão mineral (Anuário DNPM, 2006)

Anuário Mineral Brasileiro - 2006				
Carvão Mineral				
Unidades da Federação	Reservas			
	Medida	Indicada	Inferida	Lavrável
	(t)	(t)	(t)	(t)
Maranhão	1.092.442	1.728.582	-	1.092.442
Paraná	4.184.006	212.000	-	3.509.006
Rio Grande do Sul	5.255.915.580	10.098.475.668	6.317.050.409	5.376.789.122
Santa Catarina	1.354.211.132	593.216.494	217.069.278	1.212.340.482
São Paulo	2.050.411	1.111.284	1.262.500	2.050.411
Total	6.617.453.571,00	10.694.744.028,00	6.535.382.187,00	6.595.781.463,00

Em termos de faturamento o carvão de Santa Catarina participa com 67,03%, o Rio Grande do Sul com 29,78% e o Paraná com 3,19%, isto é devido ao poder calorífico superior dos carvões catarinenses, dentro de um total de R\$ 500.190.446,00. (Tabela VIII).

Tabela VIII – Produção bruta, beneficiada e o valor comercial (Anuário DNPM, 2006)

Estado	Carvão					
	Bruta		Beneficiada		Valor Total	
	Quantidade	Valor	Quantidade	Valor	(R\$)	(%)
	(t)	(R\$)	(t)	(R\$)		
Paraná	-	-	78.000	15.955.924	15.955.924	3,19
Rio Grande do Sul	423.666	4.858.079	3.224.856	144.132.679	148.990.758	29,78
Santa Catarina	8.980	269.425	2.467.542	335.074.339	335.343.764	67,03
Total	432.646	5.127.504	5.770.398	495.162.942	500.290.446	100,00

O Brasil é importador de carvão mineral. Observa-se na tabela abaixo que, apesar do notável crescimento das exportações de alguns tipos de produto, as quantidades são insignificantes quando comparadas à quantidade e ao valor das importações, refletindo negativamente na balança comercial do País. Os países que o Brasil importa carvão são : Austrália com 31,17%, os Estados Unidos com 26,21%, a China com 11,15%, a África do Sul com 9,21%, o Canadá com 8,24% e outros com 14,02%.

Tabela IX – Fluxo de Comércio Exterior (Anuário DNPM, 2006)

Especificações	Brasil Importação			Brasil Exportação		
	2004	2005	Dif. %	2004	2005	Dif. %
Bens primários	18.464.183	17.310.744	-6,25	754	1.573	108,62
Hulha antracita, não aglomerada	1.565.289	1.561.473	-0,24	295	152	-48,47
Hulha betuminosa, não aglomerada	2.788.985	2.423.600	-13,10	108	384	255,56
Outras hulhas, mesmo em pó, mas não aglomerada	2.064.236	11.765.328	-2,48	10	10	0,00
Linhito, mesmo em pó, mas não aglomerado	50	54	8,00	0	5	-
Coques de hulha, de linhita ou de turfa	2.045.539	1.560.182	-23,73	340	1.022	200,59
Semi coques de hulha ou turfa	84	107	27,38	1	0	-100,00

Considerando-se apenas as reservas medidas de carvão nacional, admite-se haver um potencial teórico para instalação de 28.000 MW em novas usinas termelétricas, considerando a

recuperação de 50% no beneficiamento e operando com 60% de fator de capacidade média por 25 anos, rendimento de 33% e consumo específico de 815 kg/MWh. O consumo das usinas existentes é de $166,2 \times 10^6$ t, e o consumo das usinas em projeto é de $198,9 \times 10^6$ t.

Os projetos termelétricos previstos para geração de energia elétrica no Sul do País, são:

- Unisina Presidente Médici (Candiota III) – Localizada em Candiota-RS com um consumo de 1.085 kg/MWh; tecnologia é de combustão pulverizada; início em 2010; investimento global US\$ 427,9 milhões;
- Usina Jacuí – localizada em Charqueadas-RS; tecnologia de combustão pulverizada; início em 2009; investimento global US\$ 500 milhões;
- Usina Termelétrica Sul Catarinense-USITESC – localizada em Treviso-SC; consumo de carvão de 1.085 kg/MWh; tecnologia de combustão em leito fluidizado circulante; investimento global US\$ 600 milhões;
- Usina Seival – localizada em Candiota-RS; consumo de carvão cerca de 1.000 kg/MWh.; tecnologia de combustão pulverizada; investimento global US\$ 800 milhões.

No início dos anos 90, houve um avanço mundial nas reduções de emissões de SO_2 e NO_x e significativas melhoras na diminuição de material particulado, baseadas nas pesquisas governamentais e de empresas privadas.

2.4 – Beneficiamento a seco

O processo de beneficiamento a seco é provavelmente o método gravimétrico de concentração mais complexo, por causa de suas contínuas variações hidrodinâmicas. Neste processo, a separação dos minerais de densidades diferentes é realizada em um leito dilatado por uma corrente pulsante de água, produzindo a estratificação dos minerais. (Lins, 1998).

A concentração gravimétrica é a mais importante unidade de operação de um circuito de beneficiamento de carvão. Normalmente, as análises de afunda-flutua de uma amostra representativa de carvão é executada num laboratório para predizer, teoricamente, a quantidade de produto e de cinza contidos num carvão, viável num concentrador gravimétrico ideal com diferentes densidades. A série de curvas de lavabilidade, resultantes dos dados da análise de afunda-flutua de uma amostra de carvão, gera muitas informações úteis relativo à sua tendência para produzir um carvão limpo e de qualidade desejada.

O Índice de Lavabilidade (Washability Index = IW) segundo Sarkal *et al.* (1962 e 1977) e Govindarajan and Rao (1994) in Majumder & Barnwal (2004), tem sido proposto para comparar análises de lavabilidade de carvões com diferentes características, usando um único parâmetro. A declividade das curvas oferece uma indicação quanto à facilidade ou não no beneficiamento. Assim, partículas com densidade próximas a da densidade de separação apresentam maior probabilidade de reportar ao produto impróprio, causando contaminação do produto flutuado por partículas densas e vice-versa, segundo Sampaio & Tavares (2005).

A variação da proporção de partículas com densidades próximas à densidade de separação é chamada curva de Material de Gravidade Próxima ou *Near Gravity Material*, ou simplesmente NGM. Ela é preparada a partir da proporção de partículas com densidade dentro de um intervalo estabelecido, em função da densidade de separação. A quantidade de material com densidade próxima à de separação é, normalmente, considerada como aquela correspondente ao intervalo de $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ com relação à densidade de corte.

O NGM é um importante parâmetro em relação às outras curvas de lavabilidade, pelos seguintes motivos:

- A densidade de separação de diferentes carvões necessários para produzir carvão limpo e cinza, varia de um carvão para outro e o valor de NGM varia, também para cada carvão;
- Dois carvões podem ter o mesmo índice, mas os conteúdos de NGM individuais podem diferir, conseqüentemente, a dificuldade de beneficiar estes dois carvões será diferente;
- Dois carvões com o mesmo valor de NGM podem ter diferentes distribuições na curva de cinza;
- O grau de dificuldade do beneficiamento varia com a distribuição da curva NGM para diferentes densidades e nenhum outro índice está habilitado para indicar a maior dificuldade nos intervalos de densidade.

Existem duas teorias que abordam a estratificação vertical na jigagem, a hidrodinâmica que considera o movimento das partículas, cuja descrição típica foi feita por Gaudin (1939), que sugeriu que os três mecanismos estão envolvidos: sedimentação retardada, aceleração diferencial e consolidação intersticial; e a da energia potencial. (Sampaio & Tavares, 2005)

A estratificação ocorre no período em que o leito está aberto, dilatado, e resulta da sedimentação retardada, acentuada pela aceleração gravitacional. Através destes mecanismos de-

positam os grãos finos/leves em cima e os grossos/pesados no fundo do leito. A consolidação intersticial, durante a sucção, põe as partículas finas/pesadas no fundo e as grossas/leves no topo do leito. Os efeitos de impulsão e sucção, se ajustados adequadamente, devem resultar em uma estratificação quase perfeita, segundo a densidade dos minerais. (Lins,1998)

Os jiques são compostos por um tanque com duas secções: uma onde está localizado o crivo e na outra, está o êmbolo ou um eixo excêntrico, este pode estar localizado acima, na lateral ou embaixo do tanque, na qual ocorre a compressão e a descompressão da água fazendo o leito de partículas sobre o crivo expandir e comprimir, ocorrendo, assim, a estratificação do leito.

2.4.1. – Teoria hidrodinâmica

2.4.1.1 - Aceleração diferencial

Em grande parte dos concentradores gravimétricos, a distância percorrida por uma partícula, sem que o seu curso seja alterado ou interrompido por outras partículas ou por uma superfície, é muito pequena, conforme Lins (1998), Carisso e Chaves (2001), Benvindo da Luz *et al.* (2004), Sampaio e Tavares (2005).

Assim, as partículas estão sujeitas às constantes acelerações/desacelerações, e esses períodos de acelerações/desacelerações podem representar uma fração significativa de tempo total de deslocamento dessas partículas.

O equilíbrio das forças que atuam sobre a partícula colocada num fluido e com a velocidade zero, é dado por:

$$a_i = \frac{dv}{dt} = g \left(1 \frac{\rho}{\sigma} \right),$$

onde,

a_i = aceleração da partícula (m/s^2);

dv = diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da partícula (m);

dt = diâmetro de uma esfera com o mesmo tamanho da partícula (mm);

g = aceleração gravitacional (m/s^2);

ρ = densidade da partícula (g/cm^3);

σ = densidade do fluido (g/cm^3);

A equação mostra que a aceleração inicial é função de apenas das densidades do sólido e do fluído, sendo independente do tamanho da partícula.

2.4.1.2 – Sedimentação retardada diferencial

Segundo Lins (1998), Carisso e Chaves (2001), Benvindo da Luz *et al.* (2004), Sampaio e Tavares (2005) relacionam que a razão de sedimentação é dada pelo quociente dos tamanhos das partículas de dois minerais que apresentam a mesma velocidade terminal de sedimentação, resulta quanto maior a razão de sedimentação, mais fácil é a separação das partículas por densidade.

Na separação têm-se que levar em conta as densidades do pesado, leve e a aparente, pois a diferença entre os tamanhos das partículas dificultam esta separação e, para minimizá-la, a densidade aparente deve estar próxima à densidade do material leve, podendo-se verificar na sedimentação das partículas grossas (regime de Newton), enquanto que, nos mais leves (regime de Stokes), a separação pelo mecanismo de sedimentação é menos eficaz.

2.4.1.3 – Consolidação ou percolação intersticial

As partículas de diferentes tamanhos ou densidades não percorrem a mesma distância num período curto de tempo, ela irão se depositar num substrato em diferentes instantes. AS partículas grosseiras, ao se depositarem primeiramente, deixam entre si espaços vazios que serão preenchidas e retidas por partículas menores. Este fenômeno ocorre quando o período de sucção, nos jigues, for suficientemente longo, para que a percolação intersticial ocorra.

2.4.2 – Teoria da energia Potencial

Esta teoria é baseada numa diferença de energia potencial gravitacional entre os estados misturados e estratificados em relação à densidade, sendo responsável pela estratificação na jigagem (Sampaio e Tavares, 2005).

Segundo Lins (1998), Casirro e Chaves (2001) e Benvindo da Luz *et al.* (2004), onde ocorrem duas situações hipotéticas, sendo a primeira, uma mistura binária perfeita, antes da estratificação, composta de partículas leves com peso G_1 , e partículas pesadas com peso G_2 , com um único centro de gravidade. O da mistura, a uma distância que corresponde à metade da altura (h) total do leito; a segunda, com uma estratificação perfeita, onde passarão a existir

dois centros de gravidade (h_1 e h_2), correspondente a cada um dos componentes da mistura. A energia gasta para a estratificação ΔE é dada por:

$$\Delta E = \frac{1}{2}(G_2 h_1 - G_1 h_2),$$

onde:

h_1 = altura total do leito constituído de partículas de peso G_1 (m);

h_2 = altura total do leito constituído de partículas de peso G_2 (m).

A energia é sempre positiva, resultando num rebaixamento do centro de gravidade do sistema. Este mostra que numa mistura binária homogênea ele é instável e que busca um estado de estabilidade. A estratificação está relacionada a uma redução de energia, sendo essa redução a causa física para que o processo ocorra.

2.4.3 – Jigue a seco ou pneumático

Em décadas passadas, anterior aos anos 80, este equipamento foi muito usado nos Estados Unidos, não só nas minas de carvão como também em outros minérios. Em específico, o carvão, o seu apogeu foi em 1960, segundo Arnold (1991) com uma capacidade instalada de mais de 20 milhões de toneladas/ano, conforme figura 3.

A eficiência desse processo, que utiliza o ar, é menor que o a úmido e é usada em certas circunstâncias, tais como: falta de água na região, material muito higroscópico, áreas com problemas de meio ambiente (efluentes), pouco espaço para construções de bacias de decantação e de recebimento de efluentes e para materiais em que seu produto necessita de filtragem e secagem, processos estes muito dispendiosos.

Atualmente, o beneficiamento a seco é utilizado numa variedade de minérios como a wolfranita, cromita, zircão, diamantes, remoção das piritas nos carvões e, também, em outras áreas como na reciclagem de metais, na petroquímica e na agroindústria.

As vantagens desse sistema é o baixo custo de operação e investimento, baixas unidades e de alta capacidade de separação a seco, pois as partículas sedimentam em torno de cem vezes mais rápido que a úmido. Eliminando, assim, qualquer risco de poluição de efluentes líquidos e a eliminação dos equipamentos de filtragem e secagem.

A desvantagem desse processo é a limitação granulométrica, pois as partículas menores que 0,6 mm são impraticáveis para o beneficiamento de carvão, da mesma forma minérios com densidades elevadas e com tamanhos de partículas a baixo de 0,2 mm.

Outro quesito essencial para que ocorra uma eficiência no beneficiamento é a umidade. **O material deve ter no máximo 6% de umidade**; qualquer aumento gera uma maior densidade aparente, devido à formação de aglomerados, conforme Sampaio & Tavares (2005).

O princípio desse processo é baseado no ar, sendo a densidade dele insignificante se comparada com a água. Para que o processo tenha uma eficiência, é necessário que a velocidade de fluidez seja adequada e, para tal, ela depende da densidade das partículas, da granulometria, forma e da viscosidade e densidade do gás (ar). Essa velocidade é expressa pela seguinte formulação:

$$\mu_f = \left[\frac{gd_p \psi (\rho_s - \rho_f) \epsilon^3}{1,75 \rho_f} \right]^{1/2}$$

sendo,

d_p = tamanho da partícula,

ρ_f = densidade da partícula,

μ_f = velocidade de fluidez

Esta mostra que a razão unitária aumenta com a raiz quadrada do tamanho médio de partícula, e, também, com a densidade do material que se deseja separar e sua esfericidade. (Sampaio & Tavares, 2005)

2.4.4 - Funcionamento

Os funcionamentos dos tipos de jigge a seco utilizados na mineração de carvão são apresentados abaixo:

- Aspectos gerais – num jigge experimental onde são colocadas placas de separação, sendo que estas são compartimentadas ao longo do seu comprimento e largura. Estes são preenchidos por esferas de cerâmicas, as quais são refreadas por meio de placas perfuradas, que escorregam uma sobre as outras, tendo a finalidade de permitir a área aberta. A resistência é oferecida pelas esferas, nas quais permitem uma distribuição uniforme e sem variação ao longo de toda superfície.

Conforme a granulometria do material dependerá a vazão de ar, na ordem de 50 a 60 m³/min.m² de superfície, para material com D₅₀ de 1,7 mm e 270 m³/min.m² para material com D₅₀ de 38 mm, conforme Osborne, 1988 (in Sampaio & Tavares, 2005).

Para partículas maiores serão necessárias maiores velocidades, onde poderão ocorrer turbulências excessivas no leito, prejudicando a separação das partículas. A descrição do jigge a seco ou pneumático é do dos mais antigos, ele é composto por um leito oscilatório poroso onde ocorre a separação, a estratificação. Este se localiza sobre uma câmara, cuja admissão de ar é proporcionada por meio de um tubo, no qual são montadas válvulas do tipo borboleta. Estas são responsáveis pela pulsação do ar dentro da câmara com freqüência de 10 Hz.

No leito oscilatório, existem aberturas que se estendem por toda largura, onde são removidas as partículas densas. Estas são localizadas numa calha onde são retiradas por um extrator e descarregado na lateral do equipamento. No extremo oposto da alimentação existem duas calhas, uma mais externa, por onde as partículas leves saem e a outra, mais interna, é a abertura para a vazão do material misto, conforme figura 03.

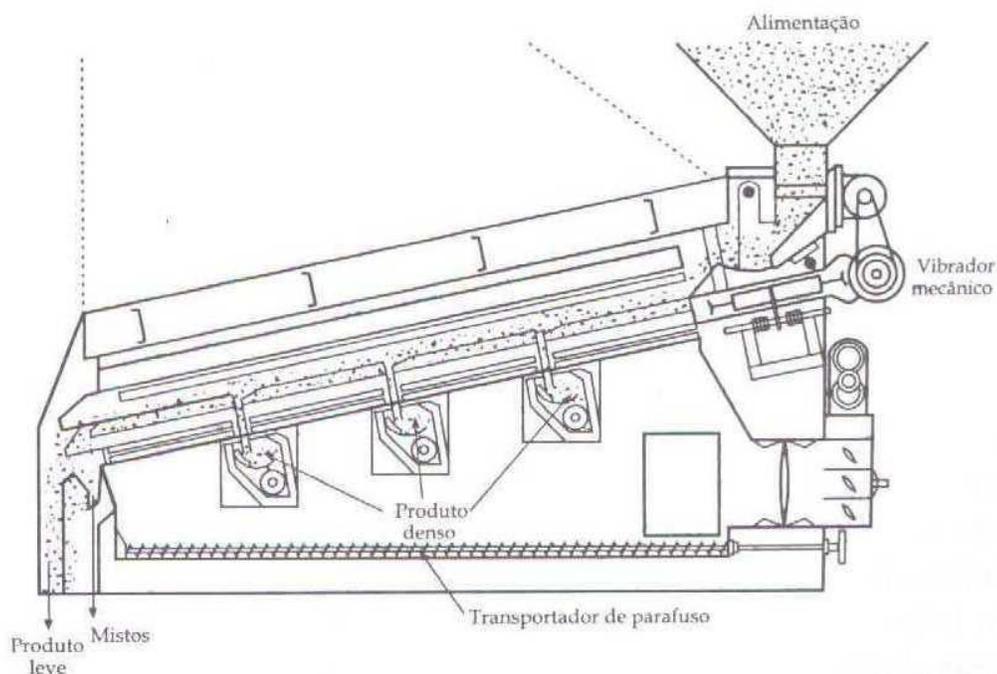


Figura 03: Exemplo de jigge a seco ou pneumático

- Tecnologia de beneficiamento a seco utilizado na China - a pesquisa e desenvolvimento da tecnologia de beneficiamento a seco iniciou em 1967. O desenvolvimento do separador pneumático para remoção de rejeito e seu fluxograma foram concebidos pelo Beijing Institute of Mine Design, que foi estabelecido no Mashan Mine of Jixi Coal Bureau, Heilongjiang Province e Tianshifu Mine of Benxi, Liaoning Province. Atualmente este separador pneumático não é mais empregado, devido às seguintes desvantagens, conforme Chen e Yang, 2003:
 - Baixa eficiência de beneficiamento;
 - Alta razão de ar/fluxo;
 - Exigência de tamanho fio da partícula de alimentação de carvão;
 - Problemas com meio ambiente devido à grande quantidade de nuvens de poeira.

Zhenfu *et al.* (2002) usaram o princípio de Arquimedes para explicar que as partículas leves e densas para separar cada uma das outras, utilizando-se da densidade do leito fluidizado, como as partículas leves flutuam e as densas afundam. Este indica que a pressão no leito fluidizado é a mesma no fluido estático. Todavia, ele não explica os produtos leves e pesados estarem misturados no processo de separação. Contudo, os movimentos dos sólidos devem ser considerados para estudo do mecanismo da separação em ADMFB (*air dense medium fluidized bed*). As forças exercidas sobre um carvão submerso num leito fluidizado são gravidade, pressão e força de arraste do gás Fig , causadas pela movimentação relativa entre a partícula de carvão e o meio sólido.

$$(\pi/6)\rho_c d_c^3(a + g) = F_b + F_{gd} + F_{sd} \quad \text{onde,}$$

F_b = força de flutabilidade exercida sobre a partícula de carvão;

F_{gd} = força de arraste do gás exercida sobre uma partícula de carvão;

F_{sd} = força de arraste do ar como meio exercida sobre uma partícula de carvão;

ρ_c = densidade da partícula de carvão, g/cm³;

d_c = é o diâmetro da partícula de carvão, m;

a = aceleração da partícula de carvão, m/s²;

A tecnologia de beneficiar carvão a seco, utilizando o ar como meio denso foi desenvolvida pela Mineral Processing Research Center of China University of Mining

and Technology – (CUMT), desde 1984. Ele utiliza o ar/sólido como meio de beneficiar, cuja densidade é constante, conforme Qingru e Yufen (2003). A primeira planta de beneficiamento a seco utilizando o ar como meio, foi utilizada pelo CUMT para beneficiar carvão no intervalo de fração de $-50 +6$ mm, conforme figura 04. Desde então, novas aplicações foram encontradas para plantas com capacidade de beneficiar 700.000 t/ano.

Para obter a condição de eficiência na separação a seco, devem ser encontrados parâmetros físicos, tais como: densidade do leito, distribuição no espaço, não apresentando variações com o tempo, que o leito tenha baixa viscosidade e alta fluidez. A densidade do leito para o beneficiamento é dada pela seguinte fórmula:

$$\rho = (1 - \varepsilon)\rho_s + \varepsilon\rho_a \approx \rho_{50} \quad \text{onde,}$$

ρ_s = é a densidade da partícula, g/cm³;

ρ_a = é a densidade do ar, g/cm³;

ρ = é a média da densidade do leito, g/cm³;

ρ_{50} = é a densidade de separação do leito, g/cm³;

ε = é a porosidade do leito, %.

Quando a velocidade do fluxo de ar está numa extensão adequada e acima da velocidade crítica de fluidez o ε é constante. Então,

$$\rho \approx (1 - \varepsilon)\rho_s = k\rho_s$$

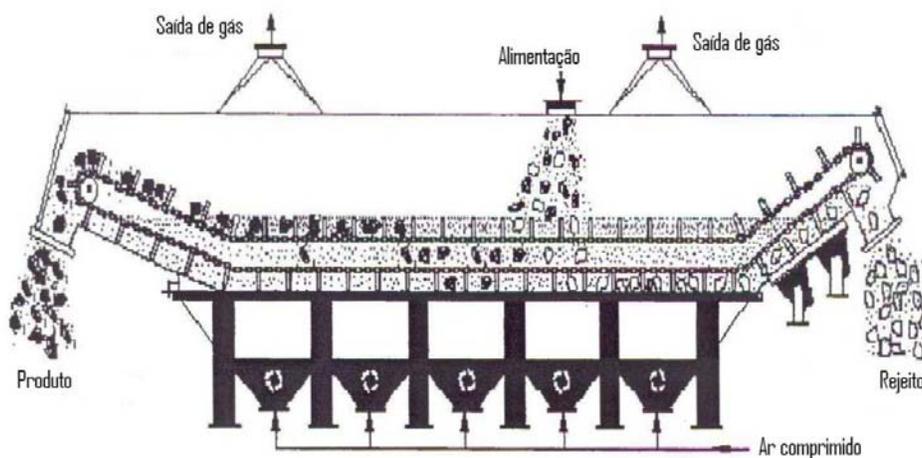


Figura 04: Equipamento de beneficiamento a seco utilizado pelo CUMT.

A teoria do leito denso com o ar como meio foi estabelecida, conforme Zhenfu, Qingru e Yaomin (2002), como uma dispersão do leito fluidizado numa fase de alta densidade, onde se forma microbolhas. A flutabilidade dos materiais beneficiados tem um papel importante no leito fluidizado, e o efeito de deslocamento da partícula na distribuição deve ser contido, pois este efeito influencia na distribuição da viscosidade e no movimento da partícula. Esse padrão ocorre nas partículas finas e é causado pela viscosidade e fluidez do leito. Este deslocamento é reduzido, aumentando a velocidade do fluxo. Se o tamanho médio da partícula e do fluxo de ar forem controlados os efeitos da viscosidade de fluidez serão efetivamente contidos. O modelo de distribuição de deslocamento da partícula pode ser usado para otimizar o beneficiamento do carvão num amplo intervalo granulométrico e de múltiplos componentes dentro do leito fluidizado. As vantagens dessa tecnologia de beneficiamento a seco, incluem:

- Alta precisão – é um método efetivo para beneficiar carvões com intervalo granulométrico de -50 mm +6 mm e com um valor de E_p entre 0,05 – 0,07;
- Baixo investimento – o processo elimina os custos com o tratamento de lama e efluentes;
- Poluição ambiental – a tecnologia requer pequena quantidade de ar comprimido, reduzindo bastante a quantidade de pó;
- Amplos intervalos de densidade – o leito fluidizado pode ser acrescido de pó de magnetita e/ou carvão fino aumentando a sua densidade, podendo beneficiar carvões de 1,3 a 2,2 g/cm³. (Chen e Yang, 2003)

As pesquisas chinesas para beneficiar a seco carvões finos (-6 mm), segundo Yaqun, Yuemin e Qingru (2003), Qingru e Yufen (2003), utilizam outros meios, como vibrador junto ao leito, para obter um aumento suplementar de bolhas no leito e pó de magnetita como meio denso, todos estes testes foram em escala de laboratório, onde os resultados médios foram alcançados em carvões com frações de -6 +0,5 mm com teor de cinza de 16,7% e que, após tratamento, o teor de cinza foi de 8,35% com uma taxa de recuperação de 82% e um valor de $E_p=0,065$. Para frações >50 mm houve necessidade de aumentar o leito para 1.200 mm, mantendo, assim, estável com pequenas bolhas e com uma densidade uniforme. Estes testes em laboratório resultaram num valor de E_p de 0,02. Para partículas <1 mm a tecnologia usada foi a triboeletricidade. Este

método consiste em separar material pulverizado, induzindo uma carga positiva e negativa, dependendo das propriedades elétricas de suas superfícies. Esta aquisição de cargas é através da fricção ou colisão de partículas num fluxo de ar de alta velocidade. Quando a entrada do campo eletrostático com alta voltagem, tendo partículas com cargas opostas se movendo para eletrodos opostos, resultam numa desejável separação.

- Tecnologia utilizada pela Alemanha – produzido pela Allmineral GmbH da Alemanha. Segundo K.Casteel (Processing, 2003) e Horn & Short (2003) → o jigge a ar consiste numa estrutura fechada que distribui ar uniformemente através do leito oscilatório. O ar pulsante é imposto contra a corrente de ar constante e ascendente, permitindo controle independente da amplitude, frequência e aceleração de ar. Dessa maneira, a estratificação do material alimentado é otimizada. O sistema de descarga é também uma novidade, sendo através de um único sistema, o *star gate*. Este equipamento utiliza um mecanismo automático de controle de descarga, o radiômetro, podendo o jigge a seco manter uma camada constante de reserva de material de alta densidade, evitando a contaminação do produto na seção final do leito. O material pesado forma uma barreira para o de densidade mais leve, estratificado acima, minimizando a imperfeição, ou seja, contaminação dos leves com os pesados. A operação deste equipamento não necessita de interferências ou ajustes por parte de operador. A capacidade de beneficiar carvão é de até 50 t/h com uma granulometria de -50 mm +1,0 mm.

A separação das partículas no jigge a seco, ocorre através do fluxo pulsante de ar, produzindo uma estratificação do material alimentado no equipamento. A camada de material denso é formada no fundo do leito, movimentando-se em direção às aberturas. A camada superior, mais leve, continua a se mover sobre a camada mais lenta de partículas pesadas, sendo removida na abertura superior a dos pesados. A poeira gerada pela pulsação de ar é seccionada, usando um captador de poeira, semelhante a um *air separator*, onde são recuperadas por meio de ciclones pneumáticos e filtros de manga, segundo a figura a seguir:



Figura 05: Esquema do funcionamento do *allair*

3 - MATERIAL E METODOLOGIA

3.1 - Material

Foram utilizados neste estudo carvões (ROM), referentes à Camada de Candiota, os Bancos Inferior e Superior, da Mina de Candiota, situada no município de Candiota-RS.

3.2 - Metodologia

A metodologia empregada, neste estudo, compreende as seguintes etapas:

3.2.1 - Coleta de material

A amostragem foi realizada na Mina de Candiota-CRM, no município de Candiota-RS, quando foram coletadas alíquotas de carvão dos Bancos Inferior e Superior com a seguinte metodologia:

- Num universo de 7.308 toneladas foram coletadas 3,33 toneladas de carvão dos Bancos Superior e Inferior da Camada Candiota. Estas foram embaladas e enviadas para Aachen, Alemanha, 1,6 toneladas do Banco Superior e 1,5 toneladas do Banco Inferior. Outros 229 kg de carvão foram enviados para o Laprom/UFRGS, onde foram realizadas as análises imediata e elementar;
- A amostragem foi realizada de hora em hora sobre a correia transportadora TC1 num espaço de 4 metros lineares;
- O material recolhido foi peneirado na peneira de 50 mm, e os retidos foram quebrados manualmente e reincorporados ao produto;

As amostras endereçadas ao Laprom, dos Bancos Inferior (108 kg) e Superior (121 kg), foram quarteadas e separadas em alíquotas, para a realização de ensaios granulométricos, de afunda-flutua e de análises de cinza, material volátil, umidade, enxofre total, enxofre pirítico e enxofre sulfático.

3.2.1 – Separação Granulométrica

Os ensaios de granulometria foram realizados com as peneiras de 50,8 mm; 25,4 mm; 19,1 mm; 12,7 mm; 2,0 mm; 1,0 mm e 0,1 mm, conforme tabelas abaixo. Em cada faixa granulométrica, foram realizadas análises de cinzas, umidade, enxofre (total, pirítico, sulfático e orgânico), poder calorífico e matéria volátil.

3.2.2 – Ensaios de Afunda-flutua

Os carvões foram submetidos à separação do tipo afunda-flutua com densidades de 1,3 a 2,4 g/cm³, com intervalos constantes de 0,1 g/cm³, nos quais foram utilizados os seguintes líquidos: o percloroetileno de densidade 1,8 g/cm³, o bromofórmio de densidades 2,8 g/cm³ e xilol de densidade 0,7 g/cm³. A partir destes ensaios são construídas as curvas de lavabilidade de carvão, na qual é possível determinar a qualidade do mesmo que se obtém como produto. Através destes ensaios, foram obtidas as curvas de lavabilidade de Henry-Reinhardt.

3.2.3 – Análises químicas e físicas

Estas compreendem nas análises de cinza (NBR8289), de umidade (NBR 8293), de enxofre total (NBR 8294) e das formas de enxofre pirítico, sulfático e orgânico (NBR 8297), poder calorífico (NBR 8628) e matéria volátil (NBR 8290). Estas análises, químicas e físicas, foram realizadas em cada faixa densimétrica obtidas nos ensaios de afunda-flutua.

3.2.4 - Ensaios de beneficiamento gravimétrico

Os ensaios de beneficiamento a seco das Camadas Superior e Inferior da Mina de Candiota foram realizados no Laboratório de Processamento Mineral - AMR da RWTH-Aachen, Alemanha. Estes ensaios têm por objetivo confirmar a capacidade teórica da redução dos níveis de cinza e, principalmente, enxofre do carvão da jazida de Candiota por beneficiamento a seco, conforme trabalhos publicados pelo Laprom (Sampaio, 1987). Para tanto, foi escolhido para os ensaios o Instituto AMR-RWTH, coordenado pelo Dr.-Ing. Hermann Wotruba. Este laboratório, além do renome internacional, da longa experiência e tradição em carvão, possui um jigue a ar em escala piloto com capacidade para 6 t/h, instalado pela *Allmineral*, empresa baseada na cidade de Duisburg, Alemanha. A Empresa *Allmineral* é, na atualidade, o principal fabricante mundial de equipamentos de jigagem e separação a ar.

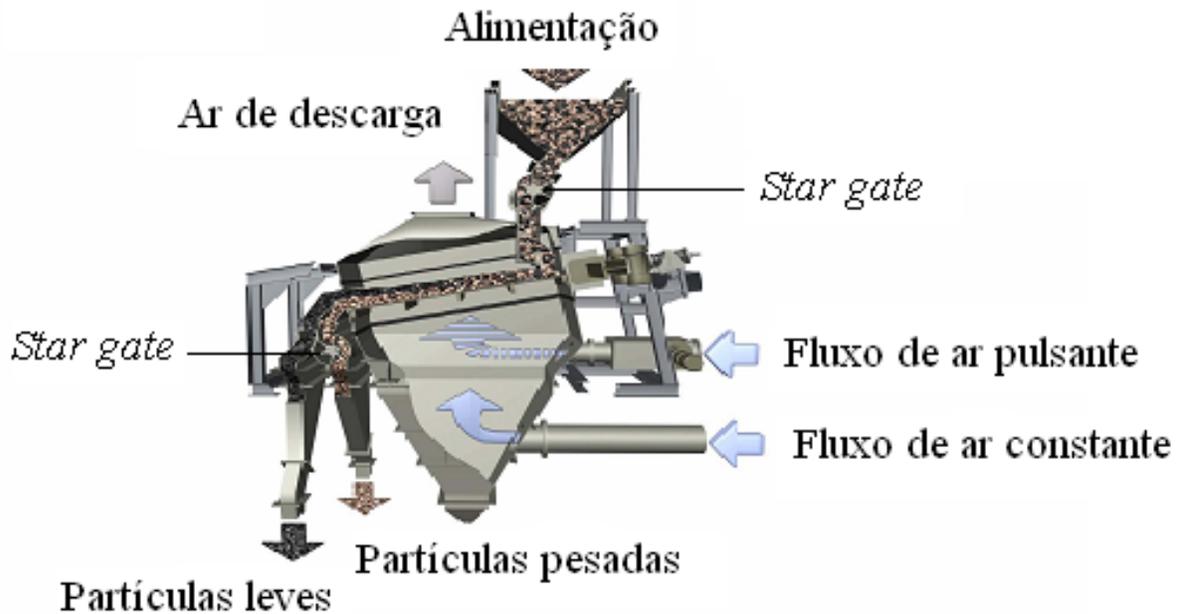


Figura 06: Esquema de funcionamento do jigue a ar (Fonte: www.allmineral.com)

Foram embarcados para a Alemanha 12 tambores contendo 3 toneladas de carvão britado a 50 mm (*top size*) das Camadas Candiota Superior e Inferior. Na operação do jigue piloto foram beneficiadas as duas camadas separadamente, tendo havido a necessidade de reduzir a granulometria das amostras da alimentação do jigue, limitando o *top size* em 20 mm, por razões construtivas do jigue piloto. O *star gate* (na descarga) não permitia passagem de partículas maiores que 25 mm.

Quanto à recuperação mássica foram testadas diferentes velocidades de descarga para o *star gate*, em razão do jigue do laboratório de Aachen não estar equipado com controle radiométrico de densidade do leito, devido à legislação governamental da Alemanha. Assim, geraram-se dois produtos por camada com recuperações mássicas de 90 e 95%, os quais foram amostrados e encaminhados para análise de cinza e enxofre, cujos resultados se encontram em relatórios anexos emitidos pelo AMR-RWTH.

3.2.5 - Imperfeição Tromp

Após os testes realizados em Aachen, foram enviados à CIENTEC os produtos do jigge a ar dos Bancos Inferior e Superior, bem como amostras representativas da alimentação, concentrado e rejeito do jigge.

As amostras do rejeito e concentrado foram submetidas a ensaios de afunda-flutua, sendo realizados no LAPROM/UFRGS, com densidades entre $-1,3 \text{ g/cm}^3$ e $+2,4 \text{ g/cm}^3$ e em intervalo de 0,1 em 0,1 g/cm^3 .

3.2.6 – Ensaio de combustão e análises dos gases

Com o material concentrado (Candiota Superior e Candiota Inferior) foram efetuados dois testes de queima na CIENTEC, tendo o seguinte procedimento:

1º teste: ocorreu tendo o início o carvão do Banco Superior ROM precedido do carvão do Banco Superior Produto (beneficiado em Aachen),

2º teste: sendo processado o carvão do Banco Inferior ROM precedido do carvão do Banco Inferior Produto (beneficiado em Aachen).

Análises da queima dos carvões dos Bancos Superior e Inferior em leito fluidizado e dos gases, todas estas realizadas pela CIENTEC-Fundação de Ciência e Tecnologia.

3.2.7 – Análise econômica e de sensibilidade

Neste item se pretende avaliar a escala de produção, os estudos de pré-viabilidade e análise de risco, compreendendo os custos de capital e de operação a partir a partir da rota de beneficiamento. Através do método do Fluxo de Caixa Descontado utilizando os ganhos e os custos operacionasi com o beneficiamento a seco, pode-se analisar e, simular o retorno do investimento, margem de lucro, NPV (*Net Present Value*) e intensidade de capital de uma planta completa de jigagem a seco.

Com a análise de sensibilidade realizada a partir do NPV e variando os custos operacional e do insumo (cal), taxa cambial, manuseio e transporte de carvão pode-se determinar quais os parâmetros que afetam sensivelmente o projeto.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os carvões gaúchos formaram-se em turfeiras predominantemente subaquáticas de fácies límnic. O carvão está associado a arenitos, siltitos e argilitos da formação Rio Bonito.

A jazida de Candiota localiza-se na Depressão Periférica, uma faixa aflorante de rochas sedimentares da bacia do Paraná no estado do Rio Grande do Sul, com ocorrências de carvão na Formação Rio Bonito, sendo-lhe atribuída a idade de Permiano Inferior. Na jazida, ocorrem várias camadas de carvão, mas somente a camada Candiota é minerada. A bacia do Paraná, com base na análise estrutural-sedimentar adotada por Schneider *et al.* (1978), é uma bacia intracratônica simétrica, cuja coluna litoestratigráfica compreende sedimentos paleozóicos, mesozóicos, lavas basálticas e, localmente, rochas cenozóicas.

Dois bancos de carvão, com aproximadamente 2 m de espessura, intercalados por uma camada de argilito de 80 cm, são atualmente minerados pela CRM. Com cobertura na faixa de 10 m para a camada Candiota, a mineração se processa a céu aberto. A relação estéril/minério está na faixa de 1,8 m³/t de carvão ROM, e o rendimento, apenas para a camada Candiota é de 7 t/m².

Do ponto de vista técnico, o carvão de Candiota apresenta as seguintes características:

- O teor de cinzas do carvão ROM é da ordem de 50% para a Camada Superior e 52% para a Camada Inferior;
- O teor de enxofre total fica em torno de 2,0%, sendo que menos de 0,9% corresponde a enxofre orgânico. O enxofre sulfático apresenta valores baixos de 0,3%;
- A classificação do carvão de Candiota segundo o *rank*, de acordo com os resultados de análises químicas de concentrado de vitrênio, poder refletor médio das vitrinitas e poder calorífico é sub-betuminoso C, conforme tabala abaixo.

Tabela X – Petrografia dos carvões e poder refletor da vitrinita da Candiota

Camada	Petrografia dos carvões				Poder Reletor Rm (%)
	Vitrinita (%)	Liptinita (%)	Inertinita (%)	Mat.Mineral (%)	
Superior	69	5	18	8	0,4 ± 0,04
Inferior	69	4	13	14	0,4 ± 0,04

O total das amostras colhidas na CRM foi de 3.226 kg, e estas sofreram uma divisão, conforme mostra a tabela abaixo.

Tabela XI – Amostra enviadas aos Laboratórios e seus respectivos pesos

CONTRATO CGTEE/FLE-LAPROM			CONTRATO CGTEE/FLE-LAPROM		
Amostragem Banco Superior			Amostragem Banco Inferior		
Data: 17/19/2003			Data: 17/19/2003		
Nº Am.	Hora	Peso kg	Nº Am.	Hora	Peso (kg)
1	09:45	133	1	09:45	106
2	10:30	127	2	10:45	140
3	11:30	146	3	11:45	160
4	13:30	188	4	13:15	145
5	14:45	156	5	13:30	136
6	15:40	171	6	15:30	163
7	16:30	156	7	17:00	162
8	17:30	171	8	17:45	127
9	18:30	178	9	21:30	150
10	21:30	198	10	22:30	144
Total		1.624	11	23:30	169
Am.Laprom		121	Total	1.602	
Total Líquido		1.503	Am. Laprom	108	
Peso 6 bombonas		60	Total Líquido	1.494	
Peso bruto		1.563	Peso 6 bombonas	60	
			Peso bruto	1.554	

Os doze tambores contendo as amostras das Camadas Superior e Inferior foram enviadas para o Laboratório de Processamento Mineral-AMR da RWTH, em Aagen-Alemanha, para serem processadas no jigge a seco e, posteriormente, analisados seus produtos.

As alíquotas de 121 kg e 108 kg das Camadas Superior e Inferior, respectivamente, foram enviadas para o LAPROM, para os ensaios granulométricos e de afunda-flutua, análises de cinza, umidade, poder calorífico, matéria volátil e enxofre total, pirítico, sulfático e orgânico. Estas amostras foram quarteadas e separadas em porções de aproximadamente 10 kg para cada Camada.

Os ensaios de granulometria foram realizados com as peneiras de 50,8 mm; 25,4 mm; 19,1 mm; 12,7 mm; 2,0 mm; 1,0 mm e 0,1 mm, conforme as tabelas XII e XIII a seguir.

Tabela XII – Ensaio granulométrico da Camada Superior e análises imediata e elementar

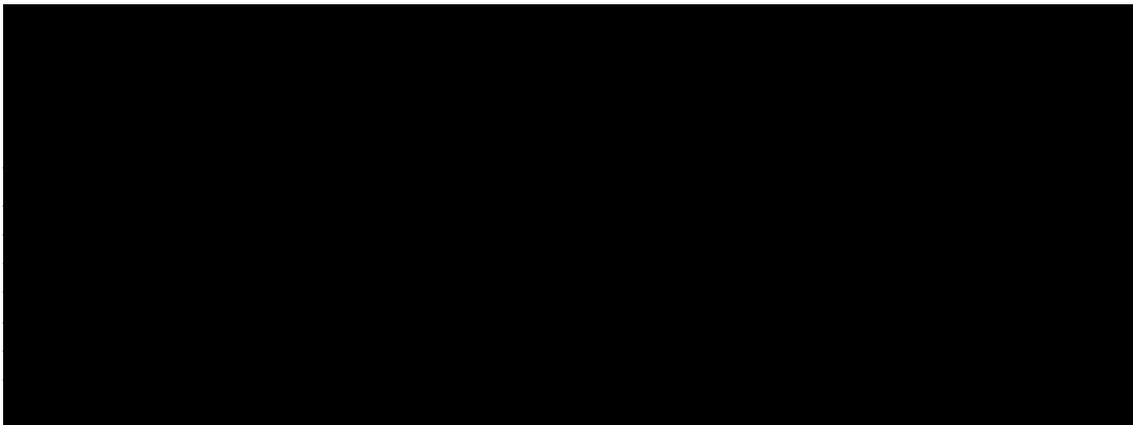
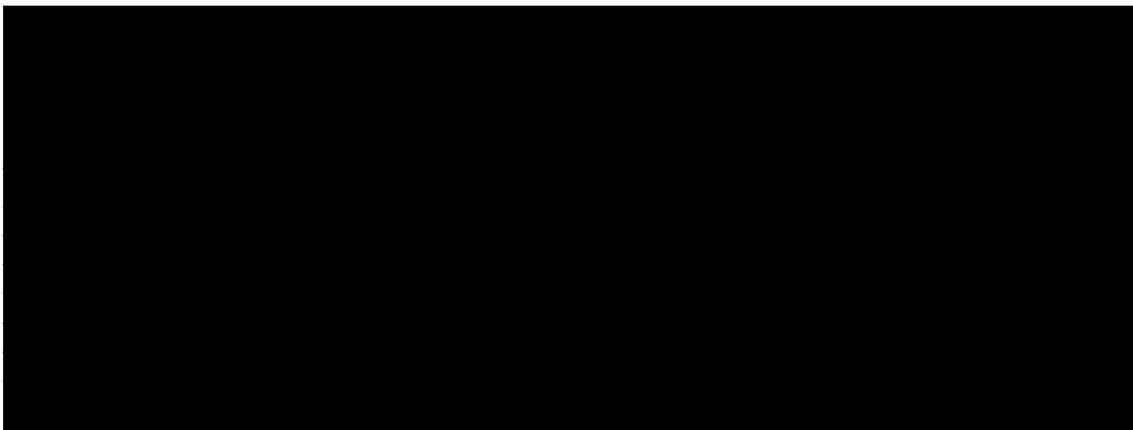
A large black rectangular redaction box covering the content of Tabela XII.

Tabela XIII - Ensaio granulométrico da Camada Superior e análises imediata e elementar

A large black rectangular redaction box covering the content of Tabela XIII.

Nota-se que na fração granulométrica de $-0,1$ mm, o teor de cinza é de 64,9% em ambas as Camadas. Em relação ao enxofre total, verifica-se que, no intervalo $-12,7$ $+2,0$ mm em ambas Camadas, o percentual é maior, acima de 2,6%. É possível deduzir que nesta faixa granulométrica ocorre a maior liberação da pirita, sendo verificada pelo teor do enxofre pirítico das Camadas que varia em torno de 1,44% a 1,74%, respectivamente. Na fração $-1,00$ mm, de ambas Camadas, a quantidade de finos é diferente sendo que 23,73% para Camada Superior e 15,22% para Camada Inferior, isso é devido à sua formação em turfeiras, pois sua composição basicamente é de argila. Num outro estudo destes carvões realizado pelo Laprom para a CGTEE (2004), notou-se que quanto mais cominuir os carvões da Camada Candiota maior será a geração de finos, ou seja, de argilas, conforme tabela abaixo.

Tabela XIV – Ensaios granulométricos com vários *top size* da mistura das Camadas Superior (50%) e Inferior (50%)

Mistura dos carvões Camadas Superior (50%) e Inferior (50%)								
Granulometria (mm)	Carvão ROM		Carvão -30 mm		Carvão - 10 mm		Carvão -2 mm	
	Mass. Ret. (%)	Mas.Ret.Acum. (%)						
+80	16,87	16,87						
-80 +50	6,78	23,65						
-50 +30	8,37	32,02						
-30 +18	8,18	40,20	14,43	14,43				
-18 +10	7,76	47,96	17,83	32,26				
-10 +6,3	6,74	54,70	10,24	42,50	20,66	20,66		
-6,3 +2,0	16,77	71,47	21,67	64,17	34,66	55,32		
-2,0 +1,00	3,65	75,12	5,29	69,46	6,66	61,98	22,79	22,79
-1,00 +0,63	3,34	78,46	3,80	73,26	5,28	67,26	13,29	36,08
-0,63 +0,4	3,36	81,82	4,28	77,54	5,66	72,92	11,53	47,61
-0,4 +0,2	3,35	85,17	4,36	81,90	5,05	77,97	10,31	57,92
-0,2 +0,1	2,89	88,06	3,77	85,67	4,92	82,89	8,17	66,09
-0,1 +0,063	1,66	89,72	1,95	87,62	2,55	85,44	4,80	70,89
-0,063	10,28	100,00	12,38	100,00	14,56	100,00	29,11	100,00
Total	100,00		100,00		100,00		100,00	

A distribuição granulométrica do carvão da Camada Candiota cominuído a diferentes *top sizes* pode ser vista na tabela acima.

A tabela mostra uma grande quantidade de finos para todos os graus de cominuição. Mesmo no carvão ROM ocorre a presença de cerca de 20% em peso de material com granulometria menor que 0,63 mm, e o carvão britado a -2 mm mostra cerca de 34% de material abaixo de 0,1 mm.

Análises químicas das frações granulométricas indicam que o teor de cinzas aumenta, substancialmente, nas granulometrias mais finas. A fração menor que 0,1 mm mostra teores de cinzas de cerca de 64%, conforme tabelas XI e XII. Isto se deve, principalmente, pelo acúmulo de argilas nas frações mais finas.

Os ensaios de afunda-flutua foram realizados com misturas de líquidos densos, a saber, xilol (0,8 g/cm³), percloroetileno (1,7 g/cm³) e bromofórmio (2,8 g/cm³), nas densidades que variaram de -1,3 g/cm³ a +2,4 g/cm³, com intervalo constante de 0,1 g/cm³. Da massa proveniente de cada intervalo de densidades, foi extraída uma alíquota, após quarteamento, para análises de teores de cinzas, umidade, enxofre (total, pirítico, sulfático e orgânico), poder calorífico e matéria volátil, conforme tabelas XIV e XV. Através destes ensaios, foram obtidas as curvas de lavabilidade de Henry-Reinhardt, apresentados nas figuras 7 e 8.

Tabela XV – Resultado do ensaio de afunda-flutua e análises químicas da Camada Superior

[Redacted content]

Tabela XVI - Resultado do ensaio de afunda-flutua e análises químicas da Camada Inferior

Candiota Inferior											
Faixa Densidade	Massa (g)	Massa (%)	Acum. (%)	Teor Cz (%)	Umidade (%)	St (%)	Sp (%)	Ss (%)	So (%)	Pod.Calor. kcal/kg	Mat.Volát. (%)
-1,3	244.90	2.18	2.18	9.20	17.93	0.99	0.03	0.35	0.61	4,887.60	53.13
+1,3-1,4	175.70	1.56	3.74	17.65	14.46	1.08	0.04	0.36	0.68	5,280.70	53.14
+1,4-1,5	632.70	5.63	9.37	33.16	12.34	1.06	0.08	0.35	0.63	4,053.50	41.42
+1,5-1,6	1,645.80	14.63	24.00	42.71	11.30	1.10	0.36	0.20	0.54	3,377.80	33.63
+1,6-1,7	4,331.70	38.51	62.51	46.97	8.41	1.00	0.24	0.38	0.38	2,873.50	29.20
+1,7-1,8	809.20	7.19	69.71	53.05	6.75	1.81	1.36	0.19	0.26	2,806.40	27.09
+1,8-1,9	1,204.80	10.71	80.42	55.33	8.65	1.53	0.84	0.33	0.36	2,242.60	25.70
+1,9-2,0	337.20	3.00	83.42	64.33	5.74	1.67	0.98	0.28	0.41	1,789.90	22.00
+2,0-2,1	540.70	4.81	88.22	79.69	5.40	1.58	0.73	0.27	0.58	1,291.70	18.76
+2,1-2,2	247.20	2.20	90.42	82.76	5.22	1.62	0.81	0.22	0.59	1,048.40	15.16
+2,2-2,3	98.80	0.88	91.30	84.55	4.02	2.41	1.37	0.36	0.68	1,639.30	15.84
+2,3-2,4	176.50	1.57	92.87	90.49	3.08	2.48	1.43	0.34	0.71	1,327.00	14.53
+2,4	802.30	7.13	100.00	67.78	1.85	13.97	12.65	0.51	0.81	1,042.50	14.27
Total	11,247.50	100.00									

Cz=cinza; St= enxofre total; Sp=enxofre pirítico; Ss=enxofre sulfático; So=enxofre orgânico

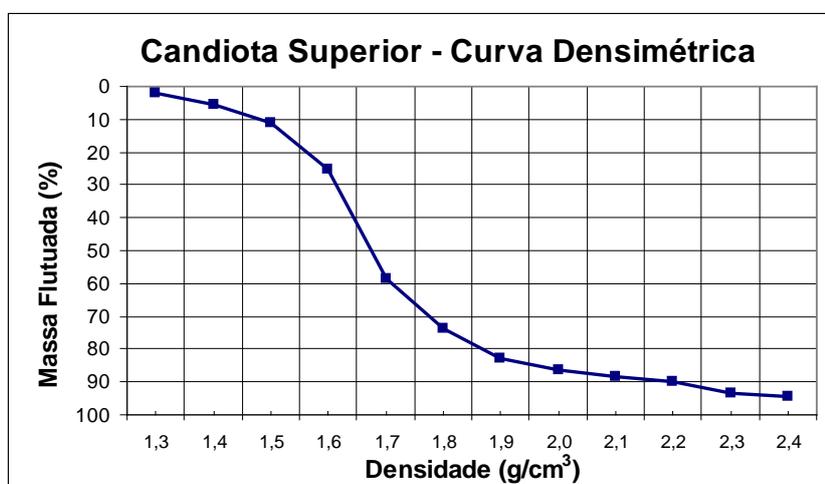


Figura 7: Curva densimétrica a partir dos resultados do ensaio de afunda-flutua

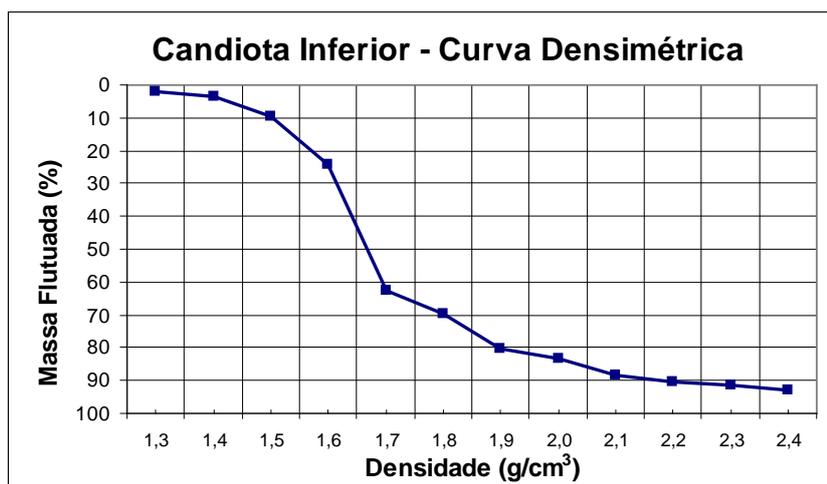


Figura 8: Curva densimétrica a partir dos resultados do ensaio de afunda-flutua

As curvas acima mostram uma baixa liberação da matéria carbonosa, sendo que a maior parte do material se encontra na fração 1,6-2,0 g/cm³, ou seja, este carvão apresenta pouca liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico. Isto ocorre devido à formação da turfeira que deu origem ao carvão, a qual foi composta, basicamente, de pequenas árvores.

Para se obter, com o beneficiamento, produtos com baixos teores de cinzas (por exemplo: teores de cinzas menores que 35%), a massa recuperada seria bastante baixa, no exemplo a recuperação mássica seria de no máximo 22% para a Camada Superior (Fig. 9) e de 25% na Camada Inferior (Fig. 10).

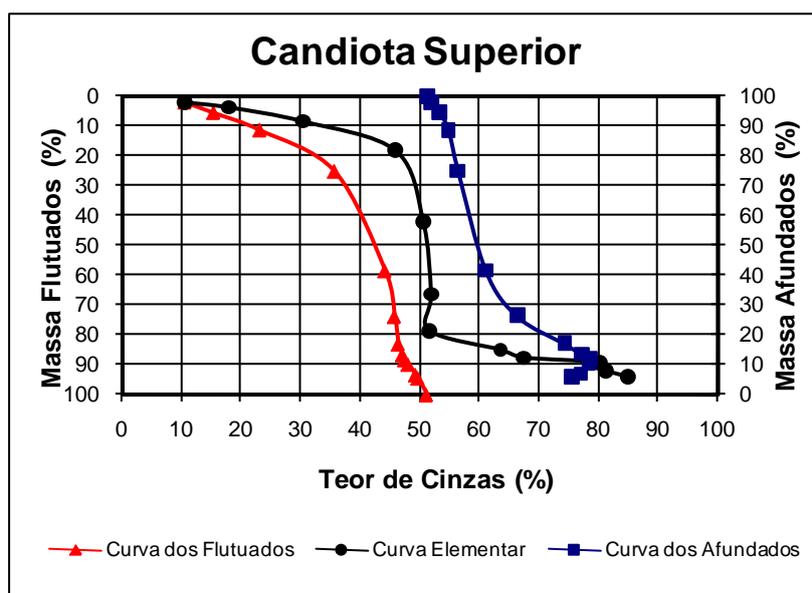


Figura 9: Curva de teor de cinza verso massa acumulada

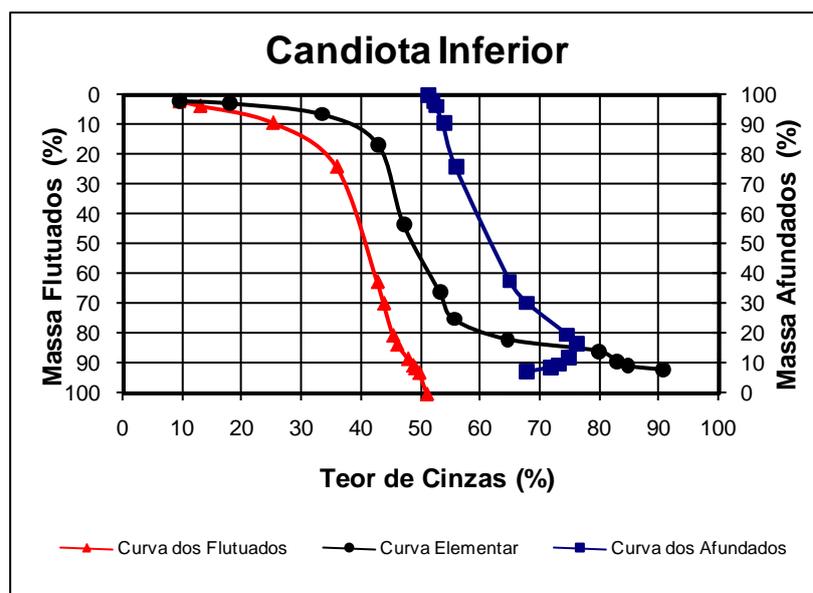


Figura 10: Curva de teor de cinza versus massa acumulada

Outro fator que dificulta, em muito, o beneficiamento é o chamado NGM (*near gravity material*), cujas curvas podem ser vistas abaixo. A curva representa a quantidade de NGM em função da densidade de corte. Quanto maior o valor, mais difícil seria o beneficiamento na densidade desejada.

Pela curva pode-se ver que o carvão de Candiota apresenta enormes quantidades de NGM nas frações intermediárias, impossibilitando o seu beneficiamento em densidades intermediárias, por exemplo, entre 1,6 e 2,0 g/cm³. No caso do exemplo, o produto com 35% de cinzas, o NGM seria aproximadamente de 48% na densidade de corte de 1,6 g/cm³ para Camada Superior (Fig.11.) e o NGM de 53% apresentando uma densidade de corte de 1,6 g/cm³ para a Camada Inferior (Fig.12).

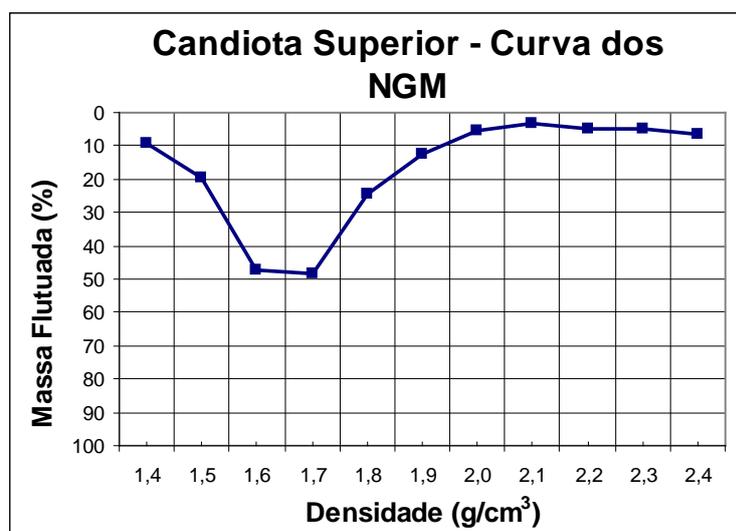


Figura 11: Curva do NGM

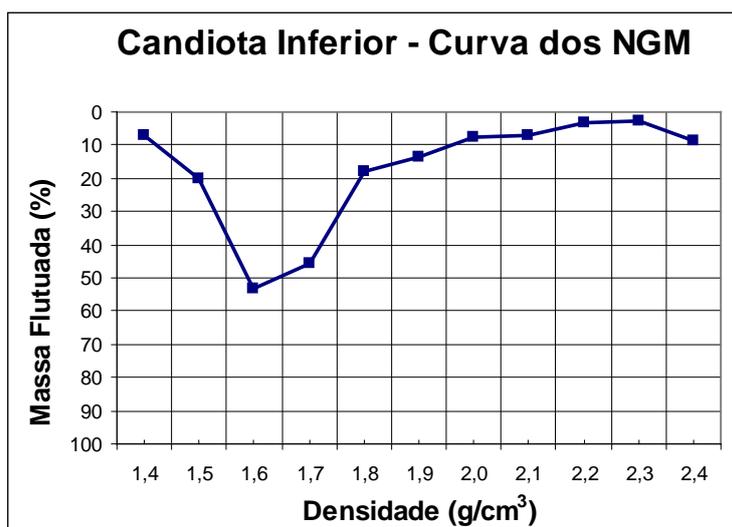


Figura 12: Curva do NGM

No entanto, se no beneficiamento visa um produto com 48% de cinzas, a recuperação mássica seria de cerca de 85% em massa com uma densidade de corte de 2,0 g/cm³. O NGM, no caso, seria de cerca de 10%, para ambas Camadas, valor este bastante razoável, utilizando-se diferentes tipos de equipamento de concentração.

A fração descartada no rejeito teria quase 90% de cinzas, ou seja, seria basicamente formada de argilas. Assim, seria possível descartar-se cerca de 15% do material sob a forma de rejeito, com praticamente nenhuma matéria orgânica presente.

Pode-se notar pela curva que os teores de enxofre (Figuras 13 e 14), são maiores nas frações menos densas que nas frações intermediárias. Isto se deve ao acúmulo de enxofre orgânico nas densidades mais baixas.

Nota-se, também, que, nas densidades mais altas (maiores massas no flutuado), os teores acumulados de enxofre sobem muito, indicando a presença de nódulos de pirita. Deve aqui ser dito que boa parte do enxofre pirítico presente neste carvão se encontra sob a forma de nódulos de pirita, os quais são facilmente removíveis através de qualquer beneficiamento gravimétrico.

No caso do exemplo acima, visando-se a um produto com 48% de cinzas, o concentrado (85% da massa do ROM) apresentaria um teor médio de enxofre total de 0,98% para a Camada Superior e de 1,18% para Camada Inferior.

Devido às condições de maturação do carvão de Candiota, este apresenta um baixo rank. Com isto sua porosidade é bastante elevada, impossibilitando, assim, a utilização de água no beneficiamento, sem posterior secagem térmica. No caso da

adição de água, o carvão apresentaria teores de umidade total superiores a 20%, umidade esta que somente poderia ser retirada por processo térmico.

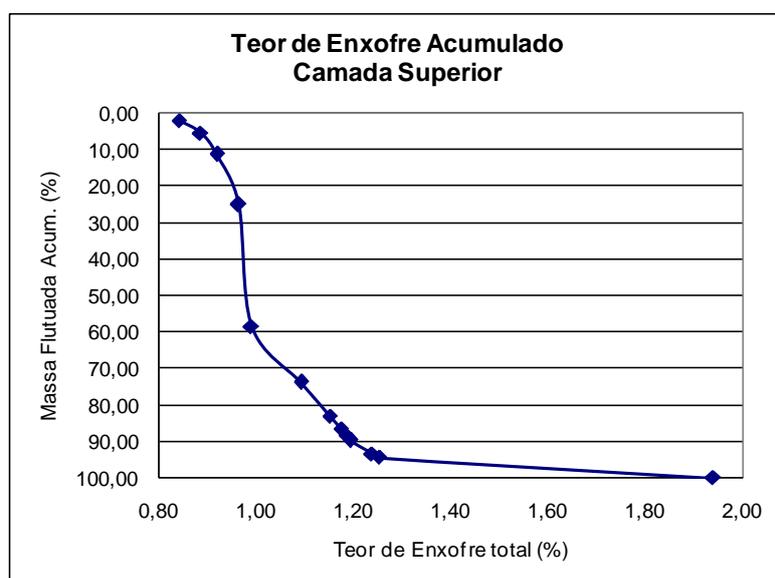


Figura 13: Teorde enxofre acumulado

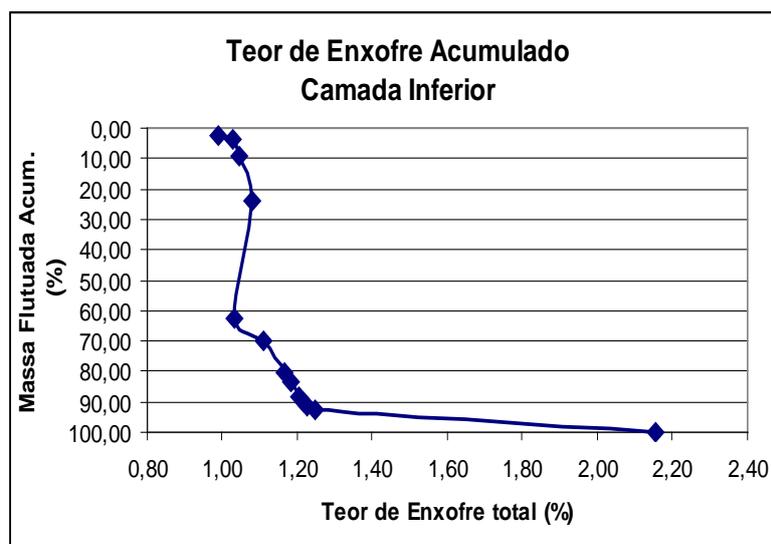


Figura 14: Teor de enxofre acumulado

Embora a concentração gravimétrica seja normalmente realizada a úmido, existe uma série de situações nas quais é preciso ou, ao menos, conveniente que a concentração seja realizada a seco, empregando o ar como meio de separação. Uma situação em que a sua aplicação é necessária é no beneficiamento de minérios em regiões áridas, nas quais a água é escassa. Nesse caso, os custos de beneficiamento a

úmido seriam elevados, seja devido à necessidade de transporte de água até a usina ou do minério até alguma fonte de água.

Existem, também, situações nas quais, embora o beneficiamento a seco não seja a única opção, ele é a mais conveniente, uma vez que não requer que o produto seja submetido às dispendiosas operações de filtragem e secagem. Exemplo disso é o beneficiamento de alguns carvões e minérios de areias pesadas, além da reciclagem de diversos materiais. Um outro exemplo é a pré-concentração de minérios. Nesse caso, a pré-concentração a seco permite minimizar a demanda de água na usina, pois elimina uma parte significativa das partículas de ganga contidas da alimentação. Esse material, em menor volume, poderia ser concentrado, usando equipamentos de maior precisão de separação, os quais, normalmente, operam a úmido.

Algumas das principais vantagens dos processos de concentração a seco são as baixas umidades do produto, os baixos custos de operação e investimento, além de alta capacidade. O beneficiamento a seco não requer os circuitos paralelos de água que invariavelmente acompanham os processos de beneficiamento a úmido. Ele também permite eliminar a etapa posterior de deságüe, dispensando equipamentos como filtros, secadores, etc. Com isto também se elimina qualquer risco de poluição de efluentes líquidos da usina.

As altas capacidades da separação a seco se devem ao fato que no ar as partículas sedimentam por volta de 100 vezes mais rapidamente do que na água, o que permite a construção de equipamentos mais compactos e econômicos.

Naturalmente, existem limitações quanto ao uso de processos de concentração pneumática. Dentre as desvantagens, estão a baixa precisão de separação e a grande sensibilidade do processo em relação à umidade. A eficiência da separação pneumática é significativamente inferior àquela de processos de concentração a úmido. A separação eficaz por processos pneumáticos também requer que a umidade superficial da alimentação seja mantida baixa.

Os princípios de separação e de funcionamento dos jigues a ar são similares àqueles para os jigues que operam a úmido, com a exceção de que ar é empregado como meio de separação ao invés de água.

A separação de partículas no jigue pneumático é resultado do fluxo pulsante de ar, que produz a estratificação das partículas alimentadas no aparelho. Enquanto a camada de material denso formada no fundo do leito se movimenta na direção das aberturas, a camada superior, que contém as partículas leves, continua a se mover sobre

a camada mais lenta de partículas densas, sendo removida no extremo oposto do aparelho. A poeira gerada pela pulsação de ar é succionada, usando um captador de poeira, sendo recuperada por meio de ciclones pneumáticos e filtros de manga.

Baseando-se no Capítulo I, na revisão bibliográfica, houve uma descrição de três tipos de jigues pneumáticos diferentes. Destes, o mais simples tanto na construção como no funcionamento, mais moderno e abrangendo uma granulometria de -50 mm é o fabricado pela Allmineral. O que não ocorre nos outros dois, pois a granulometria é determinada por faixas granulométricas. O tipo chinês na verdade não se pode chamar de jigue e, sim, de uma mesa pneumática.

No jigue pneumático produzido pela Allmineral GmbH da Alemanha, a extração do produto denso é realizada com o auxílio de uma válvula do tipo estrela, de maneira análoga a alguns jigues hidráulicos.

A superfície sobre a qual é realizada a divisão é posicionada com o auxílio de placas de separação. Estas placas isolam a superfície em compartimentos espaçados ao longo do comprimento da superfície, estendendo-se ao longo de toda a sua largura. Estes compartimentos são preenchidos com esferas cerâmicas, as quais são contidas por meio de placas perfuradas que escorregam umas sobre as outras, a fim de permitir o controle da área aberta (desde zero até a área aberta total dos orifícios). As esferas formam um meio permeável que oferece resistência, permitindo uma distribuição uniforme e sem curtos-circuitos do fluxo de ar ao longo de toda a superfície de separação, conforme figura abaixo.

Os ensaios de beneficiamento a seco do carvão da Mina de Candiota foram realizados no Laboratório de Processamento Mineral - AMR da RWTH-Aachen, Alemanha. Estes ensaios têm por objetivo confirmar a capacidade teórica da redução dos níveis de cinza e, principalmente, enxofre do carvão da jazida de Candiota por beneficiamento a seco. Este laboratório com longa experiência e tradição em carvão, possui um jigue a ar em escala piloto com capacidade para 6 t/h, instalado pela *Allmineral*, empresa baseada na cidade de Duisburg, Alemanha.

Nos primeiros testes, pode-se verificar o grande potencial do equipamento, isto é, subjetivamente, avaliou-se o produto e o rejeito (pesados). Nos pesados era notória a concentração de pirita na forma de placas e *nuggets*, bem como argilitos e calcários. Foram beneficiadas as duas camadas separadamente, tendo havido a necessidade de reduzir a granulometria das amostras da alimentação do jigue, limitando o *top size* em

20 mm, por razões construtivas do jigue piloto. O *star gate* (na descarga) não permitia passagem de partículas maiores que 25 mm.

Quanto à recuperação mássica foram testadas diferentes velocidades de descarga para o *star gate*, em razão do jigue do laboratório de Aachen não estar equipado com controle radiométrico de densidade do leite, devido à legislação alemã. Assim, os produtos por camada com recuperações mássicas de 90%, o qual foi mostrado e encaminhado para análise de cinza e enxofre, cujos resultados se encontram na tabela XVII emitido pelo AMR-RWTH. Esta recuperação mássica foi estabelecida através dos resultados das curvas de lavabilidade, NGM, cinzas e de enxofre total realizados nas Camadas Superior e Inferior, conforme figuras de 7 a 14.

Observa-se a expressiva redução no teor de cinzas nos produtos 10% de massa de rejeito, 45,62% (Camada Superior) e 47,11% (Camada Inferior). Os finos (-2 mm), como comentado anteriormente, não fazem parte do universo testado, eles representam 34,39% da massa alimentada da Camada Superior e 20,45% da Camada Inferior e possuem teor de cinzas 53,5% e 50,86%, respectivamente. Quando forem incluídos na operação em escala industrial, estes valores serão alterados.

É importante observar nos balanços de massas, dos ensaios com perda de carvão 10%, a massa significativa de piritita retida nos rejeitos das Camadas Superior e Inferior, que são de 29% e 38%, respectivamente. A tabela, a seguir, apresenta o resultado dos ensaios na Alemanha.

Tabela XVII – Resultado das análises químicas dos carvões da Camada Candiota

Carvões de Candiota				
Resultados do testes do jigue a ar				
Camada	10% Recuperação mássica dos pesados			
	Cinza		Enxofre	
	Produto	Rejeito	Produto	Rejeito
Superior	45,62%	60,69%	0,73%	4,04%
Inferior	47,11%	62,62%	1,09%	4,01%

A seguir são apresentados os balanços de massa da alimentação, do produto e do rejeito, de enxofre total (S_t) e de cinzas (C_z) para as diferentes camadas (Figuras 16 e 17). As frações finas não fizeram parte do material processado no jigue, como já citadas. Porém, elas foram incluídas em esquemas de balanço mássico, onde se obtêm informações sobre os teores de alimentação, dos materiais aspirados, dos produtos e dos

rejeitos. As frações aspiradas de -2 mm, como consta nos esquemas abaixo, são provenientes de um cálculo de balanço mássico aproximado, tendo como base os percentuais mássicos, teores de cinza e de enxofre total de cada faixa granulométrica da respectiva Camada. Os esquemas têm como padrão a granulometria de alimentação processada no jigue a ar, na Alemanha, tendo como valor mássico sempre 100% e tendo como rejeito 10% do valor alimentado no processo.

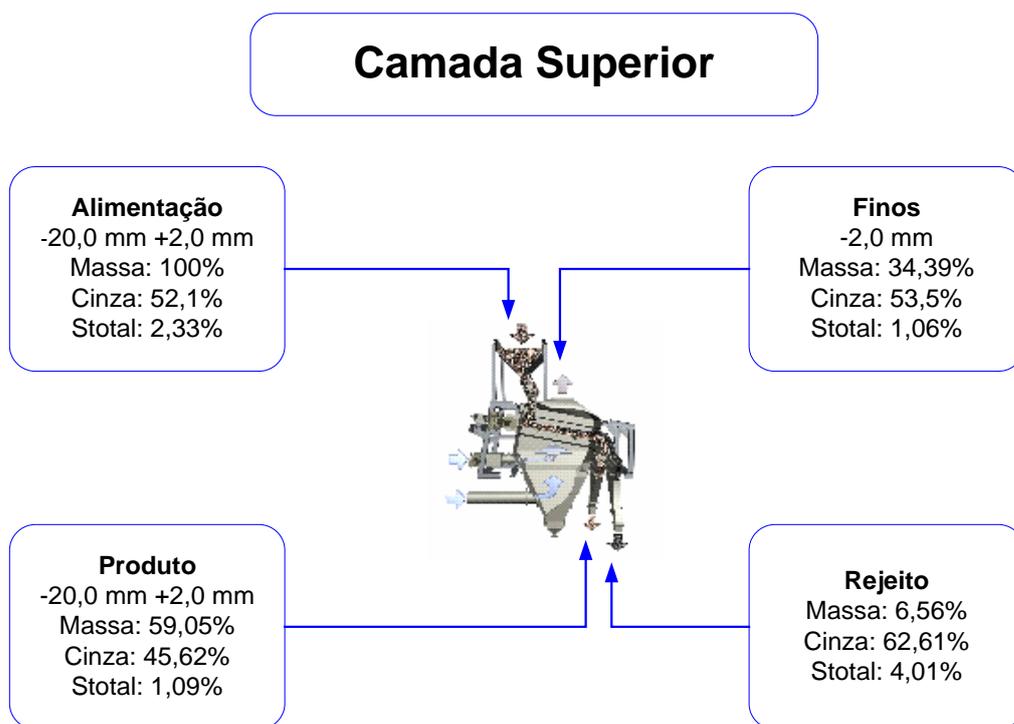


Figura 15: Resultado mássico do beneficiamento do jigue a seco

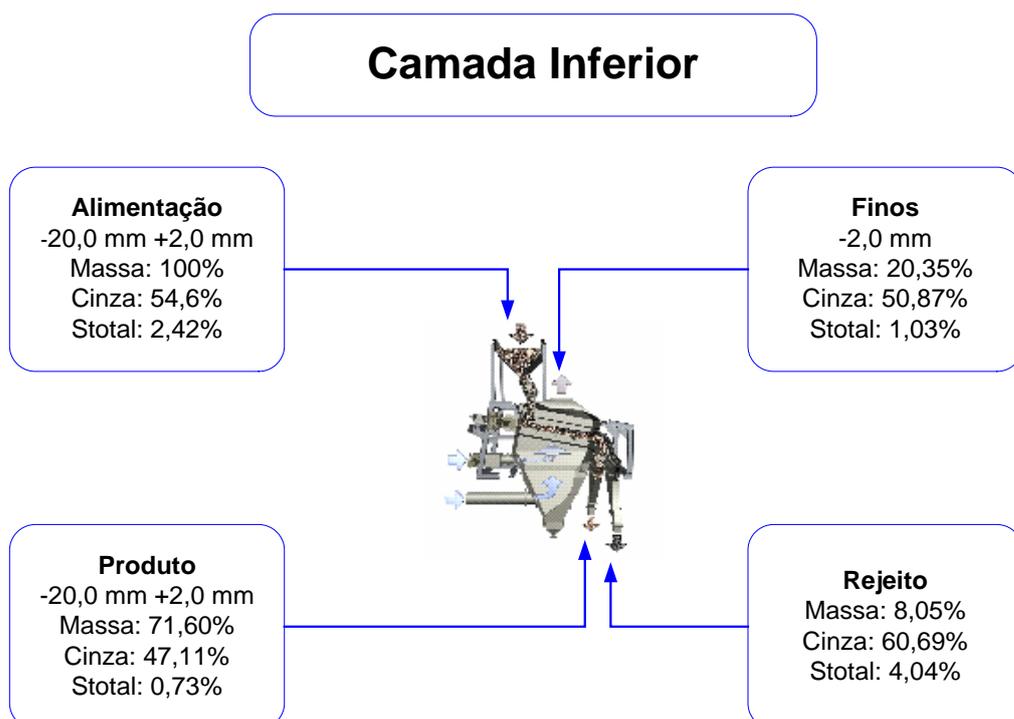


Figura 16: Resultado mássico do beneficiamento do jigue a seco

Comparando os esquemas apresentados nas figuras 16 e 17, pode-se concluir que: no concentrado do Banco Superior, o teor de enxofre total apresentou valor de 1,09%, enquanto que, na alimentação, este teor foi de 2,33%. Já no Banco Superior o teor de enxofre total na alimentação era de 2,42% e, no concentrado, foi reduzido a 0,73%.

Os percentuais de cinza nos produtos dos dois Bancos apresentaram uma diminuição em torno de 7%, enquanto que os valores das massas recuperadas de ambas Camadas foram diferentes, para a Superior de 59,05% e para Inferior de 71,60%.

Companhia Riograndense de Mineração utiliza como método de extração a lavra seletiva. O carvão é enviado por correia transportadora à CGTEE, onde é diretamente queimado ou estocado em pátio. O material processado, na usina, é uma mistura dos dois Bancos. Em vista disso, realizaram-se suposições de percentual de alimentação, de concentrado e de rejeito nas blendagem dos dois Bancos nas frações -2,0 mm e concluiu-se que: no concentrado foi obtido um percentual de massa de 65,32% com um de teor de cinzas de 46,44%, portanto, uma diminuição em torno de 6% e teor de enxofre total com 0,89%, enquanto que na alimentação era de 2,38%, apresentado na figura 18.

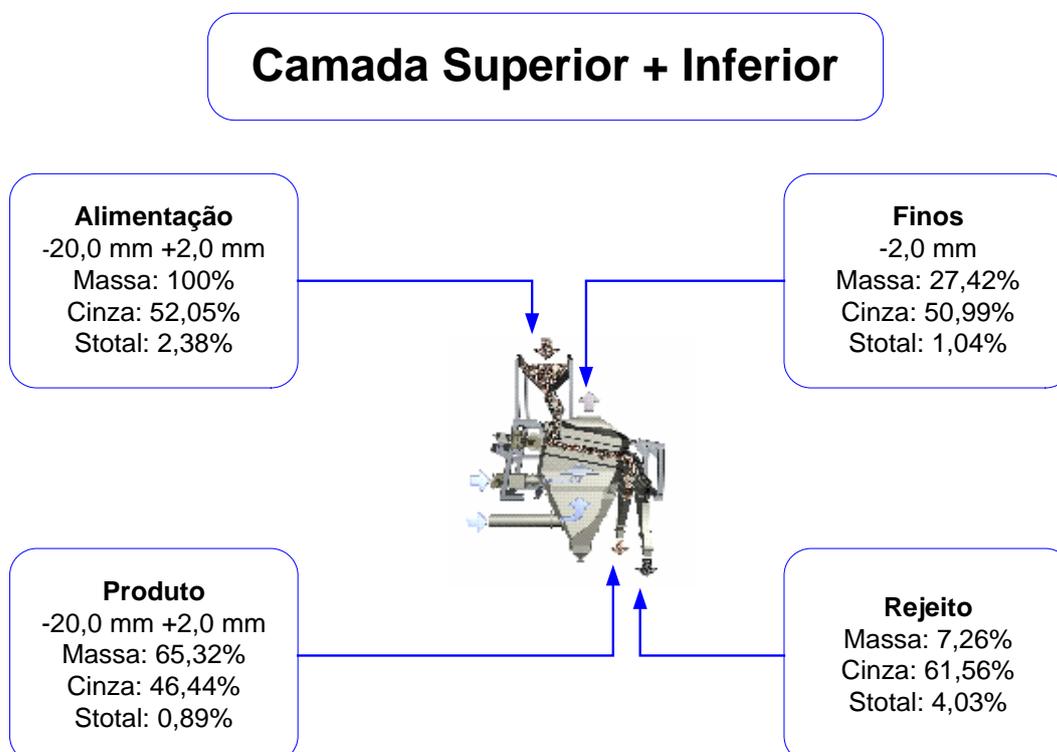


Figura 17: Resultado mássico do beneficiamento da mistura das duas Camadas

Após os testes realizados em Aachen, foram enviados à CIENTEC os produtos do jigge a ar dos Bancos Inferior e Superior, bem como amostras representativas da alimentação, concentrado e rejeito do jigge.

As amostras do rejeito e concentrado foram submetidas a ensaios de afunda-flutua, que foram realizados no LAPROM/UFRGS, com densidades entre $-1,3 \text{ g/cm}^3$ e $+2,4 \text{ g/cm}^3$ e em intervalo de 0,1 em $0,1 \text{ g/cm}^3$. Foram graficadas, então, as curvas de Tromp vistas nas figuras 10 e 11 e as tabelas VI e VII. A imperfeição de Tromp no Banco Superior é de 0,33 e no Inferior é de 0,30. A empresa fabricante do jigge de laboratório estima que a Imperfeição de Tromp varia de 0,2 a 0,3.

Tabela XVIII – Resultado do ensaio de afunda-flutua do produto e rejeito do Banco Superior

Banco Superior						
Faixa Dens.	Densidade (g/cm ³)	Produto Superior (g) (g)	Rejeito Superior (g) (g)	Alimentação (g) (g)	Nr. Tromp	Resultados
-1,3	1,3	247,40	15,50	262,90	94,10	D50 = 1,91 Ep = 0,285 ltromp = 0,31
1,3-1,4	1,4	462,80	45,20	508,00	91,10	
1,4-1,5	1,5	678,00	75,30	753,30	90,00	
1,5-1,6	1,6	868,70	108,93	977,63	88,86	
1,6-1,7	1,7	1333,70	323,56	1657,26	80,48	
1,7-1,8	1,8	666,20	763,60	1429,80	46,59	
1,8-1,9	1,9	466,20	287,90	754,10	61,82	
1,9-2,0	2,0	217,50	136,00	353,50	61,53	
2,0-2,1	2,1	31,10	71,00	102,10	30,46	
2,1-2,2	2,2	9,20	281,80	291,00	3,16	
2,2-2,3	2,3	18,60	306,80	325,40	5,72	
2,3-2,4	2,4	44,40	594,70	639,10	6,95	
2,4-2,5	2,5	36,50	737,10	773,60	4,72	
	TOTAL	5080,3	3747,39	-	-	

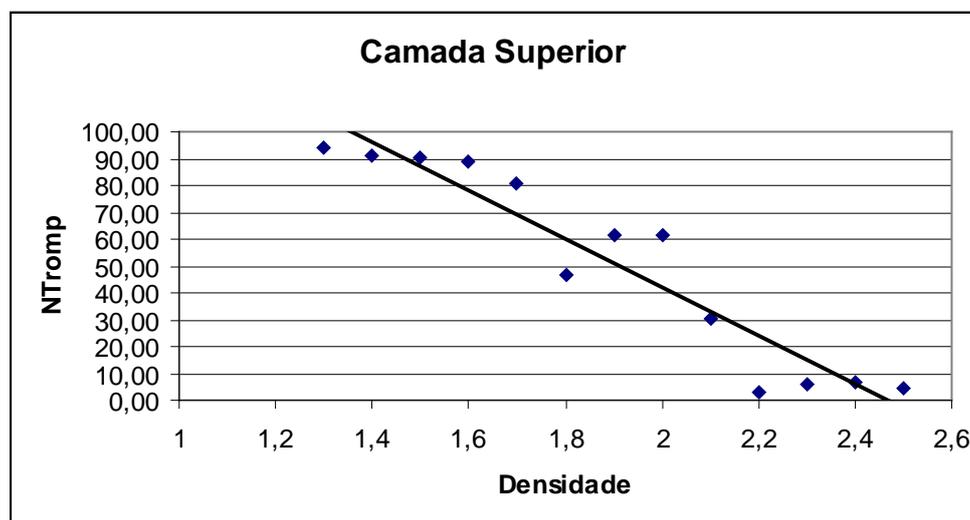


Figura 18– Curva de Tromp do jigge a seco do Banco Superior.

Tabela XIX - Resultado do ensaio de afunda-flutua do produto e rejeito do Banco Inferior

Banco Inferior						
Faixa Dens.	Densidade (g/cm ³)	Produto Inferior (g) (g)	Rejeito Inferior (g) (g)	Alimentação (g) (g)	Nr. Tromp	Resultados
-1,3	1,3	225,70	9,70	235,40	95,88	
1,3-1,4	1,4	68,80	23,70	92,50	74,38	
1,4-1,5	1,5	410,50	105,50	516,00	79,55	
1,5-1,6	1,6	1099,20	126,10	1225,30	89,71	
1,6-1,7	1,7	2087,00	438,20	2525,20	82,65	
1,7-1,8	1,8	631,30	244,00	875,30	72,12	
1,8-1,9	1,9	345,40	137,10	482,50	71,59	
1,9-2,0	2,0	125,00	329,60	454,60	27,50	
2,0-2,1	2,1	20,80	583,30	604,10	3,44	
2,1-2,2	2,2	43,20	547,70	590,90	7,31	
2,2-2,3	2,3	51,20	519,40	570,60	8,97	
2,3-2,4	2,4	27,50	490,90	518,40	5,30	
2,4-2,5	2,5	25,80	1390,60	1416,40	1,82	
TOTAL		5161,4	4945,8	-	-	

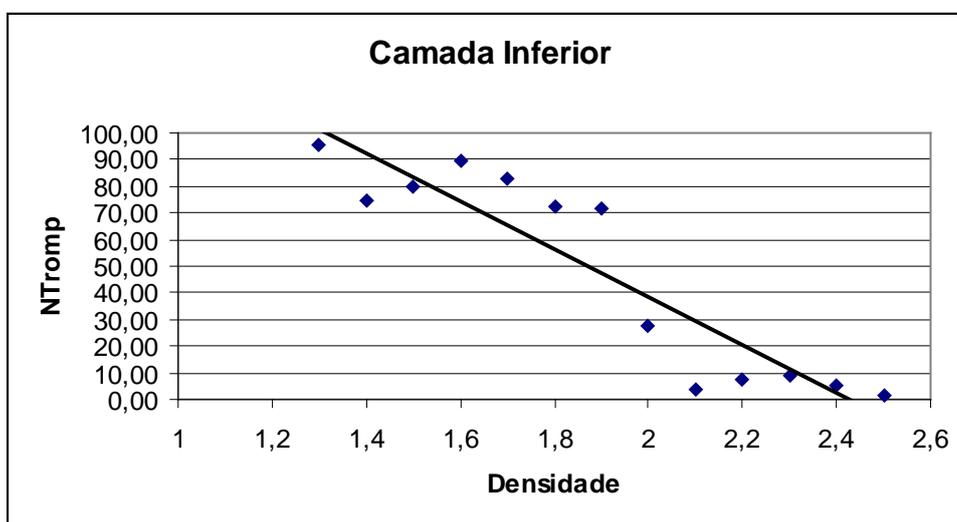


Figura 20: Curva de Tromp do jigge a seco do Banco Inferior

Utilizando-se os carvões ROM e produto jigado, de cada Camada, foram realizados ensaios de combustão numa planta, do tipo fluidizado, instalada na Fundação de Ciência e Tecnologia-CIENTEC. Os resultados das análises da queima do carvão são apresentados nas Tabelas XX e XXI, onde se pode verificar a diminuição do teor de cinza e um aumento do poder calorífico, na ordem de 7,16% para Camada Superior e de 4,74% para camada Inferior.

Tabela XX – Resultados dos ensaios de combustão comparando os carvões ROM e beneficiado

Camada Superior				
Tipo de Análise	ROM		Beneficiado	
	(%)	(kcal/kg)	(%)	(kcal/kg)
Umidade total	16.78	-	10.53	-
Umidade higroscópica	3.92	-	2.89	-
Cinza (b.s.)	52.23	-	48.77	-
Matéria volátil (b.s.)	20.61	-	21.72	-
Carbono fixo (b.s.)	27.16	-	29.87	-
Enxofre total (b.s.)	1.63	-	0.83	-
Carbono (b.s.)	34.62	-	37.11	-
Hidrogênio (b.s.)	2.37	-	2.60	-
Nitrogênio (b.s.)	0.61	-	0.65	-
Oxigênio + halogênios (b.s.)	9.01	-	9.97	-
Poder calorífico superior (b.s.)	-	3305	-	3545
Poder calorífico inferior (b.s.)	-	3185	-	3410

(b.s.) = base seca

Tabela XXI – Resultados comparativos entre o carvão ROM e beneficiado após ensaio de combustão

Camada Inferior				
Tipo de análise	ROM		Beneficiado	
	(%)	(kcal/kg)	(%)	(kcal/kg)
Umidade total	18.93	-	17.03	-
Umidade higroscópica	4.51	-	5.12	-
Cinza (b.s.)	51.32	-	46.89	-
Matéria volátil (b.s.)	22.90	-	21.97	-
Carbono fixo (b.s.)	25.73	-	26.48	-
Enxofre total (b.s.)	1.79	-	0.71	-
Carbono (b.s.)	29.52	-	32.72	-
Hidrogênio (b.s.)	2.15	-	2.86	-
Nitrogênio (b.s.)	0.69	-	0.70	-
Oxigênio + halogênios (b.s.)	10.04	-	10.23	-
Poder calorífico superior (b.s.)	-	3230	-	3385
Poder calorífico inferior (b.s.)	-	3085	-	3230

(b.s.) = base seca

Com a variação do poder calorífico há, também, uma variação da temperatura de chama e, conseqüentemente, da quantidade de calor disponível para as superfícies de troca. Por se tratar de um estudo comparativo (entre carvão ROM e jigado), pode-se calcular essas temperaturas, considerando-se as condições de combustão mantidas constantes, basicamente massa de combustível e excesso de ar. Para valores práticos de combustão pulverizada ou em leito fluidizado (sem levar em consideração que o processo em leito fluidizado tem como vantagem promover a combustão completa em temperaturas mais baixas do que o pulverizado), é recomendado um excesso de ar entre 20 a 30%. Para esse estudo foi utilizado um excesso de ar de 30%.

Pode-se estimar a temperatura de chama com a equação a seguir e apresentados na tabela XXII.

$$T_c = PCI / [MGU * C_p]$$

onde,

T_c = temperatura de chama (°C);

PCI = poder calórico inferior (kcal/kg);

MGU = massa de gases úmidos (kg/kg_{comb});

C_p = calor específico médio dos gases na temperatura da chama (°C).

Tabela XXII – Temperatura da chama dos carvões ROM e jigado para cada Camada

Carvão	Camada Superior	Camada Inferior
ROM	1.466 °C	1.455 °C
Jigado	1.489 °C	1.460 °C

Aplicando-se a equação, apresentada abaixo, de absorção de calor por radiação e considera-se a temperatura da parede T_p constante, foi elaborada a tabela a seguir, indicando o aumento percentual de calor disponível na zona de radiação.

$$HABS = 4 * SA * [(T_c + 273)/100]^4 - ((T_p + 273)/100)^4]$$

onde,

$HABS$ = calor absorvido por radiação (kcal/h);

SA = superfície de aquecimento exposta à radiação (m²);

T_c = temperatura de chama (°C);

T_p = temperatura externa da parede dos tubos (°C)

Tabela XXIII – Variação da absorção de calor na zona de radiação

Calor	Camada Superior	Camada Inferior
HABS	5,4%	3,5%

Esse aumento se refere à superfície de aquecimento direta, pode-se inferir que também haverá um aumento de transferência de calor na superfície de aquecimento indireta (conectiva) em função de uma maior massa de gases gerados a mais alta temperatura (dependente da absorção na superfície direta), mas que pode ser estimada abaixo.

$$\Delta QIND = 1 - \left\{ \frac{MGU_{Jig} * U * A * (T_{Gjig} - T_s)}{MGU_{ROM} * U * A * (T_{GROM} - T_s)} \right\} * 100$$

onde,

$\Delta QIND$ = variação de calor na zona conectiva (%);

T_{Gjig} = temperatura dos gases de carvão jigado na saída da zona de radiação (°C);

T_{GROM} = temperatura dos gases de carvão ROM na saída da zona de radiação (°C);

T_s = temperatura de saída dos gases do chaminé (°C);

U = coeficiente global de transferência de calor (kcal/hm² °C);

A = área de transferência de calor convectiva (m²);

MGU_{jig} = massa de gases úmidos de carvão jigado (kg/kg_{comb});

MGU_{ROM} = massa de gases úmidos de carvão ROM (kg/kg_{comb}).

Sendo U e A constantes e também as temperaturas dos gases na saída da zona de radiação iguais a uma percentagem de T_c (considerada a 75%) anteriormente definida como temperatura de chama, apresentada nas tabelas XX e XXI, podem ser vistas as variações percentuais de transferência de calor na zona de convecção relativas à mudança de carvão ROM para jigado em um gerador de vapor do tipo aquatubular, conforme tabela abaixo.

Tabela XXIV – Variação da transferência de calor convectiva

Calor	Camada Superior	Camada Inferior
$\Delta QIND$	5,5%	3,6%

Separando-se os efeitos combinados da radiação e da convecção, as participações dos mesmos devem ser relacionadas às áreas de cada zona, pois as variações apresentadas referem-se à área unitária. Para um cálculo mais preciso, foi feita uma média ponderada dos aumentos relativos à radiação e à convecção proporcional com a disponibilidade total de calor. Em um gerador de vapor normal, a superfície de aquecimento direta absorve entre 25 e 40% do calor total, e a superfície de aquecimento indireta entre 60 e 75%, portanto, simulando-se um gerador de vapor onde a absorção direta seja de 25%, o aumento da disponibilidade de calor proveniente da mudança de carvão ROM para o jigado pode ser calculado como abaixo:

$$\Delta DCT = ((AR * \Delta HABS) + (AC * \Delta QIND)) / \text{calor total}$$

onde,

AR = absorção por radiação / calor total

AC = absorção por convecção / calor total

Permite, então, estimar o aumento da disponibilidade de calor de 5,4% para Camada Superior e de 3,6% para Camada Inferior.

Salienta-se que os valores apresentados acima são referentes a uma simulação, partindo-se da suposição de substituição de combustível em um gerador de vapor tipo aquatubular, onde o combustível original é o carvão Candiota ROM e o substituto, o carvão Candiota jigado a seco.

Levando-se em consideração o apresentado anteriormente, pode-se elaborar a tabela abaixo, indicando o potencial da variação da disponibilidade de calor internamente a um gerador de vapor, considerando-se a variação do poder calorífico e das condições de trocas térmicas internas.

Tabela XXV – Variação estimada da disponibilidade de calor total

Camada	Disponibilidade de calor	Total	Média das Camadas
Superior	7,1 + 5,5%	12,6%	10,45%
Inferior	4,7 + 3,6%	8,3%	

A variação estimada nada mais é que o ganho energético com a queima do carvão jigado, propiciando uma menor quantidade de carvão utilizado na Usina para gerar a mesma quantidade de MWh, atualmente gerada e, com isso, haverá uma redução da emissão de CO₂, particulados e outros gases nocivos ao meio ambiente.

Os dados da SO₂ obtidos nos ensaios de queima nos carvões das duas Camadas em questão, são os seguintes:

- Banco Superior – o carvão ROM resultou em 2.799 ppm, enquanto que o beneficiado foi de 1.790 ppm, apresentando uma redução de 36%;
- Banco Inferior – o carvão ROM apresentou um valor de 1.964 ppm e o jigado de 1.215 ppm, com uma diminuição de 38%;
- Média das duas Camadas foi de 37%.

Este capítulo pretende avaliar a escala de produção, bem como estudos de pré- viabilidade econômica e análise de risco, abrangendo os custos de capital e de operação a partir da rota escolhida. Este estudo tem como parâmetros os ganhos e custos operacionais, que dará origem à análise de risco através do método do Fluxo de Caixa

Descontado, onde se pode simular o retorno financeiro do investimento de uma planta completa de jigagem a seco.

Os ganhos operacionais, nada mais é que uma economia do que seria gasto sem o beneficiamento com os jigues a seco.

A escala de produção projetada será baseada numa geração de 65% da capacidade atual instalada que é de 446 MWh, isto é, 290 MWh para Candiota Fases A e B.

Hoje, o consumo específico de carvão alimentado na Usina é de 1,15 toneladas por MWh, o que daria um consumo anual de carvão bruto de 2,92 milhões de toneladas (2.921.460 t/ano).

Durante os ensaios de queima em na Cientec, onde foram utilizados os carvões beneficiados em jigue a ar na Alemanha, obteve-se um rendimento global no sistema de combustão de até 10,45% maior em comparação ao carvão não beneficiado. Para efeito de cálculo da escala de produção e dimensionamento da planta de jigagem, o rendimento global de combustão na ordem de 10,45%; assim, tem-se o valor de **1,029 t_{carvão}/MWh** como consumo específico de carvão para geração da Usina.

A planta de jigagem projetada, para atender a demanda da Usina (290 MWh), deverá ter uma escala de produção anual de 2,61 milhões de toneladas processadas de carvão jigado (2.614.071,60 t_{produto}/ano). Aplicando-se uma eficiência operacional de 90%, traduzindo em 21,6 horas de operação diária por jigue (3 turnos) e uma recuperação de 85% da massa alimentada (carvão ROM), é necessário uma alimentação de 3.556.560 toneladas anuais de carvão bruto. Assim sendo, são necessários **10 jigues** para atender a demanda prevista.

Os valores de custo de capital e de operação relacionados foram obtidos junto ao fabricante *Allmineral* para o jigue, os salários de pessoal foram fornecidos pela CRM, pátio coberto e, para os demais equipamentos e instalações, utilizou-se o guia de estimativa *Mine and Mill Equipment Costs da Western Mines Engineering, Inc.*

Neste estudo de pré-avaliação, tem-se como base para o cálculo de aquisição de dez (10) jigues a ar, britador terciário, peneiras secundárias e terciárias e pátio coberto na CRM. Os valores destes equipamentos estão distribuídos conforme o apresentado na tabela abaixo.

O jigue completo e instalado é composto do ventilador principal, ventilador de ar pulsante, sistema de medição de densidade, sistemas e controles de descarga, fundações, estrutura de aço e prédio sem paredes e sem cobertura, coletor de poeira que inclui

ventilador e dutos, correias transportadoras, alimentador elevatório e quadro de comando de motores elétricos.

Tabela XXVI – Investimento da planta industrial para 500 t/h

Equipamentos	Valor R\$	Valor US\$*
10 Jigues e Acessórios (Instalados)	15.133.133,40	8.747.475,95
Material, pátio, montagem e cobertura jigues	22.714.716,00	13.129.893,64
Total	37.847.849,40	21.877.369,59

* US\$ 1,00 = R\$ 1,73 (06/11/07)

O outro item citado na tabela acima compreende na cobertura dos jigues, na construção de um pátio coberto com retomadas e correias transportadoras, materiais necessários para estas obras, montagem dos equipamentos e frete.

Tabela XXVII – Custo operacional dos 10 jigues (500 t/h)

Custo operacional	Quantidade	Custo anual (US\$/ano)	Custo operacional (US\$/t)
<i>10 jigues para 500 t/h ou 3.556.560 t/ano de alimentação</i>			
Mão-de-obra operação (1/3 homem p/jigue) + 2 mecânicos/eletric. p/turno	25	236.112,00	0,066
Supervisão de operação	5	86.557,00	0,024
Energia (Candiota= US\$ 36,00 /MWh) 1 jigue = 160 kWh	12.614,40 MWh/ano	454.118,40	0,127
Peças (US\$ 3.000,00/ano/jigue)	10	30.000,00	0,008
Sub-total			0,225
Contingências (25%)			0,056
Total			0,281

O consumo de energia para um jigue com filtro e ventiladores, de acordo o fabricante é 160 KWh, sendo que a despesa anual com peças de reposição por jigue é de 3.000 US\$. A *Allmineral* informou que o custo de operação do jigue a ar é US\$ 0,50 por tonelada alimentada, isto para os padrões europeus e norte-americanos. Assim, tentar-se-á estimar este custo com base na operação de Candiota, cujos custos de energia e mão-de-obra são menores. Para calcular este último item, a informação da CRM é que ela utiliza 5 turmas de funcionários para os 3 turnos de trabalho.

Será estimado, também, o custo operacional da planta industrial de 500 t/h, onde será utilizada uma pá-carregadeira para a retomada do produto na alimentação da moega e carregamento do rejeito piritoso gerado. A mão-de-obra de operação e manutenção foi considerada.

Tabela XXVIII – Custo operacional da planta industrial para 500 t/h

Custo operacional	Nr. horas	Custo horário	Custo operacional
Planta para 500 t/h	diárias	(US\$/h)	(US\$/t)
10 jigues 4 x 8 m, eficiência operacional de 90%, 3 turnos, 30 dias	21,6	-	0,281
Operador p/ britagem	21,6	-	0,077
Supervisor p/britagem	21,6	-	0,052
2 britadores duplo rolo	21,6	10.76	0,044
2 Peneiras Secundárias	21,6	5.88	0,024
2 Peneiras Terciárias	21,6	2.94	0,012
Sub-total			0,49
Contingências (25%)			0,122
Total			0,612

Análise econômica do ganho operacional

A cal que será consumidos pela CGTEE e para a reduzir dos gases sulfurados através do processo NIDI. Em vista disso, têm-se dois ganhos importantes, um é a redução do consumo da cal, e o outro é a redução de 15% da massa manuseada na Usina, relativa ao rejeito produzido após o processamento do carvão nos jigues.

O consumo de cal definido pela CGTEE é da ordem de 11.000 t/mês, com base numa geração de 320 MWh (Fase B), sendo multiplicado por um fator de carga de 0,8. Tal previsão levará um consumo específico de cal para a Fase B de 19,27 $t_{\text{carvão}}/t_{\text{cal}}$.

Através dos testes de queima dos carvões dos Bancos Superior e Inferior realizados na CIENTEC, obteve-se uma redução média de SO₂ de 37%.

A CGTEE utiliza hoje o valor de 1,15 como consumo específico de carvão por MWh gerado. O rendimento global adotado para o sistema de combustão é de 10,45%, o que resultou num valor de 1,029 $t_{\text{carvão}}/MWh$.

Neste capítulo será utilizada a relação de US\$ 1,00 para R\$ 1,73 (06/11/07).

Consumo de cal na dessulfurização

O cálculo de consumo de cal na usina é de:

- Consumo específico de cal / carvão não jigado – $320 \text{ MWh} \times 0,8 \times 24 \text{ h} \times 1,15 \text{ } t_{\text{carvão}}/MWh \times 30 \text{ dd} / 11.000 \text{ tcal}/\text{mês} = 19,27 \text{ } t_{\text{carvão}}/t_{\text{cal}}$;
- Consumo específico de cal com os jigues - $320MWh \times 0,8 \times 24h \times 1,029 \text{ } t_{\text{carvão}}/MWh \times 30\text{dd} / 6.930 \text{ tcal}/\text{mês} = 27,37 \text{ } t_{\text{carvão}}/t_{\text{cal}}$;

Despesa da usina com a cal

As despesas da usina com a cal serão as seguintes:

- Despesa da usina com carvão não jigado – $290 \text{ MWh} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ dd} \times 1,15 = 2.921.460 \text{ } t_{\text{carvão}}/\text{ano}$. A Fase B consome 72% da produção de carvão, que é de $2.103.451,20 \text{ } t_{\text{carvão}}/\text{ano}$. O consumo de cal na Fase B será de $2.103.451,20 \text{ } t_{\text{carvão}}/\text{ano} / 19,27 = 109.156,78 \text{ } t_{\text{cal}}/\text{ano} \times \text{R\$ } 180,00/t_{\text{cal}} / 1,73 = \text{US\$ } 11.357.460,26$.
- Despesa da usina com carvão jigado – $290 \text{ MWh} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ dd} \times 1,029 = 2.614.071,60 \text{ } t_{\text{carvão}}/\text{ano}$. A Fase B consome 72% da produção do carvão, que é de $1.882.131,55 \text{ } t_{\text{carvão}}/\text{ano}$. O consumo de cal na Fase B será de $1.882.131,55$

$$t_{\text{carvão}}/\text{ano} / 27,37 = 68.766,22 \text{ t}_{\text{cal}}/\text{ano} \times \text{R\$ } 180,00/\text{t}_{\text{cal}} / 1,73 = \text{US\$ } 7.155.199,96;$$

- Economia anual no custo de cal é de **US\$ 4.202.260,30**.

Transporte de cinzas e de rejeito da jigagem

Atualmente o custo do frete de cinzas é de R\$ 4,93 /t de cinzas, percorrendo a distância entre a CGTEE e a mina para o descarte. Este cálculo está baseado na produção de 290 MWh x 24 h x 365 dd x 1,15 = 2.921.460 $t_{\text{carvão}}/\text{ano}$ x 52% de cinzas x 0,84 (correspondente ao teor de 16% de umidade), resultando em 1.276.093,72 $t_{\text{cinza}}/\text{ano}$. Para saber o custo do transporte destas cinzas é 1.276.093,72 $t_{\text{cinza}}/\text{ano}$ x R\$ 4,93 t de cinza / R\$ 1,73 (conversão para dólar), que corresponde em US\$ 3.636.498,29 para o transporte de cinzas / ano, como se verificam, a seguir, os cálculos do frete de cinza e de rejeito:

Instalação dos jigues na CRM - o rejeito piritoso gerado retornará diretamente para mina via caminhão. Estima-se que ocorra uma redução de 50% no custo do frete, passando a ser de R\$ 2,46 / t_{rejeito} . O cálculo para este ganho foi feito da seguinte forma:

- Rejeito – O rejeito é calculado baseado em 15% da alimentação e um ganho no sistema de combustão que é de 10,45% = 1,029, como foi visto acima. A alimentação dos jigues é calculada da seguinte maneira: 290 MWh x 24 h x 365 dd x 1,029 = 2.614.071,60 $t_{\text{carvão}}/\text{ano}$. Sobre este valor acrescenta-se 15%, obtendo-se, assim, o valor de 3.075.378,35 $t_{\text{carvão}}/\text{ano}$. Os 15% de rejeito é a diferença entre a alimentação e o produto dos jigues que é igual a 461.306,75 $t_{\text{rejeito}}/\text{ano}$ x R\$ 2,46 / R\$ 1,73 = US\$ 655.962,20;
- Cinzas - o cálculo das cinzas é o produto dos jigues 2.614.071,60 $t_{\text{carvão}}/\text{ano}$ x 46,36% (teor cinza contido no produto) x 0,84 (teor de 16% de umidade) que é 1.017982,21 $t_{\text{cinza}}/\text{ano}$ x R\$ 2,46 / R\$ 1,73 = US\$1.723.256,44;
- O somatório do frete do rejeito e das cinzas é de US\$ 2.379.218,64, que é inferior em **US\$ 1.257.279,65** ao valor da despesa de US\$ 3.636.498,29 atualmente praticado (estimativa).

Manuseio do carvão

Outro fator importante é o custo de R\$ 3,22 /t de carvão, referente aos serviços realizados pela CRM no Pátio 1, (transporte do carvão por correia até o Pátio 1, manuseio do carvão e operação dos MF's), tem-se:

- Manuseio do Pátio 1 – com os jigues instalados na CRM haverá uma redução de 307.568,40 t_{carvão}/ano na movimentação no Pátio 1; a economia deste manuseio é de $307.568,40 \times 3,22 / 1,73$ o que resultará numa economia anual de **US\$ 572.468,35**.
- Moagem do carvão (MF's instalados próximo ao Pátio1 na CGTEE) que alimenta as caldeiras das Fases A (28 %) e da Fase B (72 %). Com a introdução da jigagem do carvão, tem-se uma redução global da massa de carvão alimentada em relação à atualmente praticada de 11,75 %, isto é, hoje se consome 2.921.460 t/ano de carvão bruto e se passará a consumir 2.614.071,60 t/ano de produto jigado para gerar a mesma potência. Isto traduzirá em economia de energia de moagem, corpos moedores e placas de revestimento do circuito de moagem estimada em **US\$ 421.867,65** anuais.
- A manutenção dos moinhos instalados na Usina compreendem na blindagem e corpos moedores, tendo um custo de R\$ 3.431.863,51/ano. A capacidade de produção destes equipamentos da Fase B era de 100 t/h, atualmente, encontra-se na faixa de 80 t/h, ou seja, a retomada à condição original representa um acréscimo de 25% na capacidade de produção. Estima-se que a economia com os consumíveis dos moinhos se dará nesta grandeza. A economia anual estimada será de: $25\% \times 3.431.863,51 / 1,73 =$ **US\$ 495.934,03**.
- Devido à qualidade do carvão, atualmente, utilizado na Usina, ocorrem muitas paradas no processo de gerar energia elétrica. Cada retorno à geração de energia causa: uma necessidade de consumir fuel oil, a energia que se deixa de fornecer, resultando num custo de R\$ 4.310.460,00. Com o fornecimento do carvão jigado, espera-se que estes problemas tenham uma redução de 25% no número de ocorrências e foi calculada da seguinte forma: $25\% \times 4.310.460,00 / 1,73 =$ **US\$ 622.898,84**.

Custo da planta de jigagem

O custo operacional da planta de jigagem que compreende os jigues, as peneiras, os britadores, energia e mão-de-obra foram estimados em US\$ 0,612/t, aplicado sobre a alimentação de 3.556.560 t_{carvão}/ano, o que representa **US\$ 2.176.614,72** anuais de gasto. O resumo destes demonstrativos dos ganhos x custo operacional estão relacionados na tabela abaixo.

Tabela XXIX: Demonstrativo econômico da instalação do jigue (valores anuais)

Item	CRM
Ganho com a dessulfurização	US\$ 4.202.260,30
Transporte de cinzas e rejeito	US\$ 78.089,02
Manuseio do carvão	US\$ 572.133,31
Redução no custo energia / moagem MF's	US\$ 421.867,65
Economia nos moinhos da usina	US\$ 495.934,03
Acendimentos das caldeiras	US\$ 622.898,84
Total	US\$ 6.394.183,15
Custo operacional da planta de jigagem	(US\$ 2.176.614,72)
Saldo	US\$ 4.217.568,48

Análise de risco através do fluxo de caixa descontado

Rentabilidade do projeto

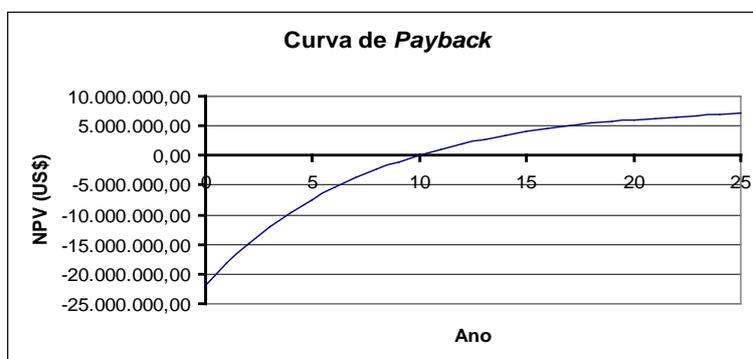
Numa primeira aproximação, avalia-se o retorno financeiro do projeto através do Método do Fluxo de Caixa Descontado, sem imposto de renda. Utilizou-se a taxa de atualização de 14 % ao ano para 25 anos de operação, mantendo constantes o ganho e o custo operacional. Tal procedimento visa a medir o potencial do projeto quanto à sua sustentabilidade do ponto de vista operacional e de retorno do capital investido. A simulação através deste Método para um panorama constante está nas tabelas abaixo, acompanhada do respectivo quadro resumo

Tabela XXX – Fluxo de caixa de 10 jiges sem imposto e sem empréstimo

Fluxo de Caixa de 10 jiges (sem imposto e sem empréstimo)							
Ano	Ganho	Despesa	Investimento	Fluxo de	Somatório	Fluxo de Caixa	Somatório
	Operacional	Operacional		Caixa	Flx. Caixa	Descontado	Flx.Cx.Desc.
	US\$	US\$	US\$	US\$	US\$	US\$	US\$
0	0,00	0,00	21.877.369,59	-21.877.369,59	-21.877.369,59	14,00%	-21.877.369,59
1	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	-17.659.801,16	3.699.621,43	-18.177.748,16
2	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	-13.442.232,73	3.245.281,96	-14.932.466,20
3	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	-9.224.664,30	2.846.738,56	-12.085.727,65
4	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	-5.007.095,87	2.497.139,09	-9.588.588,56
5	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	-789.527,44	2.190.472,88	-7.398.115,68
6	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	3.428.040,99	1.921.467,44	-5.476.648,24
7	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	7.645.609,42	1.685.497,75	-3.791.150,48
8	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	11.863.177,85	1.478.506,80	-2.312.643,68
9	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	16.080.746,28	1.296.935,79	-1.015.707,89
10	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	20.298.314,71	1.137.662,98	121.955,09
11	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	24.515.883,14	997.949,98	1.119.905,07
12	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	28.733.451,57	875.394,72	1.995.299,78
13	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	32.951.020,00	767.890,10	2.763.189,89
14	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	37.168.588,43	673.587,81	3.436.777,70
15	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	41.386.156,86	590.866,50	4.027.644,20
16	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	45.603.725,29	518.303,95	4.545.948,14
17	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	49.821.293,72	454.652,59	5.000.600,73
18	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	54.038.862,15	398.818,06	5.399.418,79
19	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	58.256.430,58	349.840,40	5.749.259,19
20	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	62.473.999,01	306.877,54	6.056.136,73
21	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	66.691.567,44	269.190,83	6.325.327,56
22	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	70.909.135,87	236.132,31	6.561.459,87
23	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	75.126.704,30	207.133,60	6.768.593,47
24	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	79.344.272,73	181.696,14	6.950.289,61
25	6.394.183,15	2.176.614,72	0,00	4.217.568,43	83.561.841,16	159.382,58	7.109.672,19
			21.877.369,59				

Tabela XXXI – Resumo da análise de risco

Resumo da análise de risco (10 jiges)	
Somatório dos fluxos de caixa (US\$):	83.561.841,16
Taxa de Atualização (%):	14,00
Som.Fluxos de caixa atualiz.NPV (US\$):	7.109.672,19
Taxa Interna de Retorno do C.P. (%):	18,97
Intensidade de capital:	3,4
Margem Operacional (%):	66,0
Payback (em anos):	10

Figura 19: Curva de *payback* em anos

Analisando os resultados obtidos na tabela de fluxo de caixa descontado e de risco, pode-se afirmar que:

- A taxa de retorno de 18,97% superior a taxa de atualização;
- Margem de operacional de 66,0%;
- Em dez (10) anos tem o retorno do capital investido;
- A intensidade de capital de 3,4 é alta, considerando que o utilizado nas empresas de mineração, como norma geral, é entre 1,5 a 3,0. Como neste estudo é uma fase complementar, tanto para a empresa de mineração como para a geradora de energia elétrica, em que o fator preponderante é o meio ambiente. Os outros processos posteriores a combustão não foram quantificados, pois não houve ensaios em escala de produção.

Para ter uma idéia de quais os parâmetros calculados neste estudo tem grande variação quanto às alterações de percentuais em função do NPV (-30% a +30% com acréscimo de 10% em 10%), no qual foi verificado no gráfico aranha (*spider*) abaixo.

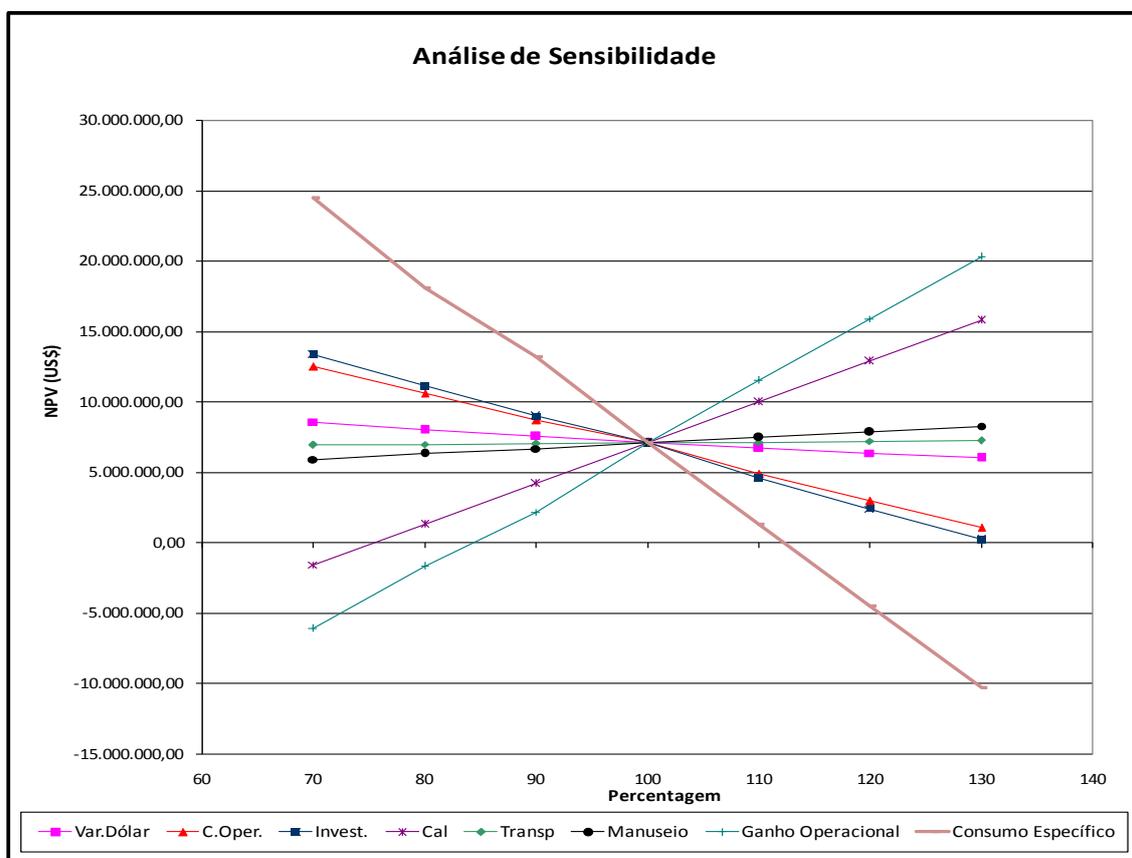


Figura 20: Gráfico aranha apresentando os parâmetros sensíveis do projeto

Pode-se verificar, no gráfico acima, que os parâmetros de manuseio e transporte de carvão na CGTEE e a variação do dólar não são sensíveis à mudança percentual, enquanto que o investimento e o custo operacional têm uma pequena oscilação. Já o consumo específico, ganho operacional e a cal demonstram uma grande sensibilidade, quando ocorre uma alteração no percentual em função do NPV.

5 – CONCLUSÕES

No encerramento deste estudo, após os ensaios em laboratório, em planta piloto de jigagem e de leito fluidizado, pode-se concluir com segurança da viabilidade técnica e econômica do beneficiamento a seco dos carvões da jazida de Candiota.

Foi sugerida a empresa financiadora a necessidade de adquirir um jigue para a realização dos testes, onde teríamos definido o *top size* da alimentação e certamente obteríamos outros resultados a partir da combustão do carvão jigado após processamento numa das caldeiras da Fase A e, a outra, continuaria a consumir o carvão britado.

Nas tabelas XII e XIII, verifica-se que na fração 0,1 mm o teor de cinza é de 64,9% e em relação ao enxofre total, no intervalo $-12,7 +2,0$ mm em ambas as Camadas, o percentual é maior, acima de 2,6%, verificando-se uma maior liberação da pirita, demonstrado pelo teor de enxofre pirítico, que varia em torno de 1,44% a 1,74%.

A quantidade de finos nas duas Camadas, na fração -1,00 mm é de 23,73% para Camada Superior e de 15,22 para a Inferior, isso é devido à sua formação em trufeiras, pois a sua composição basicamente é argila.

Na tabela XIV, mostra uma grande quantidade de finos para todos os graus de cominuição. O carvão ROM ocorre a presença de cerca de 20% em peso de material com granulometria menor que 0,63 mm, e o carvão britado a -2,00 mm mostra cerca de 34% de material abaixo de 0,1 mm.

As figuras 11 e 12, nas frações intermediárias de 1,6 a 1,9 g/cm³, mostram a dificuldade em beneficiar os carvões das duas Camadas, devido ao índice de NGM.

As curvas de Tromp vistas nas figuras 10 e 11 e as tabelas VI e VII, mostram a Imperfeição de Tromp no Banco Superior é de 0,31 e no Inferior é de 0,31. A empresa fabricante do jigue de laboratório estima que a Imperfeição de Tromp varia de 0,2 a 0,3.

As vantagens do processo de concentração a seco são as baixas umidades do produto, baixos custos de operação e investimento, além de alta capacidade. Neste processo não requer circuitos paralelos de água, permitindo eliminar a etapa posterior de deságüe, dispensando equipamentos como filtros e secadores.

Neste beneficiamento a seco os teores de enxofre total houveram grandes reduções, tais como: no Banco Superior, o teor de enxofre do material jigado foi de 0,73%, enquanto que, na alimentação, este teor foi de 2,33%. Já no Banco Inferior o

teor de enxofre total na alimentação era de 2,42% e, no concentrado, foi reduzido a 1,09%.

Tem-se como ganho principal do beneficiamento do carvão por jigagem a seco, a redução em escala piloto (jigagem e planta de combustão) de até 38% na emissão de SO₂ e 10,45% no ganho energético durante a combustão do carvão tratado no jigue, além da redução de argila e calcário.

Também se espera a redução da emissão de particulados (*fly-ash*), em função da maior eficiência dos precipitadores eletrostáticos, devido ao menor teor de cinzas do carvão empregado na combustão.

Outro fator importante é a redução dos gases sulfurosos e de NO_x devido à otimização de parâmetros operacionais de combustão.

O custo da remoção do enxofre pelo beneficiamento a seco é sempre menor se comparado com a lavagem de gases de combustão ou outro método qualquer.

A utilização de jigue a seco no processo de beneficiamento dos carvões de Candiota traz um enorme benefício, tais como:

- Produção de carvão com maior valor agregado;
- O carvão jigado possui maior poder calorífico, diminuindo, assim, os custos com as operações de transporte, de estocagem e de cominiução;
- A viabilidade do beneficiamento a seco vai propiciar abertura de novos mercados do produto gerado, pois este equipamento nunca foi utilizado no Brasil;
- Baseando-se no ganho energético de 10,45%, pode-se dizer que a quantidade de carvão utilizado na Usina será menor para gerar a mesma quantidade de MWh atualmente gerada, o que resultará numa diminuição da emissão de CO₂.

A análise de risco econômico ligado à implantação deste projeto demonstra que os custos operacionais da planta de jigagem a seco são cobertos pelos ganhos advindo do beneficiamento a seco, principalmente com a redução do gasto com matéria-prima no processo de desulfurização dos gases gerados pela Fase B e no ganho energético de combustão.

Observando o gráfico de sensibilidade nota-se que o consumo específico é muito sensível a qualquer variação, tornando um item de grande relevância para o projeto. Este está relacionado com o poder calorífico do carvão, ou seja, quanto maior ele for

menor será o consumo específico e, como consequência, menor será a quantidade de carvão necessário para produzir os 290 MWh que a CGTEE produz.

Outro fator importante é a cal, já que este material é cartelizado e seu valor no mercado é bastante onerado. Ele está intimamente ligado ao consumo específico, pois quanto menor o consumo de carvão para gerar a necessidade da CGTEE, menor será o consumo de cal. Esse item afeta, também os ganhos operacionais, pois ele é um fator da maior relevância no estudo de pré-viabilidade econômica.

Outro fator muito relevante a este estudo é a criação de um novo processo de beneficiamento a seco de carvão, inexistente no Brasil até o presente, permitindo a redução dos níveis de enxofre e de cinzas do carvão de Candiota a um custo e rendimento compatíveis.

BIBLIOGRAFIA

- ADE, M.V.B.; 1993; Características dos Sistemas Depositionais e das Camadas de Carvão no Pacote Sedimentar da Malha IV, Jazida de Candiota-RS; Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Geociências - UFRGS.
- ALVES R.G.; 1994; Correlação estratigráfica de alta resolução aplicada ao Permiano Inferior da Bacia do Paraná, na região de Candiota, Rio Grande do Sul; Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geociências - UFRGS.
- ASTM; 1981; American Society for Testing and Materials.
- BENVINDO DA LUZ, A.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M.; 2004; Tratamento de Minérios; 4ª Edição; CETEM/MCT; Rio de Janeiro.
- BORTOLUZZI, C.A.; PICCOLI, A.C.M.; BOSSI, G.E.; GUERRA-SOMMER, M.; MARQUES-TOIGO, M.; PONS, M.E.H.; WOLF, M.; CORREA E SILVA, Z.C.; 1978; Pesquisa Geológica da Bacia Carbonífera de Santa Catarina; Pesquisa-IG/UFRGS, nº 11; p 33-192.
- CARISSO, R.C.C.; CHAVES, A.P.; 2001; Mecanismos Atuantes na Concentração Gravítica e Principais Equipamentos Utilizados na Concentração Centrífuga; Série Tecnologia Mineral; n 78; CETEM/MCT; Rio de Janeiro.
- CORREA E SILVA, S.C.; 1987a; Jazidas de Carvão no Rio Grande do Sul, Brasil; Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Curitiba-PR; v 2; p 677-687.
- CORREA E SILVA, Z.C.; 1988; The Formation of Coal Deposits in South Brazil; Gondwana Symposium; p 233-252.
- CORREA E SILVA, Z.C.; CAZZULO-KLEPZIG, M.; MARQUES-TOIGO, M.; 1992; Geologia das Jazidas de Carvão no Estado do Rio Grande do Sul, região sul do Brasil; Congresso de Geologia de Espanha, Salamanca; V 2; p 247-259.
- CORREA E SILVA, Z.C.; PUTTMAN, W.; WOLF, M.; 1987; Studies on the Rank Determination of South Brazilian Gondwana Coals; International Conference on Coal Science; Amsterdam-Holanda.
- DIESEL, C.F.K.; 1992; Coal-bearing Deposits Systems; Springer-Berlim.
- HORN, A.; SHORT, M.; 2003; Dry Beneficiation of Lignite and Hard Coal with the Allair jig; Surface Mining, v 55 (2); p 2-6.
- JABLONSK, A.; 1996; Comunicação Interna – Notas de Aula
- LINS, F.F.; 1998; Concentração Gravítica; In Tratamento de Minérios; 2ª Edição; CETEM/MCT; Rio de Janeiro.

- LUBIN, W.; 2003; Formation of Double-Density Fluidized Bed and Application in Dry Coal Beneficiation; Coal Preparation, v 23, p 21-32; Editor Taylor & Francis Group.
- MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L.; 1994; Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro; n° 8; v 1; p 69-82
- QINGRU, C.; YUFEN, Y.; Development of Dry Beneficiation of Coal in China; 2003; Coal Preparation, v 23, p 3-12; Editor Taylor & Francis Group.
- SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L.M.M.; 2005; Beneficiamento Gravimétrico; Editora UFRGS.
- 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; Porto Alegre; v 1; p 41-66.
- SILVA, M.B.; 1994; Caracterização Petroquímica das Camadas de Carvão da Malha IV-Jazida de Candiota-RS; Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Geociências - UFRGS.
- SILVA, M.B.; 1999; Petrologia dos Carvões nas Jazidas do Leão e Candiota, Permiano Inferior da Bacia do Paraná-RS-Brasil; Tese de doutorado - Curso de Pós-graduação em Geociências-UFRGS.
- STACH, E; MACKOWSKY, TH; TEICHMÜLLER, M; TAYLOR G.H; CHANDRA,G.H; TEICHMÜLLER, R.; 1975; Coal Petrology; Gebrüder Borntraeger Berlim – Stuttgart.
- YAQUN, H.; YUEMIN, Z.; QINGRU, C.; 2003; Fine Particle Behavior in Air Fluidized Bed Dense Medium Dry Separator; Coal Preparation, v 23, p 33-45, Editor Taylor & Francis Group.
- ZHENFU, L.; QINGRU, C.; YAOMIN, Z.; 2002; Dry Beneficiation of Coarse Coal Using na Air Dense Medium Fluidized Bed (ADMFB); Coal Preparation, v 22, p 57-64; Editor Taylor & Francis Group.