

**ANTONIO RODRIGUES DE CAMPOS**

**DESSULFURAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO DE  
SANTA CATARINA POR CONCENTRADORES CENTRÍFUGOS**

**Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia**

**SÃO PAULO  
2001**

RECEBIDO  
2001 / 10 / 25  
PÓS-GRADUAÇÃO

**ANTONIO RODRIGUES DE CAMPOS**

**DESSULFURAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO DE  
SANTA CATARINA POR CONCENTRADORES CENTRÍFUGOS**

**Tese apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Doutor em  
Engenharia**

**Área de Concentração:  
Engenharia Mineral**

**Orientador:  
Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves**

**SÃO PAULO  
2001**

Campos, Antonio Rodrigues de  
Dessulfuração de finos de carvão de Santa Catarina por  
concentradores centrífugos. São Paulo, 2001. xxx p

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Dessulfuração; 2. Finos de Carvão; 3.  
Concentradores Centrífugos. I. Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

À Comissão de Pós-graduação  
Escola Politécnica da USP  
E.M.

Ref.: Antonio Rodrigues de Campos

São Paulo, 28 de fevereiro de 2001.

Prezados senhores:

A Comissão Julgadora da dissertação de mestrado acima referida determinou a inclusão de uma errata na mesma. Passo a apresentá-la, pedindo as suas providências para a sua inclusão.

Atenciosamente,

Arthur Pinto Chaves  
orientador

ERRATA

pág.	linha	onde se lê:	leia-se:
	Sumário, item 3.1.4	Multy	Multi
i	segunda linha	concentrado	concentrador
	sexta linha	Fato	Foto
	décima linha	descontínuo	contínuo
3	vigésima terceira	os minerais de argila (folhelho caulinita)	argilas (caulinita), micas (muscovita)
22	décima linha	Nesta de	Nesta operação de
27	décima primeira	Candiota-RS da camada	Candiota, RS e da camada
28	nona linha	O Anexo 1 ... acima citados.	suprimir a frase
33	décima sexta linha	(MGS), Mozley	MGS, da Mozley
34	oitava linha	cinzas	enxofre pirítico
	nona linha	de enxofre pirítico	de cinzas
35	quinta linha	pirita, argilas e outros constituintes inorgânicos	pirita e partículas mistas contendo pirita
37	vigésima terceira	carvão nacional	carvão nacional beneficiado
39	terceiro parágrafo	incluir a referência da página 38, que serve para todos os itens	
40	terceiro parágrafo	incluir a referência (NÓVOA, 1974)	



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

41	primeiro parágrafo	incluir as referências (CAMPOS; ALMEIDA, 1981; LIMA et al., 1992)	
44	décima quinta	foram	haviam sido
45	terceiro parágrafo	incluir as referências (BALTAR, 1989; APLAN, 1993; PAPÉE, 1989; CAMPOS et al., 1981)	
	vigésima linha	mostrar	verificar
47	oitava linha	duro	difícil de moer
58	terceira linha	modelo descontínuo	modelo contínuo
66	décima quarta	0,74 ... , 0,37	0,074,... 0,037
77	quarta linha	0,412 $\mu\text{m}$	412 $\mu\text{m}$
79	tabela 2	35 (malhas Tyler)	65
	tabela 3	35 (malhas Tyler)	65
83	quinta linha	figura 12	figura 24
93	décima segunda	0,03 %	0,48 %
	décima sexta	90%	50%
94	décima sexta	concentrado de flotação depititados	produto depiritizado

Adicionar os seguintes parágrafos:

"Nos concentrados piritosos predomina a pirita de granulometria fina".

"A mesa Mozley serviu de balizamento para a avaliação dos resultados experimentais".

"Foi feito o balanço de massas pela alimentação recalculada e verificado que os resultados eram coerentes com a alimentação analisada:.

95	quarto parágrafo	predominam presença da	predomina a
	quinto parágrafo	pititosos	piritosos

*Assinatura*

## SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b> .....	i
<b>Lista de Tabelas</b> .....	iii
<b>Resumo</b> .....	iv
<b>Abstract</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. Considerações Iniciais</b> .....	1
<b>1.2. Histórico</b> .....	8
<b>1.3. Carvão Catarinense</b> .....	19
<b>1.4. Contribuição do CETEM</b> .....	27
<b>1.5. Beneficiamento de carvões</b> .....	30
1.5.1. Estudos de lavabilidade.....	34
1.5.2. Métodos de concentração gravítica .....	37
1.5.3. Dificuldades na dessulfuração de finos de carvão.....	39
<b>2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVO</b> .....	43
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	46
<b>3.1. Concentradores centrífugos</b> .....	47
3.1.1. Concentrador Centrífugo Knelson .....	49
3.1.2. Jigue centrífugo Kelsey .....	53
3.1.3. Concentrador Falcon .....	55
3.1.4. "Multy Gravity Separator" (MGS) .....	58
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	61
<b>4.1. Amostragem dos Finos de Carvão nos Lavadores</b> .....	62
<b>4.2. Preparação das Amostras de Finos de Carvão</b> .....	65
<b>4.3. Análise Granulométrica com Teores de Enxofre e Cinzas das Frações</b> .....	65
<b>4.4. Caracterização Mineralógica</b> .....	66

4.5. Ensaio em Mesa Mozley .....	68
4.6. Ensaio em Mesa Vibratória .....	70
4.7. Ensaio no Concentrador Centrífugo Knelson .....	72
4.8. Ensaio no MGS (Multi Gravity Separator) .....	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	78
5.1. Análise Granulométrica com teores de cinzas e enxofre das Frações .....	78
5.1.1. Finos de carvão da Cooperminas .....	78
5.1.2. Finos de carvão da Carbonífera Criciúma .....	79
5.2. Caracterização Mineralógica .....	80
5.3. Ensaio em Mesa Mozley .....	85
5.4. Ensaio em Mesa Vibratória .....	87
5.5. Ensaio no Concentrador Centrífugo Knelson .....	88
5.6. Ensaio No <i>Multi-Gravity Separator</i> (MGS) .....	91
6. CONCLUSÕES .....	94
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96

***"O sábio não se exhibe, e por isto brilha.  
Ele não se faz notar, e por isto é notado.  
Ele não se elogia, e por isto tem mérito.  
E, porque não está competindo,  
ninguém no mundo pode competir com ele".***

**Lao Tsé**



Aos meus pais:

João de Assis Campos e Irani Maia (*in memoriam*).

À minha esposa Wânia e às minhas filhas Nathália e Andréia por procurarem entender as minhas ausências em momentos importantes de suas vidas.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor e amigo, Dr. Arthur Pinto Chaves, pela orientação do presente trabalho, pelo incentivo e pelas inúmeras sugestões apresentadas no decorrer do mesmo. E, ainda, pela iniciativa e empenho junto ao Diretor do CETEM, na época, Prof. Villas Bôas, na efetivação do Convênio USP-CETEM, o qual possibilitou a muitos profissionais desse órgão a realização dos cursos de pós-graduação da USP.

Ao Prof. Dr. Roberto C. Villas Bôas que, como diretor do CETEM na época, abraçou a idéia empenhando-se ao máximo junto ao CNPq para a efetivação do Convênio USP-CETEM.

Ao Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, pelo pioneirismo e coragem em inovar, indo ao encontro das empresas e órgãos de pesquisa, dando oportunidade a muitos dos seus profissionais de realizar os bons cursos de mestrado e doutorado na área de engenharia mineral oferecidos por essa conceituada universidade. Com isto ganha o profissional, a empresa e o País, como um todo.

Ao Dr. Fernando A. Freitas Lins, atual Diretor do CETEM, pelo apoio na continuação dos cursos de pós-graduação da USP no CETEM e pelo incentivo dado aos profissionais deste Centro para conclusão dos cursos.

Ao Dr. Adão Benvindo da Luz, Chefe da Coordenação de Tratamento de Minérios – CTM, pelo grande apoio e incentivos na realização deste trabalho.

Ao Dr. Eldon Azevedo Masini, Coordenador do LTM/PMI-EPUSP, pelo apoio e disponibilização do LTM para a realização dos ensaios no MGS.

A toda equipe da CQA, Coordenação de Química Analítica do CETEM, em especial aos técnicos Nilza Maria M. de Oliveira, Joaquim H. da Silva e Marcos Antonio Baptista, pelo esmero na realização das análises de enxofre.

Ao técnico Luis Fernando Ramos, pela colaboração e dedicação na realização dos ensaios e preparação das amostras em laboratório.

Às bibliotecárias do CETEM, pela colaboração no decorrer das pesquisas bibliográficas.

À Fátima Engel, na organização final do texto da tese.

À Priscila Dutra, pela sua colaboração em algumas partes da digitação do texto.

Ao Dr. Arnaldo Alcover, pela colaboração na caracterização mineralógica dos finos de carvão.

Ao Engenheiro Júlio César Correia pela orientação durante a digitação do texto.

Ao Engenheiro Ivan Falcão pela colaboração no escaneamento de fotos e figuras.

Ao Engenheiro Eduardo A. Carvalho, pela colaboração na realização de ensaios e confecção de fluxogramas.

À Cooperminas pelo envio das amostras ao CETEM e pela colaboração na amostragem dos finos de carvão, em seu lavador.

À Carbonífera Criciúma S.A., pelo envio de amostra ao LTM/EPUSP e colaboração na amostragem dos finos e carvão na Unidade Mineira II.

Ao Prof. Dr. Yoon, do CCMP, da Universidade do Estado de Virgínia, pelo envio de bibliografia sobre o MGS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da localização do Distrito Carbonífero de Santa Catarina .....	20
Figura 2 – Seção transversal do concentrado Knelson e princípio de seu funcionamento.....	51
Figura 3 – Influência da água de contrapressão na formação do leito de concentrado nos anéis do concentrador Knelson .....	52
Figura 4 - Foto do Concentrador Knelson de laboratório (3").....	53
Figura 5 - Jigue Centrífugo Kelsey – diagrama esquemático.....	55
Figura 6 - Foto do jigue Kelsey .....	55
Figura 7 - Esquema de separação do Concentrador Falcon.....	57
Figura 8 - Concentrador Falcon: modelo descontínuo .....	58
Figura 9 - MGS – Diagrama esquemático do modelo Mozley C902 .....	59
Figura 10 - Forma de instalação do equipamento MGS para a realização de ensaios de laboratório .....	60
Figura 11 - Ponto de coleta da amostra, em primeiro plano, e, ao fundo, o lavador da Cooperminas .....	63
Figura 12 – Equipe de amostragem, da Cooperminas e Cetem .....	64
Figura 13 - Fluxograma do procedimento adotado para caracterização da amostra de finos de carvão .....	67
Figura 14 - Mesa Mozley do CETEM .....	69
Figura 15 - Mesa vibratória Deister do CETEM.....	71
Figura 16 - Esquema de preparação das amostras para os ensaios no concentrador Knelson .....	73
Figura 17 - Esquema de preparação da amostra para ensaios no MGS e as instalações utilizadas nos ensaios do LTM .....	75
Figura 18 - Amostragem do concentrado de carvão no MGS .....	76
Figura 19 - Amostragem do concentrado piritoso no MGS .....	76

Figura 20 - Imagem (BSD/MEV) de partículas -48 + 65 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicato (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy aditivada .....	81
Figura 21 - Imagem (BSD/MEV) de partículas -100 + 150 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicato (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy .....	81
Figura 22 - Imagem (BSD/MEV) de partículas -200 + 270 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicato (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy .....	82
Figura 23 - Imagem (BSD/MEV) de partículas -400 + 635 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicato (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy .....	82
Figura 24 - Detalhe de microinclusões de pirita e silicatos em partícula de carvão .....	83
Figura 25 - Imagem (MEV/EDS) de corte aleatório em grão de carvão .....	84
Figura 26 - Mapeamento de carbono na superfície representada pela imagem da figura 24 .....	84
Figura 27 - Mapeamento de enxofre na superfície representada pela imagem da figura 24 .....	85
Figura 28 - Mapeamento de ferro na superfície representada pela imagem da figura 24 .....	85
Figura 29 - Curva de recuperação em massa (%) vs. teor de enxofre pirítico acumulado (%) obtido em mesa Mozley .....	87

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela n°</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1	Análise granulométrica e teores de enxofre e de cinzas das respectivas frações	78
2	Análise granulométrica, mostrando os valores acumulados de teores de cinzas e de enxofre total e pirítico das frações	79
3	Análise granulométrica dos finos de carvão e teores de enxofre total, pirítico e orgânico	79
4	Distribuição percentual de enxofre nas frações flutuadas e afundadas dos finos de carvão da Cooperminas	80
5	Resultados obtidos nos ensaios em mesa Mozley, (amostra da Cooperminas)	86
6	Resultados de ensaios no concentrador centrífugo Knelson com 10% de sólidos	89
7	Resultados de ensaios no concentrador centrífugo Knelson com 15% de sólidos	89
8	Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 20% de sólidos	90
9	Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 25% de sólidos	90
10	Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 30% de sólidos	90
11	Resultados de ensaios no MGS, com 12% de sólidos	91
12	Resultados de ensaios no MGS, com 15% de sólidos	92
13	Resultados de ensaios no MGS, com 20% de sólidos	92
14	Resultados de ensaios no MGS, com 23,3% de sólidos	92
15	Resultados de ensaios no MGS, com 25,5% de sólidos	92

## RESUMO

A separação de pirita fina em finos de carvão por flotação é muito difícil porque a pirita oxidada tem propriedades hidrofóbicas enérgicas, próximas das do carvão. O intercrescimento intenso da pirita nas partículas de carvão, não altera o comportamento dessas partículas na flotação. As partículas finas de pirita e carvão são difíceis de serem separadas também por métodos gravíticos convencionais.

Um novo desenvolvimento vem sendo dado pelo uso de equipamentos centrífugos. No campo centrífugo de 22 g, por exemplo, partículas de 2  $\mu\text{m}$  de diâmetro se comportam como se fossem partículas de 45  $\mu\text{m}$  de diâmetro, tornando viável a separação destas duas espécies minerais.

Foram colhidas amostras nos lavadores de carvão da Carbonífera Criciúma e da Cooperminas, em Forquilha, SC.

Estas amostras foram caracterizadas, com vistas à distribuição do enxofre ao longo da distribuição granulométrica, à liberação da pirita em relação ao carvão e aos tipos de associações existentes da pirita com o carvão. Ocorrem tanto enxofre pirítico como orgânico, distribuídos por todas as frações granulométricas. O teor de enxofre pirítico aumenta na fração -100# até +325# , embora seja elevada em todas as outras frações.

A amostra da Cooperminas, finos de carvão que não haviam sofrido nenhum tratamento anterior, foi depirítica em mesa vibratória antes de ser ensaiada no concentrador Knelson. A amostra da Carbonífera Criciúma, um concentrado de flotação, foi ensaiada no MGS - Mozley Multi Gravity Separator.

Os resultados experimentais mostraram que os dois concentradores, MGS e Knelson, os únicos que foram estudados por nós, são efetivos na remoção da pirita fina, especialmente o MGS, que é bastante seletivo.

## ABSTRACT

The separation of fine pyrite from coal fines is a very difficult task as oxidized pyrite has strong hydrophobic properties close to those of coal and due to the intense intergrowth of fine pyrite in coal particles which gives to this particles the same behaviour in froth flotation. Fine particles are also difficult to separate by conventional gravitic methods.

A new approach has been given by the use of centrifugal equipment. In the centrifugal field of 22 g, e.g., particles of 2  $\mu\text{m}$  diameter behave as particles of 45  $\mu\text{m}$  diameter, thus making separation feasible.

Samples have been taken in the Carbonífera Criciúma and Cooperminas preparation plants, at Forquilha, SC.

These samples have been characterized, in view of sulphur distribution along different sizes, its liberation and association types. There are both pyritic well as organic sulphurs. Both are widely distributed for all size fractions. The amount of pyritic sulphur increases from -100# to +325# but is also high in all fractions.

The Cooperminas sample, not treated fines, has been depyritized in shaking tables before testing in the Knelson concentrator. The Carbonífera Criciúma sample, a froth flotation concentrate, has been tested in MGS - Mozley Multi Gravity Separator.

The experimental results have shown that the MGS and Knelson concentrators (the equipment which have been tested) are effective in fine pyrite removal, with emphasis on the MGS that has shown very selective.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Iniciais

O carvão mineral é a fonte de energia mais abundante de que dispõe a humanidade. Os dados disponíveis até o final do ano de 1991 indicavam que as reservas medidas de carvão mineral atenderiam o consumo global de combustíveis fósseis por um prazo maior do que o dobro daquele que atenderiam as reservas combinadas de petróleo e gás natural. Baseando-se nas reservas conhecidas de carvão mineral no mundo, estas poderiam suprir as necessidades mundiais por quase dois séculos e meio (ALBUQUERQUE, 1995).

O carvão pode ser utilizado em praticamente todos os processos que exijam uma fonte de energia térmica, seja de forma direta, ou indireta sob a forma de gás. Assim, o carvão pode ser empregado em equipamentos tais como caldeiras, fornos industriais (cimento, calcário, cerâmica etc), secadores (minerais, cereais etc.), estufas e outros dispositivos que necessitem de uma fonte de calor. De uma forma geral, os principais usos do carvão no mundo são na geração de energia elétrica nas termoelétricas, na obtenção de coque metalúrgico para uso na siderurgia, coque de fundição ou como combustível nas indústrias e em residências. No Brasil, atualmente, as principais utilizações são nos setores: elétrico (termoelétricas), petroquímico, papel e celulose, indústrias de cimento, de alimentos, cerâmica, coque de fundição (finos) e outros, sendo que o setor elétrico tem uma participação em torno de 71% (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DO CARVÃO - SNIEC, 1995). Até setembro de 1990, a indústria carbonífera de Santa Catarina produzia também carvão metalúrgico, o qual era usado na mistura com carvões metalúrgicos importados, nas indústrias siderúrgicas brasileiras, e na fabricação do coque de fundição. A partir desse ano, com a abertura de mercado, realizada pelo governo Collor de Mello, o carvão metalúrgico deixou de ser produzido em Santa Catarina.

Com esta abertura de mercado, as siderúrgicas brasileiras passaram a importar de outros países todo o carvão metalúrgico de que necessitavam, tendo

em vista que os carvões importados são de melhor qualidade (baixos teores de cinzas e enxofre) e chegavam às siderúrgicas a um preço mais baixo que o carvão metalúrgico nacional (MACEDO et al., 1999).

Atualmente, os produtores catarinenses fornecem carvão energético graúdo (CE 4500) para as termoelétricas da GERASUL; finos – 28 malhas, representando 10% em peso do total de graúdo, para a GERASUL; e finos – 28 + 100 malhas para a COQUESUL para fabricação de coque de fundição. A fração – 100 malhas é vendida para terceiros. Estes finos – 100 malhas são beneficiados por estes terceiros, cujo beneficiamento consta basicamente de peneiramento, separação em ciclones autógenos e/ou espirais de Humphreys. Os finos de carvão abaixo de 0,6 mm estão tendo aplicação também em cerâmica (mistura com argila). Estes finos apresentam teores de cinzas da ordem de 45% e teor de enxofre entre 1,7 e 1,8% (CAMPOS, 2000).

Em termos técnicos, os principais problemas do carvão metalúrgico nacional são os seus altos teores em cinzas e enxofre, pois o mesmo possui boas propriedades coqueificantes e excelente fluidez.

O carvão mineral é uma rocha sedimentar combustível, formada a partir de vegetais, os quais sofreram soterramento e compactações sucessivas em bacias, originalmente, pouco profundas. Fatores como a pressão, a temperatura, a ação bacteriana na ausência de ar, bem como o longo tempo de atuação destes fatores sobre a matéria vegetal soterrada, não desprezando, ainda, os efeitos da tectônica, provocaram a degradação gradativa da matéria vegetal e a sua evolução para diferentes fases de carbonização do carvão. Estas fases típicas de carbonização pelas quais passou a matéria vegetal até se transformar em carvão mineral, são as seguintes: **matéria vegetal** ⇒ **turfa** ⇒ **linhito** ⇒ **carvão mineral (sub-betuminoso e betuminoso)** ⇒ **antracito** (CAMPOS, 1981; NUNES et al., 1990).

As condições em que se formou cada uma dessas fases, no processo de carbonização, vão corresponder a diferentes propriedades físicas e químicas das

mesmas, as quais irão influir na qualidade da matéria carbonosa resultante (o carvão mineral). A qualidade combustível de um carvão eleva-se à medida em que o mesmo avança na seqüência de carbonização ("rank"). O rank atingido por um determinado carvão, vai determinar a sua qualidade e a sua classificação comercial.

O rank de um carvão representa o grau de maturação ou metamorfismo a que o mesmo foi submetido durante a sua evolução na série natural de carbonização. Os diferentes tipos de carvão existentes na natureza são portanto resultados do grau de carbonização ou rank alcançado por esses carvões. Os principais parâmetros utilizados para se medir o rank de um carvão, são os seguintes: reflectância da vitrinita, poder calorífico, matérias voláteis e carbono fixo. A reflectância da vitrinita, o teor de carbono fixo e o poder calorífico aumentam à medida em que o rank do carvão aumenta.

Devido à sua própria formação, o carvão mineral não é uma substância uniforme, mas sim uma mistura de diferentes tipos de material carbonoso e matéria mineral. Os diferentes tipos de material carbonoso, normalmente aparecem no carvão em formas lamelares, os quais representam os constituintes microscópicos do carvão, prontamente identificáveis ao microscópio, chamados genericamente de macerais. Por analogia, os macerais podem ser comparados aos minerais que formam as rochas.

A matéria mineral existente nos carvões foi associada aos mesmos durante a sua formação. Os minerais que normalmente se associam aos carvões são os minerais de argila (folhelho, xisto, caulinita), carbonatos (calcita), sulfetos (pirita) e quartzo. A pirita é responsável pelo enxofre pirítico presente no carvão. Os demais minerais, após a combustão, originam um resíduo denominado "cinzas". A presença destas impurezas no carvão tem grande significado tecnológico, pois representa matéria inerte, sem valor, que pode ser responsável pela perda de poder calorífico, diminuição de produtividade dos fornos industriais, poluição atmosférica, corrosão e abrasão nos tubos das caldeiras, afetando, portanto, a sua

qualidade como combustível ou como redutor (caso do carvão metalúrgico) e, conseqüentemente, a sua comercialização.

Os tipos de impurezas e a forma como estas estão associadas ao carvão (identificados na caracterização mineralógica) normalmente indicam os prováveis processos de separação ou beneficiamento que devem ser aplicados ao carvão bruto para a remoção dessas impurezas. A escolha de um ou mais desses processos vai depender de fatores técnicos e econômicos.

Um tipo de contaminante muito comum e muito prejudicial à qualidade dos carvões, e que merece destaque, é o enxofre. A maior parte do enxofre contido nos carvões normalmente provém da pirita que vem associada aos mesmos, dando origem ao chamado enxofre pirítico. Outras formas de enxofre também são encontradas no carvão, como o enxofre orgânico e o enxofre sulfático. O enxofre sulfático é originário da oxidação da pirita. O enxofre orgânico faz parte intrínseca da matéria vegetal que deu origem ao carvão. O teor de enxofre total é a soma dos teores dos vários tipos de enxofre existentes no carvão.

A qualidade e conseqüentemente o preço do carvão no mercado consumidor dependem diretamente do teor de matéria mineral (cinzas e enxofre) existente no mesmo, sendo inversamente proporcional ao conteúdo destas impurezas; daí a necessidade de reduzir este teor ao mínimo possível, técnica e economicamente. Esta redução é feita através das diferentes técnicas de preparação e beneficiamento.

A redução do teor de enxofre, nos processos de beneficiamento, é feita através do descarte da pirita contida no carvão, pela utilização dos métodos de concentração gravítica ou físico-químicos (flotação), tendo em vista que o enxofre orgânico não é passível de ser removido por estas técnicas, permanecendo, portanto, no produto final. O enxofre sulfático, que normalmente se apresenta com teor baixo (~ 0,02%), é solúvel na água e sai junto com esta, nos processos de beneficiamento a úmido, que são os mais usuais no beneficiamento dos carvões. Nos processos de beneficiamento de carvões, procura-se concentrar a matéria

carbonosa num produto (carvão vendável) e a matéria mineral no outro produto (rejeito) (CAMPOS, 1981).

Os recursos identificados de carvão mineral no Brasil (reservas medida + indicada + inferida + reservas marginais), expressos em camada de carvão (exclui a parte estéril intercalada), estão localizados no sul do Brasil, e somam, atualmente, 32,3 bilhões de toneladas que correspondem a 2,5 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo. Esta cifra caracteriza o carvão mineral como o combustível fóssil mais abundante no Brasil, com uma participação de mais de 50%, em relação às outras fontes energéticas não renováveis (VILELA, 1994; INFORMATIVO ANUAL DA INDÚSTRIA CARBONÍFERA, 1999).

A despeito da magnitude dessas reservas, a mineração e o beneficiamento do carvão no Brasil não ocupam um espaço de maior destaque no atual quadro da indústria mineral do País. E a participação do carvão mineral brasileiro na matriz energética nacional também é, ainda, muito pequena, menos de 3%. Em termos de produção de energia primária, a contribuição do carvão mineral (metalúrgico + energético) foi de 1,3% (0,1 + 1,2, respectivamente, em 1993 (CARVALHO, 1985; BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, MME, 1999).

O Brasil tem sua matriz energética concentrada principalmente na energia hidráulica. Ao contrário de outros países, onde a indústria siderúrgica e a geração de termoelectricidade contribuíram de modo marcante para o desenvolvimento da indústria carbonífera, no Brasil, o grande o grande potencial hidrelétrico e o uso do carvão metalúrgico nacional que era adicionado a 80% do carvão metalúrgico importado é que determinaram um padrão de desenvolvimento dessa indústria. A termoelectricidade responde por apenas 1,5% do total da energia ofertada no País. Na Espanha, Alemanha e Estados Unidos, o uso da energia elétrica proveniente do carvão está na faixa de 45 a 78%. O mercado nacional de carvão, no início, foi direcionado para o carvão tipo metalúrgico, de forma a complementar a demanda existente no setor siderúrgico. Para cada tonelada de carvão metalúrgico produzida, produzia – se 1,5 toneladas de carvão energético (carvão vapor). Com

isto, o estoque de carvão energético aumentava a cada ano, mesmo depois do 1º choque do petróleo, no período de 73 a 79 (CARVALHO, 1985; MINING ENGINEERING, 1995; REVISTA BRASIL MINERAL, 1997).

As reservas brasileiras que constituem as reservas explotáveis de carvão mineral, estão todas localizadas na bacia sedimentar do Paraná, distribuídas, notadamente, pelos Estados do Rio Grande do Sul (89%), Santa Catarina (10,7%) e Paraná (0,3%). No Estado de São Paulo não existe atualmente nenhuma atividade minerária. A reserva de carvão mineral neste Estado é incipiente, da ordem de 0,03% (CHAVES, 1992; SNIEC, 1995).

As reservas de carvão do Rio Grande do Sul são, praticamente, só de carvão energético, utilizado, principalmente, em termoelétricas na geração de energia elétrica, petroquímica, papel e celulose, indústrias de cimento e alimentos (SNIEC, 1995). Foram descobertas também neste Estado, reservas de carvão com características coqueificantes nas regiões de Morungava, Santa Terezinha e Chico Lomã, cujas recuperações em massa de carvão metalúrgico com 18,5% de cinzas, se mostraram superiores (entre 40 e 70%) àquela verificada na camada Barro Branco, em Santa Catarina, a qual é da ordem de 15%, em relação ao ROM. Estas reservas de carvão não chegaram a ser explotadas para produção de carvão metalúrgico por se mostrarem antieconômicas, na época, devido principalmente estarem localizadas a grandes profundidades.

Os carvões do Paraná são utilizados, principalmente, nos setores de papel e celulose (Klabin), geração de energia elétrica, na Companhia Paranaense de Energia Elétrica (Copel) e indústrias de cimento. Em comparação com os carvões dos Estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, os carvões do Paraná são facilmente beneficiáveis. Em termos de cinzas, conseguem-se altas recuperações (cerca de 60%), com teores da ordem de 20%. O problema maior é o seu alto teor de enxofre, na faixa de 8 a 10%, no ROM, com grande participação de enxofre orgânico.

Em Santa Catarina é onde estão localizadas as reservas explotáveis de carvão coqueificável no Brasil (camada Barro Branco). Através do beneficiamento do carvão desta camada torna-se possível a obtenção de uma fração de carvão metalúrgico e frações de carvões energéticos. Além de carvão metalúrgico e de carvão energético, em Santa Catarina também é produzido o carvão antracitoso. As aplicações para este tipo de carvão, são em fornos elétricos, carvão para filtros e carvão ativado. Através do beneficiamento do carvão da camada Barro Branco, conseguem-se, em média, produtos com menores teores de cinzas em relação aos carvões do Rio Grande do Sul. Em relação ao teor de enxofre, este se apresenta com valores intermediários entre os carvões do Paraná e Rio Grande do Sul, em torno de 4,0%, no ROM. As principais utilizações dos carvões de Santa Catarina são nos setores elétrico, cimenteiro, de alimentos e cerâmico (RÚBIO, 1988; SNIEC, 1995).

Em termos de qualidade, os carvões brasileiros apresentam, do norte para o sul, uma diminuição do teor de enxofre e um acréscimo no conteúdo de matéria mineral (cinzas). No Estado do Paraná, o teor médio de enxofre é de 10%, enquanto que o teor de cinzas fica em torno de 36%. Mais ao sul, em Santa Catarina, o teor médio de enxofre é de 4% e o de cinzas é de 46%. O teor de enxofre nos carvões de Santa Catarina não é uniforme; o carvão das regiões de Lauro Müller apresenta teores mais altos de enxofre, em relação aos carvões das regiões de Criciúma, Içara e Forquilha, que apresentam teores mais baixos deste contaminante (NÓVOA, 1970). Finalmente, o carvão extraído no Rio Grande do Sul, possui um teor médio de enxofre de 1,5% e de cinzas de 52% (RÚBIO, 1988).

Em termos mundiais, a demanda por carvão cresceu em 1997, tanto para carvão metalúrgico quanto para carvão energético, particularmente no continente asiático e América do Norte. O comércio internacional vem crescendo nestes últimos anos. A maioria da produção do carvão continua sendo consumida nos próprios países produtores. Os maiores países consumidores são os da Ásia (no lado do Pacífico) e América do Norte. Estes respondem pelo consumo de 70% da

produção mundial. A China continua sendo o maior produtor e consumidor de carvão do planeta. Em 1997, a sua produção foi de 1,36 bilhões de toneladas. Os Estados Unidos são o segundo maior produtor mundial, com 987 milhões de toneladas, em 1997. A Austrália é o líder mundial das exportações, com 158 milhões de toneladas, em 1997, sendo 74 milhões de carvão energético e 84 milhões de carvão de carvão metalúrgico. A Austrália é também o terceiro maior produtor mundial de carvão. O Japão é o principal país importador. Em 1997, importou 129 milhões de toneladas, suprimindo 95% das suas necessidades (SUMÁRIO MINERAL, 1998).

## **1.2.Histórico**

O carvão catarinense tem uma história escrita “aos saltos”. Desde a origem de sua exploração econômica, teve a sua comercialização atrelada a decisões governamentais. Muitas idéias e muitos projetos marcaram a sua trajetória. Alguns colocados em prática, outros interrompidos ou relegados ao esquecimento (VILELA, 1994).

A exploração do carvão em Santa Catarina vem sendo feita desde o século passado, embora naquela época realizada de uma forma precária e rudimentar. O carvão catarinense foi descoberto, em 1822, por tropeiros que desciam a serra do “12”, em direção a Laguna, sendo que os primeiros trabalhos de exploração em Santa Catarina ocorreram na região de Lauro Müller. Há, também registros de exploração de carvão nas nascentes do rio Túbarão, por volta de 1830, desconhecendo-se, porém, as quantidades lavradas. Após estas descobertas, várias expedições foram enviadas à região, com a finalidade de estudar a qualidade e viabilidade econômica do carvão catarinense. Várias tentativas foram feitas, visando uma exploração mais intensa do carvão, mas estas não foram bem sucedidas, devido, principalmente, a problemas de distância da mina aos escoadouros, falta de recursos e demora, por parte do governo, na liberação da concessão de lavra. Em 1876, o Visconde de Barbacena conseguiu dar início a alguns trabalhos de mineração. Entretanto, até 1884, houve apenas algumas



pequenas produções sem maiores controles, com extração totalmente manual, sendo que o transporte ainda era feito por “carros de boi”, até as margens do Rio Tubarão, seguindo então, por canoas, até Laguna (NUNES et al., 1990; MILIOLI, 1981a).

Em 30 de setembro de 1884, visando contornar o problema do transporte do carvão, entrou em operação “The Donna Thereza Christina Railway Co.”, com o trecho ferroviário ligando Lauro Müller (antiga Minas) a Imbituba, com um ramal de bifurcação para Laguna. No início, a principal finalidade desta Estrada de Ferro era a de transportar o carvão que seria produzido pela “The Tubarão Coal Mining Company”. A essa época, entretanto, a lavra de carvão continuava manual e o beneficiamento, quando muito, utilizava as chamadas “escolhedeiras”, que eram geralmente mulheres fazendo catação manual, separando o carvão da pedra (estéril). O carvão produzido destinava-se, basicamente, ao consumo de navios, pois as locomotivas ainda utilizavam lenha para alimentar as suas caldeiras (MILIOLI, 1981b; PIRES, 1990).

Em 1913, foi encontrado carvão no município de Criciúma. Durante a 1ª Guerra Mundial, devido ao impedimento da importação do carvão europeu para atender às empresas nacionais de iluminação, gás e ferrovias, a exploração do carvão brasileiro foi incentivada. Em 1918, foi realizada a abertura do ramal ligando Tubarão a Criciúma e a Estrada de Ferro Dona Teresa Cristina começou assumir a sua finalidade específica, ou seja, a de transportar o carvão mineral produzido em Santa Catarina (MILIOLI, 1981a; PIRES, 1990).

Apesar de não terem havido maiores destaques na indústria carbonífera, o carvão já começava a ter uma certa influência no contexto nacional; prova disto foi a realização do “Primeiro Congresso Brasileiro de Carvão e outros Combustíveis Nacionais”, realizado no Rio de Janeiro, de 22 de outubro a 8 de novembro de 1922, cujas recomendações principais foram: intensificar as pesquisas, usar álcool como combustível, construir novas ferrovias etc. Apesar disto, a produção do carvão em Santa Catarina permaneceu ainda por longo tempo com quase a mesma estrutura precária, ocorrendo apenas algumas construções de ramais

ferroviários, como o ramal Tubarão – Araranguá, da então já existente Estrada de Ferro Dona Teresa Cristina e posteriormente, dos ramais Esplanada – Urussanga e Criciúma – Rio Deserto (MILIOLI, 1981b).

A 1ª Guerra Mundial marca o fim do 1º ciclo do carvão. A partir daí, partiu-se para uma exploração mais intensa desse bem mineral. Por esta época, o industrial Henrique Lage adquiriu a Firma Falida do Visconde de Barbacena, e criou a firma Lage e Irmãos. Com as construções do Porto de Imbituba e alguns lavadores de carvão e com a criação de mais mercados para o carvão, ia sendo estruturada, pouco a pouco, a base da indústria carbonífera catarinense (NUNES et al., 1990).

Em 1931 e 1937, foram elaboradas as primeiras leis, em âmbito federal, que obrigavam o consumo de 10% e 20%, respectivamente, do carvão nacional pelas indústrias brasileiras. Este acontecimento, somado com a tensão européia e, um pouco mais tarde, com o advento da 2ª Guerra Mundial, proporcionaram um significativo aumento da produção nacional de carvão, entre 335 e 545%, bem como de sua rentabilidade. Paralelamente, ocorrem as melhorias nos setores ferroviário e portuário (NUNES et al., 1990).

Após a 2ª Guerra, esta produção só se manteve equilibrada com a inauguração, em 1945, da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda-RJ. Este complexo siderúrgico implantado pelo governo federal previa utilizar, como uma das matérias primas, o carvão coqueificável de Santa Catarina. Para tal fim, foi implantado o “Setor de Santa Catarina” da CSN, composto de mineração (em Siderópolis) e lavador de carvão e termoelétrica localizados no bairro de Capivari, em Tubarão-SC. Para a produção de carvão metalúrgico, entrou em operação, neste mesmo ano, o Lavador de Capivari, da CSN. Este Lavador foi planejado por “The McNally Pittsburgh Corporation” e instalado a 6 km da cidade de Tubarão, para produzir carvão metalúrgico principalmente para as coquearias da CSN e carvão vapor grosso para locomotivas e navios. Esta localização do Lavador de Capivari foi escolhida por ser o ponto de encontro dos ramais da Estrada de Ferro Dona Teresa Cristina, provenientes de três grandes

zonas produtoras de carvão: Lauro Müller, Urussanga e Criciúma, que distam de 50 a 70 km de Tubarão. E ainda, Tubarão dista 50 km do porto de Imbituba (NÓVOA, 1971).

Com estas medidas surgiu um novo e importante mercado para o carvão de Santa Catarina, que era o mercado do carvão metalúrgico, um produto valioso que pode ser obtido do carvão da camada Barro Branco, através do beneficiamento. A decisão governamental era a de abastecer a coqueria da CSN com até 50% de carvão metalúrgico nacional. A partir desse ano, as atenções se voltaram para o desenvolvimento da indústria carbonífera do Estado de Santa Catarina, onde se localizavam as únicas jazidas conhecidas de carvão com características coqueificantes.

Com o objetivo estratégico de suprir a indústria siderúrgica com uma parcela de carvão metalúrgico nacional e dar utilização aos crescentes estoques de carvão vapor gerado nos processos de beneficiamento, foi criado o Plano do Carvão Nacional, pela Lei nº 1.886, de 11.06.1953, com a finalidade de: "conjugando as atividades de produção, beneficiamento e distribuição do carvão nacional, a fim de ampliar a sua produção, regularizar o seu fornecimento, reduzir preço e aproveitar melhor as suas potencialidades energéticas" (ALBUQUERQUE, 1995).

Para cumprir melhor tal objetivo, foi criada a Comissão Executiva do Plano do Carvão Nacional - CEPCAN, que funcionou até 31.12.60. Nesta data, a CEPCAN foi substituída em suas atribuições pela Comissão do Plano do Carvão Nacional - CPCAN, com personalidade jurídica e autonomia administrativa e financeira, com existência limitada a 31.12.70.

Dentro do planejamento da CPCAN, sempre se procurou equacionar a produção de carvão metalúrgico com a produção de carvão vapor, pois não havia mercado para todo o carvão vapor que fosse produzido. Devido a isso, no começo da década de 60, as atenções se voltaram para a criação de mercado para o carvão vapor produzido. Foram, então, projetadas as novas caldeiras da Sociedade Termelétrica de Capivari - Sotelca (VILELA, 1994).

A atuação da CPCAN, compreendia todo o ciclo econômico do carvão, abrangendo as atividades de pesquisa, lavra, beneficiamento, transporte, distribuição e consumo do combustível nacional. Desta forma, ampliava-se, cada vez mais, a intervenção estatal em todo o setor carbonífero. A produção de carvão bruto, que atingira 2 milhões t/a em 1947 e 2,2 milhões t/a em 1960, chegou a 2,7 milhões t/a em 1965, estabilizando-se até 1975.

No período de 1953 a 1970, com maior apoio do governo, várias iniciativas de âmbito nacional foram tomadas para ampliar o uso do carvão nacional na geração de energia elétrica, buscar novos mercados, utilizar melhor os subprodutos do beneficiamento e melhorar a economicidade da indústria carbonífera como um todo. Entre essas iniciativas, merecem ser destacadas, as seguintes (ALBUQUERQUE et al., 1995):

- início da implantação do Complexo Termoelétrico “Jorge Lacerda”, em Santa Catarina, para absorver os subprodutos (carvões energéticos) da produção de carvão metalúrgico no Lavador de Capivari.
- início da implantação das Centrais termoelétricas de Candiota, no Rio Grande do Sul (CEEE), para o aproveitamento das enormes jazidas de carvão de Candiota, no sul do Estado, mineráveis a céu-aberto.
- construção das usinas termoelétricas de Figueira (COPEL), no Paraná, e de Charqueadas, no Rio Grande do Sul;
- implantação da Aços Finos Piratini, em Charqueadas – RS, para utilização de carvão com 35% de cinzas, produzido nesta região, no processo de redução direta do minério de ferro;
- projeto da Indústria Carboquímica Catarinense – ICC, destinada a aproveitar os rejeitos piritosos do processamento do carvão catarinense para a produção de ácido sulfúrico e ácido fosfórico; e
- busca de maior economicidade na mineração de carvão, pela economia de escala, concentrando a extração em unidades relativamente maiores, mecanizando e racionalizando a produção.

Com a extinção da CPCAN, em dezembro de 1970, a maior parte das suas tarefas foi atribuída ao Conselho Nacional do Petróleo - CNP, pelo Decreto-Lei nº 67.812, de 14.12.70. Entre outras atribuições, coube ao CNP estabelecer as especificações e os preços dos diversos tipos de carvão postos à disposição do mercado, determinar cotas de produção, autorizar importações do produto, repassar subsídios ao transporte e ao consumo e atuar decisivamente na ponta da comercialização.

Em 1973, aconteceu a primeira a crise do petróleo. O impulso inicial de ajuste que se seguiu a este primeiro choque do petróleo, traduziu – se, a nível mundial, na busca de fontes alternativas de energia e dentre elas, o carvão mineral teve um papel de importância relevante. Esta tendência mundial também se verificou no Brasil e não podia ser de outra maneira, pois nessa época o Brasil tinha uma dependência muito maior do petróleo importado do que atualmente. Com isso, as atenções se voltaram para o carvão, onde um intenso programa de pesquisa mineral foi implantado pelo governo, o qual elevou o somatório das reservas de carvão (medidas + indicadas + inferidas) de 3,2 para 23,0 bilhões de toneladas, no período 1974 a 1982. No início desse período, em 1975, foi criada a CAEEB – Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras, que passou a atuar como executora da política dos carvões energéticos estabelecida pelo CNP. A CAEEB operou em todas as etapas de comercialização do carvão, criando entrepostos e estoques reguladores em várias regiões do País, chegando à situação de detentora do monopólio do comércio de carvão energético em todo o território nacional.

Em 1979, ocorreu a segunda crise do petróleo, provocando dificuldades na balança comercial brasileira, causadas pelos crescentes aumentos de preço deste combustível no mercado internacional. Devido a isso, o governo federal, no início da década de 80, se mobilizou no sentido de desenvolver no País fontes alternativas de energia para substituir derivados de petróleo de alto consumo na indústria brasileira, como o óleo combustível. As principais alternativas propostas foram a produção de álcool como substituto da gasolina e um maior uso do carvão

nacional, em substituição ao óleo combustível utilizado no setor industrial. Merece destacar que, em 1980, com uma capacidade instalada de 482 MWh, o complexo termoelétrico de Jorge Lacerda transforma – se no maior complexo termoelétrico da América Latina

Para concretizar o desenvolvimento das fontes alternativas de energia, foi criado, então, pelo governo federal, o Programa de Mobilização Energética – PME, através do Decreto Lei nº 1691, de 02/04/79. A meta do PME era substituir por fontes alternativas de energia, o equivalente a 170 mil barris de petróleo/dia, até 1985. Esta foi uma meta bastante ambiciosa, impossível de ser atingida, principalmente pela falta de infra-estrutura de transportes rodoviário, ferroviário e mesmo portuária para o transporte do carvão.

O PME estimulou o consumo do carvão nacional, em substituição aos derivados de petróleo, mediante os mecanismos de financiamentos favorecidos para projetos, desde a produção até o consumo do carvão, além da concessão de subsídios ao transporte e ao consumo. Coube à CAEEB, então, administrar estes mecanismos de financiamento e de subsídios.

Em razão dos financiamentos favorecidos pelo governo e dos subsídios ao transporte e consumo do carvão, o mercado consumidor sofreu profundas transformações, ampliando-se o consumo do carvão em termoelétricas, além de outros consumidores de grande potencial que foram sendo incorporados, com destaques para os setores de cimento, papel e celulose, petroquímica e alimentos.

Com isto, a produção nacional de carvão vendável chegou a 5 milhões de toneladas/ano, em 1981, a 6 milhões de toneladas/ano, em 1982, e a 7 milhões de toneladas/ano, em 1984. A produção atingiu o máximo em 1985, com 24,6 milhões de toneladas brutas, correspondentes a 7,6 milhões de toneladas de carvão beneficiado. O maior consumo porém, aconteceu em 1986, quando o mesmo atingiu a 8,2 milhões de toneladas de carvão beneficiado.

O consumo de carvão na indústria de cimento que foi de 320 mil toneladas em 1979, alcançou a 2.1 milhões de toneladas em 1983, representando um acréscimo percentual de 652% em quatro anos (CARVALHO, 1985).

O programa implantado pelo governo federal teve sucessos, mas também, falhas. Os tecnocratas, por não serem da área, não atentaram para o fato de que um barril de petróleo não fornece apenas gasolina e óleo combustível. Por isso, seria necessário continuar importando o mesmo barril para destilar o óleo diesel, necessário para o transporte rodoviário. Com isto, o Brasil tornou-se um exportador do excedente de gasolina de baixa qualidade, e o fazia a preço baixo, devido às dificuldades de colocá-la no mercado internacional (CHAVES, 1992).

A partir de 1987, produção e consumo do carvão nacional começaram a cair. A produção de carvão vendável ou beneficiado passou de 7 milhões de toneladas, em 1987, para menos de 5 milhões de toneladas/ano, nos anos de 1990, 1991 e 1992. De 1996 até 1999, a produção ficou estabilizada em torno de 5 milhões de toneladas / ano (ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 1999).

Em termos mundiais, a participação do carvão mineral na indústria, de um modo geral, também decresceu. O consumo mundial de energia primária foi superior a 60% em relação às outras fontes energéticas, até 1950, caindo gradativamente a pouco mais de 30% nos anos 80 e atingindo 28% em 1991. Com a queda do preço do petróleo, este e o gás natural foram deslocando o uso do carvão mineral, dadas as vantagens oferecidas por estes combustíveis, em termos do preço, disponibilidade e facilidade de manuseio.

Nesta mesma época, começam a ocorrer maiores exigências no cumprimento das leis ambientais e de segurança e higiene no trabalho, por parte dos órgãos federais, principalmente nos países desenvolvidos. Com isto, o preço de extração do carvão mineral foi sendo muito onerado em alguns países, como na Alemanha, que passou, de uma forma planejada, a diminuir a cada ano a sua produção de carvão e a complementar a sua demanda interna comprando carvão

de outros países, como a África do Sul. O preço desse carvão importado chegava a ser de 30 a 40% do preço do carvão que era produzido na Alemanha.

Em julho de 1988, foi suspenso qualquer subsídio ao carvão e foi iniciado o processo de extinção da CAEEB. Ao estabelecer a equivalência de 80% do preço do óleo combustível, o governo previa um sistema auto-sustentado de comercialização direta, mantendo-se assim o raio de ação do carvão no mercado industrial, especialmente o cimenteiro, conquistado ao longo da década. Porém a política irreal de preços aplicada ao óleo combustível (também subsidiado), usada para impedir a escalada inflacionária, tornou inviável a manutenção do sistema, obrigando o produtor a reduzir o seu preço "fob" mina, de modo a manter o "cif" do carvão, atrativo ao consumidor.

Segundo CARVALHO, 1985, que realizou, na época, um estudo econômico sobre o carvão mineral nacional, a política de subsídios praticada pelo governo em favor do carvão mineral, no período de influência das duas crises do petróleo, foi de pouca eficácia, principalmente da forma como foi feita, ou seja, com a adoção concomitante de duplo subsídio, ou seja, ao carvão e ao óleo combustível. Isto confundiu e retardou o mercado no sentido da substituição deste derivado do petróleo pelo carvão mineral nacional nas indústrias brasileiras, principalmente em relação à sua aplicação na indústria cimenteira.

Na fase de transição, de 1989 a meados de 1990, observa-se um decréscimo de compra de carvão energético pelo setor cimenteiro, principalmente pelas fábricas mais distantes da região produtora, casos de Minas Gerais e Estados do nordeste. O setor de cimento, que chegou a consumir cerca de 2,2 milhões de toneladas de carvão em 1987, reduziu para cerca de 1,0 milhão nos anos 1989, 1990 e 1991 (VILELA, 1994).

Esta queda na produção e consumo do carvão nacional foi provocada, em parte, pela sua substituição parcial pelo produto importado e também pela queda do preço do petróleo no mercado internacional. Porém, a substituição do carvão nacional pelo produto importado intensificou-se a partir de setembro de 1990,



quando foi decretada a total desregulamentação do setor carbonífero, pelo Ministério da Infra-estrutura, através da Portaria nº 801, de 14 de setembro de 1990, no governo Collor de Mello. A partir desta data, o carvão nacional passou a disputar seu espaço num regime de livre mercado, depois de seis décadas de proteção governamental.

O Estado mais atingido com esta Portaria foi o de Santa Catarina com a perda do mercado do carvão metalúrgico (cerca de 700 mil toneladas/ano). Com o fim da compulsoriedade da compra do carvão metalúrgico nacional por parte das usinas siderúrgicas brasileiras, estas passaram, de imediato, a importar todo o carvão metalúrgico que precisavam, devido às vantagens oferecidas, em termos de qualidade, custo e alíquota de importação zero. Isto provocou a demissão, quase que da noite para o dia, de mais de 50% do efetivo de trabalhadores do setor, incluindo a mineração, a RFFSA, o Lavador de Capivari, Porto de Imbituba, a ICC e outros segmentos envolvidos direta ou indiretamente com essas atividades, pois sem a ajuda do governo brasileiro, tornou-se inviável competir com o carvão metalúrgico importado. Para efeito de comparação, em 1984, a indústria carbonífera empregava cerca de 11.000 trabalhadores; em 1993 esta cifra já caía para 3.600 pessoas (VILELA, 1994; REVISTA BRASIL MINERAL, 1997).

Devido a isto, o setor carbonífero catarinense, que produziu, em média, 400 mil toneladas de carvão vendável no biênio 1985/1986, em outubro de 1994 já não passou de 160 mil toneladas/mês, com a conseqüente redução de cerca de 5.000 postos diretos de trabalho (VILELA, 1994).

Lamentavelmente, quando o Governo Federal decidiu não mais amparar o setor carbonífero, não o fez por meio de um planejamento a médio ou longo prazo, que atentasse pelo menos para o aspecto social, tal como foi feito em outros países, como a Alemanha, onde os mineradores de carvão e principalmente os seus filhos foram se adaptando, aos poucos, à nova realidade do setor carbonífero, procurando outros empregos.

Sem o mercado do carvão metalúrgico, o Lavador de Capivari perdeu a sua função e foi desativado e as empresas carboníferas passaram a produzir, nos seus sistemas de beneficiamento, os carvões energéticos CE 4500 e CE 5200 (4500 e 5200 Kcal / kg, respectivamente) para os consumos em termoelétricas e indústria cimenteira, respectivamente. Atualmente, o setor termoelétrico é o que mais absorve os diferentes tipos de carvões energéticos produzidos no sul do Brasil.

Em termos de divisas, a importação de carvão metalúrgico representa, atualmente, um dos principais itens do déficit comercial brasileiro.

Deve-se ressaltar também que a maioria dos empresários do setor carbonífero catarinense, acostumada com os subsídios e outras ajudas políticas do governo, não tinha por hábito investir em tecnologia. Muitos desses empresários se esquivavam, não mostrando interesse nem ao menos em testar e/ou implantar pesquisas realizadas, com sucesso, por órgãos do governo, como muitas daquelas desenvolvidas pelo próprio DNPM/CETEM, e por outros centros de pesquisa e universidades. Esses empresários achavam que a ajuda do governo continuaria para sempre e que eles não precisariam preocupar em melhorar a tecnologia de processamento do seu lavador ou mesmo a qualidade dos produtos obtidos nos mesmos. Algumas exceções a este tipo de comportamento dos empresários do carvão de Santa Catarina podem ser citadas entre algumas das empresas do grupo B (não pertencentes ao governo), tais como a Carbonífera Criciúma, Cooperminas (antiga CBCA), Metropolitana e algumas outras. A Cooperminas, com a falência do grupo Catão, foi assumida pelos seus funcionários, os quais, liderados pelo engenheiro de minas Carlyle T. Bezerra de Menezes, que era o diretor técnico na época, apostaram no setor e mantiveram a empresa em atividade. Apesar das dificuldades encontradas, conseguiram superar a crise, com a implantação de um bom gerenciamento financeiro da empresa e busca de melhorias de qualidade dos seus produtos. A empresa funcionou por muitos anos como "Massa Falida da CBCA" até regularizar a sua situação como uma nova empresa (Cooperminas), em 1998. Atualmente é

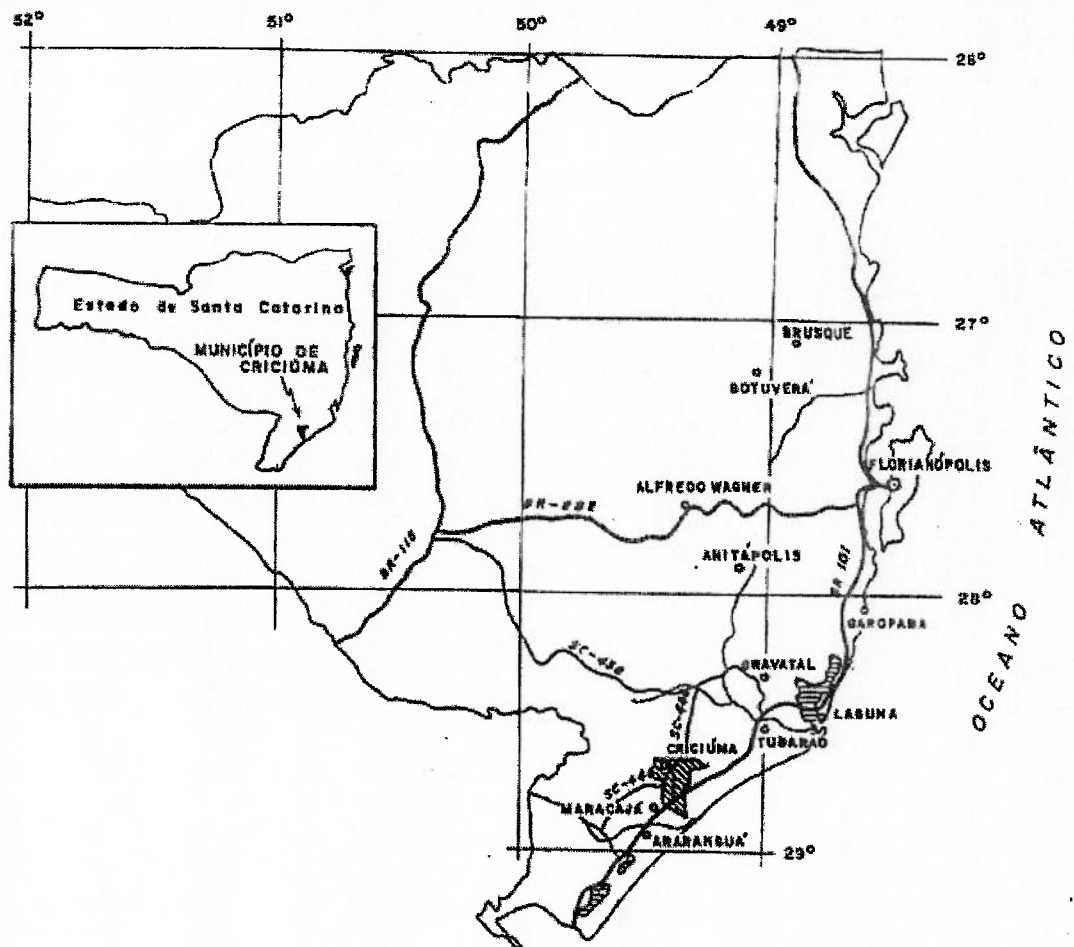
uma das empresas que apresenta um bom desempenho nas suas atividades e boa estabilidade, com um quadro composto de mais de 400 funcionários (INFORMATIVO ANUAL DA INDÚSTRIA CARBONÍFERA, 1999).

### 1.3. Carvão Catarinense

A bacia carbonífera de Santa Catarina está localizada a SW do Estado. Ela possui um comprimento de 95 km e uma largura média de 20 km, compreendida na área delimitada pelas coordenadas 28° 11' a 29° 03' de latitude S e, 49° 10' a 49° 37' de longitude W (Figura 1).

Os recursos de carvão mineral identificados em Santa Catarina, são de aproximadamente 2,3 bilhões de toneladas, com a camada Barro Branco participando com cerca de 1 bilhão de toneladas. Durante todo o período de produção de carvão metalúrgico no estado de Santa Catarina, a camada Barro Branco foi a única fonte de extração desse tipo de carvão, abrangendo os municípios de Criciúma, Içara, Siderópolis, Urussanga e Lauro Müller.

De acordo com o seu rendimento em carvão metalúrgico, a bacia carbonífera de Santa Catarina, apesar da uniformidade apresentada pela "camada Barro Branco", foi dividida em regiões, quais sejam: região de alto metalúrgico "aba leste" e médio e baixo metalúrgico "aba oeste". A região de alto metalúrgico é constituída pelas regiões de Içara, Criciúma, Urussanga e Lauro Müller. Esta região de alto metalúrgico é caracterizada por apresentar, no beneficiamento, uma produção de carvão metalúrgico bem superior à de carvão vapor. A região de médio e baixo metalúrgico é definida pela produção de carvão metalúrgico da mesma ordem da de carvão vapor. Ela é constituída pelas regiões de Sangão, Rio Maina e Siderópolis (CHAVES, 1992; NÓVOA, 1994).



**Figura 1 – Mapa de localização do Distrito Carbonífero de Santa Catarina**

Existem outras camadas de carvão no estado de Santa Catarina, como as camadas Irapuá e Bonito. A camada Irapuá aflorava em alguns pontos e era minerada junto com a camada Barro Branco. A camada Bonito é constituída praticamente só de carvão energético e começou a ser minerada recentemente por algumas mineradoras. Porém a mineração de carvão em Santa Catarina, até a década de 90, praticamente, se baseou no carvão da camada Barro Branco, a única cuja ocorrência é generalizada por toda a bacia carbonífera, com espessura média total de 1,80 m. Esta camada é constituída de três partes:

- forro – essencialmente carvão com nódulos de pirita e matéria mineral disseminada na matéria carbonosa. Espessura: 10 a 40 cm.

- quadração – conjunto de camadas finas de carvão, geralmente 5, alternando com camadas de xisto, com predominância deste; a última camada é um siltito denominado Barro Branco, o qual deu nome à camada. Espessura: cerca de 1 m.
- banco – conjunto de camadas de carvão, geralmente 5, alternando com camadas finas de xisto, predominando o carvão. Espessura: cerca de 50 cm.

Até 1960, a grande maioria das minas fazia a mineração seletiva, ou seja, as veias ou lentes de carvão eram separadas do xisto (folhelho) na própria mina; esta mineração dava origem a um carvão chamado “carvão lavador” com cerca de 34% de cinzas e 8% de enxofre. Este carvão era enviado, por via férrea, ao Lavador Central de Capivari, onde o seu beneficiamento gerava dois tipos de rejeito: primário com 30 a 35 de enxofre e secundário com 15 a 20% de enxofre; posteriormente passou – se a produzir um único refugo com 20 a 25% de enxofre (NÓVOA, 1970).

A partir de 1961, a mineração seletiva foi sendo abandonada e começou a ser implantada a lavra mecanizada, do conjunto forro e banco, incluindo cerca de 20% de quadração. Com estas mudanças no sistema de lavra, o produto minerado (carvão bruto) passou a conter de 60 a 65% de estéril, o que tornava o seu transporte até o Lavador de Capivari antieconômico. Devido a isto, o carvão passou a ter dois estágios de beneficiamento: uma pré – lavagem, em lavadores instalados junto às minas, e a lavagem ou beneficiamento final, no Lavador Central de Capivari.

Os pré-lavadores eram constituídos à base de jigues (tipo Baum). Nesta pré-lavagem produzia-se um carvão com 28 a 32% de cinzas, chamado “carvão pré-lavado”, também conhecido como CPL, e dois rejeitos: o piritoso, que concentra a maior parte da pirita, e o xistoso, que concentra principalmente o xisto (folhelho). O CPL, com recuperação entre 30 e 35%, em relação ao carvão bruto, é que passou então a ser enviado ao Lavador de Capivari. A partir de 1967, todas

as minerações passaram a fazer esta pré-lavagem do carvão nas bocas das minas e enviar o CPL para o Lavador de Capivari para o beneficiamento final do carvão (NÓVOA, 1970 e 1971; e NUNES, 1990).

A pré-lavagem do carvão bruto para produção do CPL, conduzida em jigues, praticamente removia todo o material estéril existente no carvão catarinense, através desse método simples e barato de beneficiamento. Esta pré-lavagem tinha, então, por objetivo a separação da grande parte de impurezas que acompanhava o carvão bruto, ou sejam, folhelhos carbonosos (xisto), siltitos, pirita e outros. As operações unitárias utilizadas na pré – lavagem eram: britagem, peneiramento, jigagem e flotação (para os finos). Nesta de pré – lavagem, eram obtidos, então, os seguintes produtos, especificamente:

- carvão pré-lavado (CPL), com 28 a 32% de cinzas e 2,0 a 3,0% de enxofre;
- rejeito piritoso com teor de enxofre de 7,0 a 11%;
- rejeito xistoso ( folhelhos e siltitos) com 75% de cinzas; e
- carvão fino, beneficiado na boca da mina, através principalmente de ciclonação, mesagem e flotação.

Os rejeitos xistoso e piritoso produzidos nos jigues dos pré-lavadores foram depositados, durante várias décadas, próximo aos lavadores, causando enorme impacto ambiental, principalmente devido à presença da pirita nas pilhas desses rejeitos. Este passivo ambiental até hoje causa danos à região carbonífera de Santa Catarina. Atualmente muitos projetos da área ambiental estão sendo discutidos entre mineradores, órgãos ambientais e entidades executoras e ONGs, visando solucionar ou pelo menos amenizar o problema.

Na década de 80, parte do rejeito piritoso produzido nos pré-lavadores, contendo cerca de 7% de enxofre, era destinado à unidade de concentração de pirita, pertencente à ICC (Indústria Carboquímica Catarinense), em Criciúma, SC, onde esse rejeito era rebeneficiado. Esta unidade de concentração de pirita, à base de um jigue Batac, produzia um concentrado piritoso com 44% de enxofre

que, por sua vez, era destinado à produção de ácido sulfúrico na ICC, em Imbituba – SC.

Nesta unidade de concentração de pirita conseguia – se ainda, recuperar 10%, em massa, de carvão que era vendido de volta aos mineradores. Isto mostra que os jigues dos pré – lavadores poderiam ser melhor operados, visando uma maior eficiência operacional, pois no concentrado piritoso (rejeito nº 1) não deveria ser encontrado nada de carvão.

A fração fina de carvão, obtida na operação de desagramento do carvão produzido no jigue seguia para o circuito de finos do próprio lavador, o qual era composto, basicamente, de classificação em ciclones e de etapas de concentração em mesas vibratórias e células de flotação. Neste circuito de finos, obtinha-se o produto fino beneficiado, denominado CMF (carvão metalúrgico fino) e o rejeito da flotação. Este CMF era utilizado pelas empresas carboníferas de Santa Catarina na fabricação de coque de fundição, em coqueiras rústicas, do tipo “beehive” (beehive ovens), ou fornos de colmeia, construídas próximo das minas e dos lavadores. Nestas coqueiras, os subprodutos da coqueificação não eram aproveitados, sendo descartados no meio ambiente.

Mesmo nos dias de hoje, a qualidade do carvão fino produzido nos lavadores é muito variável de um lavador para outro, em relação ao teor de cinzas e principalmente em relação ao teor de enxofre. Este último se apresenta ainda com teores elevados, principalmente em relação às especificações para a fabricação de coque de fundição. Além disso, o impacto ambiental é muito grande, principalmente pela grande quantidade de gases sulfurosos e aromáticos que escapam dos fornos para a atmosfera durante a coqueificação, pois, como já foi mencionado, estes gases não são recuperados como subprodutos. Grande parte desses finos são atualmente comercializados para aplicações em cerâmica e mesmo para geração de energia nas termoelétricas.

Para contornar o problema dos altos teores de cinza e enxofre na fabricação do coque de fundição, os fabricantes desse tipo de coque compram

coque de petróleo "green coke", principalmente da Argentina, para misturar aos finos de carvão. O problema é que este coque é pago em dólares americanos, e quando o dólar sobe de preço em relação à moeda nacional, pode se tornar inviável a compra do mesmo para adicionar aos finos de carvão.

No caso da antiga Carbonífera Próspera S.A., que pertencia à CSN – Cia. Siderúrgica Nacional, esse carvão metalúrgico fino era misturado ao carvão metalúrgico grosso e enviado à CSN, em Volta Redonda - RJ, para fabricação do coque metalúrgico.

A segunda etapa de beneficiamento do carvão era feita no Lavador de Capivari. Este lavador teve a sua instalação concluída em 1945 e início de operação em maio deste mesmo ano. O circuito de beneficiamento constava basicamente de separação em ciclones de meio denso, para tratar o CPL e produzir carvão metalúrgico para uso na siderurgia e carvão vapor (carvão energético) para termoelétricas (CE – 4500) e para as cimenteiras (CE – 6200). Os carvões energéticos para termoelétricas e cimenteiras eram obtidos por separação em jigues do carvão energético produzido nos ciclones de meio denso.

A fração metalúrgica era transportada por vias férrea e marítima até as principais indústrias siderúrgicas do País. Nestas, o carvão metalúrgico nacional era usado em mistura com carvões importados para a fabricação de coque metalúrgico, numa proporção de 20 %. O percentual do carvão metalúrgico na mistura com os carvões importados para a fabricação do coque, variou, ao longo das décadas, entre 10 e 40%, de acordo com a política do governo e / ou pressão dos trabalhadores ou mineradores, através dos seus Sindicatos e Associações.

O carvão termoelétrico era utilizado nas usinas termoelétricas, pertencentes às Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. – Eletrosul (hoje, Gerasul). O carvão para a indústria cimenteira era distribuído pela CAEEB, através dos seus vários entrepostos espalhados pelo País. A Gerasul atualmente compra o carvão energético que é produzido pelas Carboníferas.



Durante o seu período de funcionamento, este lavador passou por diversas modificações, as quais sempre melhoravam o rendimento ponderal em carvão metalúrgico, com 18,5% de cinzas. Este rendimento passou de 23 para 48%, no período de 1945 a 1968.

De 1945 a 1961, o circuito de beneficiamento era constituído, basicamente, de britagem e concentração em jigues e reolavadores. Neste período, o rendimento ponderal em carvão metalúrgico passou de 23 para 33%. Em 1962 foram instalados os ciclones de meio denso, pela firma "Roberts & Schaefer Co." em lugar dos reolavadores, devido à baixa eficiência destes, permanecendo os jigues ainda com a função principal de separação. Com a introdução dos ciclones de meio denso, o rendimento em carvão metalúrgico melhorou muito, passando de 33 para 44,4%, no período de 1962 a 1967. Devido à alimentação do Lavador de Capivari ter passado de carvão "lavador" para carvão "pré-lavado", os jigues perderam a sua função principal, que era a de retirar a grande quantidade de estéril que acompanhava o carvão lavador. Por isso, em 1968 o circuito de beneficiamento do Lavador foi mais uma vez modificado, passando toda a alimentação (CPL) primeiramente pelos ciclones de meio denso, exceto a fração - 0,59 mm, que era tratada em ciclones espessadores e tricones.

Com esta modificação, os jigues ficaram com a função apenas de relavagem do carvão vapor (underflow dos ciclones de meio denso) para a produção dos dois tipos de carvão vapor (carvão energético), para os mercados termoelétrico e cimenteiro. Com esta mudança, o rendimento em carvão metalúrgico chegou ao máximo, passando dos 44,4 para 48% (NÓVOA, 1971).

Com a realização destas modificações no circuito de beneficiamento do Lavador de Capivari, melhorou o rendimento em carvão metalúrgico e a qualidade deste produto, que passou a ser produzido com menor teor de enxofre (MILIOLI, 1981b).

Posteriormente, passou-se à opção da "lavagem total", ou seja, incluindo também a fração abaixo de 0,59 mm na alimentação dos ciclones de meio denso.

Porém, a adição desses finos ao carvão grosso não é normal, pois estes finos sabidamente aumentam a viscosidade do meio, prejudicando a qualidade da separação.

Tecnicamente, haveria a possibilidade de se produzir carvão metalúrgico com 15 ou 12% de cinzas, mas o problema era alegadamente econômico, tendo em vista que o rendimento em massa desta fração caía muito, e, em consequência, aumentava a produção de carvão vapor e aumentava ainda mais o preço do carvão metalúrgico. Apesar disso, poucos anos antes do Lavador ter sido desativado, o carvão metalúrgico chegou a ser produzido com 16% de cinzas, que depois passou a 17%.

O Lavador Central de Capivari, além de realizar o beneficiamento final do carvão de Santa Catarina, fazia também o controle da qualidade dos carvões CPL que ali eram desembarcados pelas diversas empresas carboníferas de Santa Catarina. Este controle estabelecia penalidades para as empresas que não entregassem o CPL dentro das especificações pré-estabelecidas. Estas poderiam ser multadas ou mesmo serem impedidas de continuar fornecendo o seu carvão se persistissem na não obediência a essas especificações. Uma das falhas deste tipo de controle, era a não premiação às empresas que teriam condições de fornecer um carvão CPL com qualidade superior. Esta forma de controle de qualidade e de pagamento ao minerador, causava, naturalmente, uma desmotivação aos mineradores em melhorar a qualidade do seu produto, o que seria fácil de se conseguir, principalmente em relação às empresas instaladas na região de alto metalúrgico. Ao contrário, algumas mineradoras chegavam a adicionar material inerte ao CPL de melhor qualidade, até que este atingisse o teor de cinzas requerido, aumentando a tonelagem vendida e evitando assim que eles ficassem em desvantagem financeira, em relação aos outros fornecedores de CPL de pior qualidade.

#### 1.4. Contribuição do CETEM

A participação do CETEM, através da equipe da **Divisão de Tecnologia do Carvão (DITCAR)**, em relação ao carvão mineral brasileiro, foi marcante na década de 80, com a realização de vários projetos em diferentes campos da tecnologia do carvão, quais sejam:

- estudos de lavabilidade: dezenas de estudos foram realizados com carvões dos estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul, visando levantar as suas características tecnológicas para aplicações em siderurgia, termoelétricas e indústria cimenteira;
- estudos de beneficiamento: vários estudos foram realizados em carvões do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, envolvendo: separação em "dynawhirpool" com carvões de Candiota – RS da camada Bonito - SC; mesagem / flotação, com finos de carvão de Santa Catarina; só flotação, com finos de carvão de Santa Catarina; flotação aglomerante e floculação seletiva com carvões do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina; estudos otimização de funcionamento de jigues, com carvões de Santa Catarina, sendo que este tipo de trabalho era sempre realizado nos próprios lavadores; estudos de dessulfuração por métodos de concentração gravítica, com carvões do Paraná e Santa Catarina;
- estudos de pirólise, (retorta Fischer e circuito Jenkner) com linhito de Solimões (Amazonas), e com carvões do Paraná e de Santa Catarina;
- estudos de coqueificação, realizados em conjunto com a CSN, utilizando misturas de carvões do Rio Grande do Sul (Leão) e carvão metalúrgico de Santa Catarina, além de estudos para melhoria de funcionamento dos fornos de coque da firma IBRACOQUE, com a elaboração, ainda, para esta firma, de um projeto industrial alternativo para instalação de uma nova bateria de fornos de coqueificação, com melhor desempenho, em relação à produção e ao impacto ambiental, em comparação com a já existente (tipo colmeia);

- estudos de espessamento de finos de carvão gerados no circuito de beneficiamento do Lavador de Capivari, com a utilização de espessador de lamelas;
- briquetagem, em escala de laboratório, de finos de carvão de Santa Catarina, para a Carbonífera Criciúma;
- gaseificação: realização de estudos em retorta Fischer, visando a caracterização de carvão para a gaseificação, ou seja, avaliação do comportamento do carvão em relação à gaseificação, tal como o que foi realizado com o linhito de Solimões do estado do Amazonas. O Anexo 1 apresenta a bibliografia completa do CETEM referente aos temas acima citados.

Entre as dezenas de projetos desenvolvidos pelo CETEM na área de flotação, merece destaque o projeto: "Estudo de rebitagem do carvão vapor", citado por (CHAVES, 1992). Este projeto (ALMEIDA, CAMPOS e CHAVES, 1983) teve por objetivo, aumentar a recuperação de carvão metalúrgico, através da rebitagem do carvão vapor (40% de cinzas) originário do beneficiamento do carvão CPL, em ciclones de meio denso, do Lavador de Capivari, em Tubarão-SC. O estudo consistiu em determinar o grau de bitagem desse carvão que resultasse em maior recuperação de carvão metalúrgico ainda contido nesse resíduo. Este projeto envolveu duas necessidades antagônicas: de um lado a necessidade de diminuir a granulometria da bitagem para melhorar a liberação; de outro, a necessidade de não sobrecominuir o carvão, evitando a geração de excesso de finos, por dois motivos principais: 1) o sistema de tratamento de finos do Lavador de Capivari era ineficiente, tanto na separação água/sólido, quanto na parte de concentração; 2) há restrições em relação à percentagem de ultrafinos no carvão destinado à fabricação de coque de fundição ou metalúrgico.

Com esta premissa, os estudos foram conduzidos com cinco granulometrias diferentes : amostra "tal qual" (-1"), e amostras bitadas a -3/4, -1/2, -1/4 e -1/8". O material - 35 malhas obtido nas diferentes bitagens era misturado aos finos

naturais – 35 malhas da amostra antes da britagem. Esta mistura de finos era submetida a ensaios de flotação; e para o material + 35 malhas proveniente das diferentes britagens era simulado tratamento em ciclones de meio denso. As frações de carvão metalúrgico obtidas na flotação dos finos e nos ciclones de meio denso para cada uma das britagens, representava o adicional de carvão metalúrgico conseguido. O melhor resultado em termos de granulometria e recuperação em carvão metalúrgico foi com a britagem a  $-1/4"$ . Com este grau de britagem, conseguiu-se uma recuperação adicional de 11,9%, em peso, em carvão metalúrgico com 16% de cinzas e 13,2%, em peso, de carvão metalúrgico com 18,5% de cinzas. Em termos de toneladas, ter-se-ia um aumento de cerca 440.556 t/ano de carvão metalúrgico, o que equivaleria à produção de duas novas minas de carvão. Além de possibilitar maior recuperação em massa de carvão metalúrgico, outra vantagem deste projeto é que o novo carvão vapor resultante teria menores propriedades aglomerantes (coqueificantes). O carvão vapor que era normalmente produzido no Lavador de Capivari tinha propriedades aglomerantes residuais (CHAVES,1992), produzindo crostas ou as vezes até entupimentos parciais nos queimadores e tubulações. A ELETROSUL enfrentou este tipo de problema, o que forçou esta empresa a importar tecnologia de grelhas móveis para fazer a adaptação necessária para poder utilizar este tipo de carvão em suas termoelétricas, em Santa Catarina.

Esses projetos e muitos outros foram realizados graças ao Programa de Mobilização Energética. Através deste Programa muitos projetos importantes foram desenvolvidos nas áreas de geologia, caracterização tecnológica/petrográfica, beneficiamento, gaseificação/liquefação e de engenharia, em várias instituições brasileiras, tais como: universidades, centros de pesquisa, laboratórios de análises químicas e em empresas de engenharia (Paulo Abib Andery, PROMON, NATRON etc.). Concomitantemente, outros tipos de empresas foram surgindo, como as empresas fabricantes de equipamentos, firmas de consultoria tecnológica e outras, para atender às demandas de mercado, nas diferentes áreas envolvidas com carvão mineral.

### 1.5. Beneficiamento de carvões

O beneficiamento situa – se no contexto da tecnologia de carvão da seguinte forma:

Mina → Lavra → Beneficiamento → Transporte → Utilização → Conversão/Utilização.

O termo beneficiamento (ou “lavagem do carvão”) é empregado com referência às operações unitárias empregadas na remoção da matéria mineral que normalmente vem associada ao carvão e que vão corresponder, em termos de análises químicas, aos teores de cinzas e de enxofre pirítico no carvão (RÚBIO, 1988a).

O objetivo do beneficiamento dos carvões é, portanto, promover a separação entre a matéria carbonosa (carvão) e a matéria mineral existentes no carvão bruto. Procura-se alcançar este objetivo, explorando as diferenças das propriedades físicas e físico-químicas do carvão e dos seus componentes, surgindo, assim, as indicações dos prováveis processos de separação.

De um modo geral, tem-se as seguintes correlações entre as propriedades e os métodos de beneficiamento (PERES, 1989):

<b>Propriedades</b>	<b>→ Métodos</b>
1. <u>Ópticas (cor, brilho, fluorescência)</u>	→ <u>catação manual ou automática</u>
2. <u>Densidade</u>	→ <u>concentração gravítica</u>
3. <u>Forma</u>	→ <u>concentração gravítica e classificação</u>
4. <u>Susceptibilidade magnética</u>	→ <u>separação magnética</u>
5. <u>Condutibilidade elétrica</u>	→ <u>separação eletrostática</u>
6. <u>Radioatividade</u>	→ <u>escolha com contador</u>
7. <u>Textura – friabilidade</u>	→ <u>cominuição, classificação, peneiramento</u>
8. <u>Propriedades superficiais</u>	→ <u>flotação, aglomeração por óleo, eletroforese etc.</u>
9. <u>Reatividade química</u>	→ Hidrometalurgia.

Dos processos de beneficiamento acima mencionados, os métodos de concentração gravítica (separação em jigues, separação em meio denso, mesas vibratórias, ciclone autógeno etc.) são os mais usados, mundialmente, no

beneficiamento de carvões, devido às diferenças significativas de densidade entre o carvão e as substâncias minerais que normalmente o acompanham e pelo baixo custo operacional. No Brasil, o jigue é o equipamento mais utilizado para tratar carvões de granulometria grossa, acima de 0,6 ou 1 mm.

Os carvões brasileiros, de um modo geral, possuem altos teores de cinzas e enxofre e são considerados como sendo carvões de difícil beneficiamento, pois grande parte da matéria mineral (cinzas e enxofre) está disseminada na matriz orgânica. Segundo SANDERS e BROOKES, 1986, citados por (RÚBIO, 1988), estas características negativas ao beneficiamento, são típicas dos carvões "gondwanicos" do Hemisfério Sul, dos quais fazem parte, além dos carvões brasileiros, os carvões da Índia, Botswana e África do Sul.

Os finos de carvão são representados pelas partículas de granulometria abaixo de 0,6 ou 1 mm. Estes finos de carvão são, inevitavelmente, gerados nos processos de mineração e de beneficiamento (britagem). No passado, eles eram considerados muito difíceis de serem beneficiados e por isso, eram simplesmente descartados e depositados em bacias de decantação, sem serem processados. Como resultado disto, cerca de 2 bilhões de toneladas destes finos de carvão permanecem em barragens de rejeitos nos Estados Unidos, e um adicional de 40 milhões de toneladas vêm sendo depositadas anualmente. Porém, esta prática vem se tornando cada vez menos atrativa devido às pressões econômicas de aumento de produção por parte das empresas e de órgãos de defesa do meio ambiente. Outro fator que contribui também para o aproveitamento dos finos é a redução de custos em relação às áreas que normalmente são ocupadas para as deposições destes finos (SCHIMMOLLER et al., 1994).

Portanto, atualmente, estes finos são beneficiados pela maioria das empresas e aproveitados pelas indústrias, não só para aumentar a recuperação da usina de beneficiamento como um todo, como também para evitar a poluição da rede fluvial da região.

A flotação é o método consagrado mundialmente no beneficiamento de finos de carvão. Mas, para isso, o carvão tem que apresentar características de flotabilidade, ou seja, a superfície das partículas de carvão tem que ter propriedades hidrofóbicas (repelentes à água) como é o caso dos carvões betuminosos.

É um processo eficiente em relação à rejeição de cinzas, porém em relação à remoção da pirita em finos de carvão, a flotação deixa a desejar. Isto pode ser constatado no beneficiamento dos finos de carvão de Santa Catarina, onde se verifica que a remoção da pirita de granulometria fina é falha. Nos concentrados de flotação ainda se nota a presença de grãos de pirita fina liberada e também de grãos mistos pirita-carvão.

A aglomeração por óleo, nas suas diversas formas, é também usada no beneficiamento de finos de carvão, porém o custo do óleo, na maioria das vezes, inviabiliza a aplicação deste processo.

Outros métodos de beneficiamento que normalmente são empregados para recuperar finos de carvão, são a mesagem, peneiramento, concentração em espirais, concentração em ciclones de meio denso e autógenos, entre outros. Tradicionalmente os finos dos carvões brasileiros, quando processados, têm sido beneficiados através de peneiramento, ciclonação, flotação, mesagem, concentração em espirais e em ciclones autógenos; ou entram juntamente com os grossos (abaixo de 25,4 mm) para o beneficiamento em jigues.

As mesas concentradoras são muito utilizadas no beneficiamento de finos de carvão de Santa Catarina. Muito embora apresentem boa seletividade e propiciem um melhor controle visual da operação, têm o grande inconveniente de ocupar muito espaço na usina, devido à sua baixa capacidade de produção.

Os ciclones autógenos têm alta capacidade de tratamento, porém são muito sensíveis a variações das condições operacionais.

As espirais concentradoras foram criadas na década de 40 e aperfeiçoadas na década passada. São muito sensíveis a variações na alimentação, mas têm –



se apresentado como uma boa opção no beneficiamento de finos de carvão em Santa Catarina, principalmente para tratar finos provenientes de bacias de decantação. Apresentam baixos custos de instalação e operacionais, além de requererem pouco espaço na usina (CAMPOS, 2000; TAVARES; SAMPAIO, 1990).

Praticamente todos os equipamentos acima citados são utilizados no beneficiamento dos finos de carvão de Santa Catarina, porém os mesmos não se mostram eficientes o bastante para remover pirita, principalmente aquela que se apresenta a granulometrias muito finas. Isto é devido à dificuldade de beneficiamento do próprio carvão, à ineficiência dos equipamentos utilizados, carência de um melhor projeto de engenharia e de um melhor controle operacional.

Para tentar solucionar o problema da remoção da pirita de granulometria muito fina dos finos de carvão, as esperanças têm-se voltado para a utilização dos equipamentos de concentração centrífuga, tais como o concentrador Knelson, o "Multi-gravity separator" (MGS), Mozley e outros. Estes concentradores centrífugos, de desenvolvimento relativamente recente, têm sido empregados na concentração de finos de minerais pesados, como ouro aluvionar, cassiterita, tantalita entre outros.

Nos últimos anos, os equipamentos de concentração gravítica, baseados na força centrífuga, tais como o Knelson, Falcon, MGS (Mozley Multi-gravity Separator), vêm sendo muito utilizados na recuperação de finos de minerais pesados (ouro, cassiterita) em muitos países. No Brasil, o Knelson vem sendo muito utilizado no beneficiamento de ouro aluvionar, em garimpos.

Devido às diferenças de densidades do carvão e da pirita, estes equipamentos de concentração centrífuga poderão ser utilizados na remoção de pirita de finos de carvão, principalmente a de granulometria muito fina, tendo em vista que os equipamentos tradicionais de concentração gravítica e até mesmo a flotação se apresentam ineficientes na sua remoção dos finos de carvão.

O Centro para Processamento de Minérios e Carvão (CCMP), da Universidade do Estado da Virgínia, através do Prof. Yoon e sua equipe, vêm estudando alternativas de redução dos teores de cinzas e enxofre de finos de carvão com a utilização do MGS e da flotação. Para o caso da flotação, é utilizado um tipo de coluna de flotação denominada Microcel<sup>TM</sup>. Foram realizadas pesquisas em separado com cada um destes equipamentos e com a combinação dos dois. Os resultados mostraram que o MGS é mais eficiente do que o equipamento de flotação na remoção de cinzas. Este, por sua vez, mostrou – se mais eficiente em relação ao MGS na remoção do enxofre pirítico. Os resultados mostraram ainda que com a combinação dos dois equipamentos em um mesmo circuito, conseguem – se resultados ainda melhores em termos de redução do teor de cinzas e do teor de enxofre pirítico. (LUTTRELL et al., 1993; YOON et al., 1993a; YOON et al. 1993b; YOON et al.,1993c; LUTTRELL et al., 1994a; VENKATRAMAN et al., 1995; LUTTRELL et al., 1994b).

#### **1.5.1. Estudos de lavabilidade**

A etapa da pesquisa que antecede aos estudos de beneficiamento de um determinado carvão se constitui na realização dos estudos de lavabilidade. A partir dos resultados destes estudos, são conhecidas as características tecnológicas do carvão em questão, em relação às suas possíveis aplicações industriais. Com os resultados, estes estudos informam os parâmetros técnicos para o beneficiamento, quais sejam: densidade de corte, recuperação em massa dos produtos, bem como os teores de cinzas e enxofre destes produtos, além da avaliação a dificuldade de beneficiamento para uma determinada densidade de corte.

Os carvões minerais são constituídos de matéria carbonosa e matéria mineral. As partículas de carvão apresentam densidades que variam desde 1,25, para matéria carbonosa praticamente isenta de matéria mineral, até 1,8, dependendo da quantidade de inclusões de matéria mineral, principalmente folhelho, presentes na partícula; alguns autores consideram como sendo carvão,

material com densidade até 2,0. A densidade do folhelho carbonoso varia na faixa de densidade entre 2,0 a 2,7, dependendo da quantidade de matéria carbonosa presente; a densidade do folhelho puro (xisto), isento de matéria carbonosa, é em torno de 2,7. As partículas com densidades superiores a 2,7 são basicamente pirita, argilas e outros constituintes inorgânicos. A densidade da pirita é de aproximadamente 5,0. Portanto, as partículas mistas de carvão podem ser constituídas de carvão/folhelho, carvão/pirita, carvão/folhelho/pirita e de outras associações, dependendo dos tipos de constituintes minerais que compõem a amostra de carvão (CAMPOS, 1985).

Os estudos de lavabilidade são conduzidos sobre uma amostra representativa do carvão que se quer estudar. Basicamente, estes estudos constam de: estudos de liberação (cominuição); ensaios densimétricos para separação de frações de diferentes densidades; pesagem destas frações densimétricas; e determinações dos teores de cinzas e enxofre nestas frações densimétricas.

Para a realização dos ensaios densimétricos, são utilizadas misturas de líquidos orgânicos ou soluções de cloreto de zinco com densidades pré - estabelecidas, variando, normalmente, de 1,4 a 1,8 ou 1,4 até 2,0.. Com os resultados dos pesos das diferentes frações densimétricas e das determinações dos teores de cinzas e enxofre destas frações, constrói - se uma tabela. A partir dos dados desta tabela, são construídos gráficos denominados curvas de lavabilidade. Estas podem ser em função da densidade ou em função do teor de cinzas (ou enxofre). Os gráficos são construídos, registrando as massas acumuladas dos produtos flutuados (ou afundados), em %, na ordenada; e as densidades ou os teores de cinzas (ou enxofre), nas abscissas. Com a fração granulométrica abaixo de 0,6 mm da amostra, além dos ensaios densimétricos, são eventualmente realizados ensaios exploratórios de flotação para verificar as características de flotabilidade desses finos. Quando não se conhece bem, ou nada, a respeito do carvão em questão, os ensaios densimétricos são realizados,

utilizando – se intervalos de densidade mais estreitos, principalmente em torno da densidade de corte (CAMPOS, 1985; RÚBIO, 1988; CHAVES e CASSOLA, 1994).

A curva de lavabilidade de um carvão é uma característica deste carvão e serve para determinar em que condições de separação um equipamento de concentração gravítica deve ser operado para obtenção dos produtos desejados. Alguns tipos de curva de lavabilidade (curva de Mayer) podem mostrar, por exemplo, a impossibilidade de se obter um determinado produto que seria desejado, a partir do beneficiamento de um determinado carvão. As curvas de lavabilidade mostram, para uma determinada densidade de corte, os prováveis rendimentos, em peso, de cada um dos produtos; a qualidade dos mesmos em termos de teores das impurezas (cinzas e enxofre); a densidade de corte para obtenção desses produtos; e ainda possibilitam uma avaliação do grau de dificuldade no beneficiamento, através do parâmetro: material "near gravity (NGM). Após a realização dos estudos de lavabilidade, já se tem em mãos os dados tecnológicos listados, a seguir (CAMPOS, 1985):

- tamanho ideal de britagem;
- curvas granulométricas do carvão britado;
- curvas de lavabilidade das frações granulométricas: ( $> 0,6$  mm) e ( $0,6 \times 0,037$  mm);
- resultados dos ensaios de flotação da fração ( $0,6$  mm x 0); e
- eventualmente, resultados de ensaios de degradação do carvão.

A partir destes dados é possível ter-se uma boa indicação do fluxograma de beneficiamento a ser adotado para esse carvão.

Em suma, os estudos de lavabilidade de um carvão são conduzidos para se ter uma indicação das condições de separabilidade deste em relação às impurezas, prever a quantidade e a qualidade do carvão (teores de cinzas e enxofre) que poderá ser obtido ao efetuar – se a separação em uma determinada densidade.

### **1.5.2. Métodos de concentração gravítica**

Os métodos de concentração gravítica se baseiam na diferença de densidades dos minerais que compõem o minério, visando a separação do mineral ou dos minerais valiosos da ganga (minerais sem valor econômico) presentes no minério, num meio fluido (água ou ar). Os métodos de concentração gravítica abrangem os métodos de separação em meio denso, de jigagem, de separação em lâmina d'água e de concentração centrífuga.

A concentração gravítica é muito usada no processamento de minérios e carvão e, ultimamente, também, na reciclagem de metais, plásticos e outros resíduos sólidos urbanos; além do seu emprego no beneficiamento de cereais e purificação de grãos, na agricultura.

Em termos de custos de investimento e operacional, a concentração gravítica é usualmente mais econômica do que a flotação e os outros processos de concentração de minerais.

No caso do beneficiamento de carvões, os métodos de concentração gravítica se aplicam em mais de 90% dos casos, em todo o mundo, principalmente no beneficiamento do carvão grosso (grúdo), acima de 0,6 mm. Para esta faixa granulométrica, os processos de separação em meio denso e de jigagem são os mais utilizados. Apesar dos equipamentos de separação em meio denso serem muito eficientes em termos de separação, os jigues são os mais utilizados, pois podem beneficiar relativamente grandes massas a custos de capital e operacional baixos. Estes equipamentos são responsáveis pelo beneficiamento de 99% do carvão nacional, porém apresentam baixa eficiência operacional, com baixas recuperações e razoável seletividade; isto por terem sido construídos, originalmente, no estrangeiro, e dimensionados para beneficiar carvões de melhor qualidade e de características bem diferentes dos carvões brasileiros (SCHNEIDER e RÚBIO, 1987).

Por se tratarem de métodos mais simples e mais econômicos de concentração, procura-se aplicá-los também no beneficiamento de frações finas, até onde for possível, técnica e economicamente.

Os principais equipamentos de concentração gravítica e mais comuns no beneficiamento de carvão (CAMPOS et al., 1998; FONSECA, 1995), são:

- **separadores de meio denso, tipos “Teska” e “Drewboy”**, para tratar carvões de granulometria bastante grossa, normalmente acima de 10 mm. São equipamentos próprios para serem instalados em lavadores de alta capacidade de tratamento. Normalmente estes equipamentos recebem o carvão que vem da mina, tendo o mesmo sido submetido apenas a uma britagem preliminar (CAMPOS et al., 1998)
- **jigues de diferentes tipos (Baum, Harz, Batac etc.)**, para tratar material grosso, usualmente acima de 10 mm. Porém alguns jigues especiais (Batac, por exemplo) podem tratar material de granulometrias inferiores, até 1 mm.
- **ciclones de meio denso**, para tratar material normalmente com granulometria na faixa de 1” (25,4 mm) até 0,6 mm;
- **dynawhirpool** (um tipo especial de ciclone de meio denso), trata material na faixa granulométrica de 1” (25,4mm) até 0,6 mm, especialmente projetado para tratar carvões friáveis, incapazes de suportar o processamento em ciclones de meio denso.
- **ciclone autógeno**, “water-only-cyclone”, para tratar material de granulometria fina, abaixo de 1,0 mm, até 180  $\mu$ m (100 malhas). É um tipo de equipamento muito usado para remoção de pirita em finos de carvão, porém normalmente são necessárias duas ou mais etapas de concentração, por se tratar de um tipo de equipamento mais adequado para préconcentrações. Trata – se de um equipamento autógeno, onde o meio denso é construído pela fração pesada do próprio carvão.

- **mesa vibratória**, também para tratar material de granulometria fina, de 3 mm até 180  $\mu\text{m}$  (100 malhas), no caso do carvão. É muito usada nos lavadores de carvão por ser um equipamento muito seletivo na remoção da pirita dos finos de carvão; e
- **espirais concentradoras**, para tratar material fino, abaixo de 3 mm até 180  $\mu\text{m}$ , no caso de carvões. São equipamentos muito eficientes na remoção de matérias minerais (argilas, quartzo, calcita e outros) e de pirita em finos de carvão. Atualmente, existem modelos específicos para a redução do teor de enxofre (remoção da pirita) e para a redução do teor de cinzas (remoção das outras matérias minerais que normalmente vêm associadas ao carvão).

Existem, ainda, equipamentos de separação gravítica, a seco; caso das **mesas "Berry"**, de patente francesa, muito usadas em centros de pesquisa na Europa (Humboldt - Wedag) e na indústria, quando há problema de escassez de água na região onde deve ser instalado o lavador de carvão. Em Saarwellingen (Saarland – Alemanha), existia um lavador de carvão (Dr. Arnold Schäfer), onde estas mesas constituem a base do sistema de beneficiamento, para tratar carvão de granulometria grossa, em torno de 35 mm (CAMPOS, 1986). Este tipo de equipamento foi selecionado por problemas ambientais que poderiam ser causados à população da região, caso o beneficiamento fosse a úmido. Deve – se ressaltar que o beneficiamento a úmido não seria instalado, devidos aos problemas ambientais já mencionados (CAMPOS, 1985).

### 1.5.3. Dificuldades na dessulfuração de finos de carvão

O problema da dessulfuração de finos de carvões não é novo nem para os diferentes países produtores de carvão, nem para a indústria carbonífera de Santa Catarina. Vários estudos já foram e estão sendo realizados em muitos países, sempre tentando encontrar alternativas técnicas mais eficientes, menos poluidoras e, se possível, menos onerosas na remoção do enxofre dos diferentes tipos de carvões que esses países produzem. Ressalta – se que, por várias razões

técnicas, um determinado processo de remoção de enxofre pode ser bem sucedido para o carvão de uma região e não ser para o carvão de outra região, mesmo dentro de um mesmo país.

Mesmo já estando na forma liberada, quando a pirita se apresenta em granulometrias muito finas, torna-se difícil uma separação eficiente desta em relação ao carvão, pelos métodos convencionais de concentração gravítica, mesmo levando em consideração a diferença de densidade entre estes dois componentes, pois a esse grau de finura, a densidade, que seria a propriedade diferenciadora na separação destas duas substâncias, já não tem mais tanta influência na separação gravítica: partículas finas se comportam como parte do meio líquido, acompanhando-o em sua partição em vez de separarem de acordo com as suas densidades.

Se a liberação da pirita em relação ao carvão não é completa, isto representa sérios problemas quando a separação é baseada em processos de química de superfície, como são os casos da flotação, aglomeração oleosa e floculação seletiva. Estes processos são extremamente sensíveis às variações das características superficiais da partícula de carvão no que diz respeito à hidrofobicidade, oxidação, conteúdo de impurezas, disseminação de matéria inorgânica, eletroquímica interfacial e porosidade (RÚBIO, 1988b).

A pirita que ocorre no carvão catarinense se apresenta sob a forma de nódulos e grânulos. Parte destes grânulos de pirita se encontra finamente disseminada na matéria carbonosa, até mesmo nas frações bem finas, abaixo de  $74\mu\text{m}$  (200 malhas), o que dificulta uma separação eficiente do sistema pirita-carvão, através do beneficiamento, seja por métodos de concentração gravítica para finos ou mesmo por flotação.

A pirita existente nos finos de carvão de Santa Catarina, é do tipo carbonosa, ou seja, a sua superfície é pigmentada com finos grãos de carvão. Como a pirita é intercrescida com o carvão, ocorre um efeito sinérgico na flotação, sendo muito difícil de deprimi-la e separá-la do carvão, pois sendo o



carvão altamente hidrofóbico, até mesmo uma pequena inclusão de carvão na superfície da pirita pode tornar esta partícula de pirita em condições de flotar junto com o carvão. Por outro lado, se, devido às condições do meio, uma partícula livre de pirita ficar superficialmente oxidada, ela torna-se altamente hidrofóbica e flota, também, junto com o carvão (LUTTRELL et al., 1994).

Muitos trabalhos de flotação com finos de carvão de Santa Catarina realizados no CETEM, em escalas de bancada e piloto, mostraram que a flotação, realmente, não se apresenta como um processo seletivo, na separação pirita – carvão.

Resumindo, são dois os principais problemas em relação à uma remoção eficiente do enxofre pirítico em finos de carvão. O primeiro é devido ao estado de disseminação fina em que a pirita se encontra, o que requereria moagem fina para uma completa liberação da pirita, onerando ou inviabilizando o processo. O segundo, é causado pela grande semelhança das características químicas superficiais (hidrofobicidade) da pirita carbonosa e do carvão, dificultando, assim, uma boa separação destes dois componentes através da flotação (LIU, 1989). Um terceiro problema que poderia ser adicionado aos anteriores, é quando a pirita, mesmo estando na forma liberada, se apresenta em granulometria muito fina e os métodos tradicionais de concentração gravítica já perdem as suas eficiências de separação ou de seletividade.

As explicações acima expostas mostram as possíveis razões porque a separação pirita – carvão, nos finos de carvão de Santa Catarina, não tem se mostrado eficiente. O desafio, portanto é encontrar um processo em que esta separação se torne mais eficiente.

O teor de cinzas que é possível ser obtido tecnicamente, com o beneficiamento desses finos é alcançado através da concentração por flotação, e aceito pelos fabricantes de coque de fundição e pelos clientes deste coque. Porém, o mesmo já não acontece em relação ao teor de enxofre, que precisa ser reduzido.

Outros métodos de dessulfuração existentes, seja por via térmica, química ou bacteriana, têm – se mostrado muito dispendiosos, inviabilizando o processo. A dessulfuração bacteriana ainda demanda um tempo longo no processo, mas poderá ser uma boa opção para o futuro.

Os estudos de caracterização realizados em amostra de finos de carvão, coletada na Massa Falida CBCA (Companhia Brasileira de Carvão Araranguá) atualmente Cooperminas, mostraram que há uma grande concentração de enxofre nas frações finas, principalmente abaixo de  $150\mu\text{m}$  (100 malhas). Isto resulta na obtenção de concentrados de carvão com teor elevado de enxofre, mesmo depois de ter passado por etapas de concentração em ciclones, mesas vibratórias e células de flotação.

Na expectativa de conseguir, principalmente, a redução do teor de enxofre, foram realizados estudos de flotação em coluna com amostra de finos de carvão de Santa Catarina (LIMA; CORREIA; CAMPOS, 1992). Devido ao formato da coluna (6 m de altura e 5 cm de diâmetro) e ser a mesma indicada para tratar minério de granulometria bastante fina, esperava – se que poderia haver uma boa rejeição da pirita, principalmente aquela de granulometria bem fina, abaixo de  $147\mu\text{m}$  (100 malhas). A amostra foi coletada no lavador da Cooperminas (Cooperativa de Extração de Carvão Mineral dos Trabalhadores de Criciúma), como passaremos a designá-la. Os resultados mostraram que a flotação em coluna produziu concentrados de carvão com menores teores de cinzas que a flotação convencional, porém as recuperações em massa foram também menores. Em termos de teor de enxofre não foram observadas diferenças significativas da flotação em coluna em relação à flotação convencional. Esses teores foram superiores a 1,4%. Foram utilizados  $\text{CaO}$  e  $\text{FeCl}_3$  como depressores da pirita, mas estes não produziram o efeito esperado.

## 2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVO

A redução dos teores de cinzas e enxofre em finos de carvões brasileiros já foi objeto de vários estudos no CETEM, nas décadas de 70 e 80, principalmente em se tratando de finos de carvões do Paraná e de Santa Catarina. No caso dos finos de carvão de Santa Catarina os estudos se basearam mais no processo de flotação, os quais deram bons resultados em relação à redução do teor de cinzas, porém em relação à redução do teor de enxofre, os resultados não foram muito satisfatórios. Vários reagentes depressores da pirita foram utilizados, quais sejam: amido, cal, cloreto férrico etc., com variação da dosagem de cada um deles (CAMPOS e ALMEIDA, 1977; CAMPOS, ALMEIDA e CHAVES, 1981; CARRISSO, 1984). Em relação ao cloreto férrico, constatou-se que este reagente não é um depressor específico da pirita, mas também das outras matérias minerais que acompanham os finos de carvão de Santa Catarina (CHAVES, 1979). Outros trabalhos realizados por outros centros de pesquisa e universidades, com finos de carvão de Santa Catarina, também apresentaram resultados semelhantes, em termos da redução do teor de enxofre.

A bibliografia consultada mostrou que realmente a flotação é um processo muito eficiente para a redução do teor de cinzas em finos de carvões, principalmente em se tratando de carvões betuminosos (BROWN et al., 1962; APLAN, 1976; FUERSTENAU et al., 1983; BUSTAMANTE, 1984; RÚBIO, 1988b; BALTAR, 1989; CHAVES et al., 1987). Já no caso da redução do teor de enxofre, tanto os trabalhos realizados no CETEM, já mencionados, quanto os consultados na revisão bibliográfica feita não apresentaram resultados totalmente satisfatórios, em termos técnicos e/ou econômicos, mostrando, portanto, que realmente a redução do teor de enxofre em finos de carvão, através da flotação, tem sido uma tarefa realmente difícil, não alcançando um percentual satisfatório de rejeição de pirita, devido aos problemas já mencionados e discutidos em capítulos anteriores

Apesar da flotação não ter se apresentado até o momento como um processo eficiente na redução do teor de enxofre em finos de carvão, é o processo mais utilizado mundialmente no beneficiamento de finos de carvão para a redução

dos teores de cinzas e de enxofre, permanecendo aí esta falha no caso da redução do enxofre. Por outro lado, a eficiência de separação dos equipamentos tradicionais de concentração gravítica (caso da mesa vibratória, ciclone autógeno e outros), cai bastante, quando a pirita existente nestes finos se apresenta a granulometrias muito finas, mesmo em se tratando de minerais de densidades bem diferentes, como é o caso da pirita e do carvão.

O que se verifica na prática, é que, principalmente a pirita de granulometria muito fina ainda se encontra presente nos concentrados finais de flotação dos finos produzidos nos lavadores de Santa Catarina, contribuindo de forma decisiva para o teor elevado de enxofre que estes produtos normalmente apresentam.

No presente trabalho, foram realizados estudos para a redução do teor de enxofre nos finos de carvão de Santa Catarina, utilizando métodos de concentração gravítica, porém enfocando a utilização de equipamentos de concentração centrífuga (concentrador centrífugo Knelson e o MGS – *Multi-gravity Separator*), os quais ainda não foram testados no beneficiamento de finos de carvão de Santa Catarina, para a redução do teor de enxofre.

Estes concentradores centrífugos vêm sendo muito utilizados, com sucesso, na indústria mineral aqui no Brasil e em outros países, na concentração de minerais pesados, tais como tantalita, cassiterita, ouro aluvionar, entre outros.

Os finos de carvão de carvão em Santa Catarina, são representados pela fração abaixo de 0,6 mm, obtida na etapa de desaguamento do carvão CPL (carvão pré – lavado) produzido nos jiques dos pré – lavadores de carvão de Santa Catarina. No âmbito da indústria carbonífera, esses finos representam uma parcela de cerca de 10% do total da massa a ser beneficiada (alimentação do jigue). Este percentual depende do grau de britagem a que é submetido o carvão, que varia de 25 a 38 mm (HOFFMANN, 1982; PAPÉE, 1989).

Os finos de carvão de Santa Catarina são utilizados normalmente na fabricação de coque de fundição. Neste tipo de aplicação o teor de enxofre é considerado um fator crítico, pois menores teores de enxofre significam coque de

melhor qualidade, melhor preço e conseqüentemente, maior competitividade. Além do impacto ambiental causado no momento da coqueificação destes finos, o enxofre que permanece no coque produzido vai prejudicar a resistência mecânica do metal que for produzido com a utilização deste coque.

Mesmo após o beneficiamento, o teor de enxofre nesses finos de carvão ainda se apresenta inadequado para a fabricação de coque de fundição, prejudicando a qualidade do coque a ser produzido e a sua competitividade no mercado. Devido a isto, o processo de beneficiamento a ser aplicado a esses finos tem que ser mais eficiente, de tal forma que o produto a ser obtido tenha teor de enxofre compatível com este tipo de aplicação.

Através do beneficiamento em mesa vibratória, se cuidadosamente conduzido consegue – se remover, com êxito, somente a pirita de granulometria mais grossa, acima de 74 $\mu$ m (200 malhas).

Vários estudos já foram realizados por vários centros de pesquisa e universidades, visando resolver o problema da redução do teor de enxofre dos finos de carvão de Santa Catarina. Nesses estudos, diferentes técnicas de concentração de finos foram utilizadas, sem contudo conseguir solucionar definitivamente o problema de uma maneira viável, em termos de uma boa recuperação da matéria carbonosa e baixo teor de enxofre.

O objetivo da tese é mostrar a possibilidade de eliminação de quantidades significativas de pirita de granulometria fina e ultrafina dos finos de carvão de Santa Catarina, obtendo concentrados com teores de enxofre total próximos de 1%, através da utilização de concentradores centrífugos.

Conseguiu – se desenvolver um processo inédito de remoção do enxofre pirítico dos finos de carvão de Santa Catarina.

No desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos de concentração gravítica: mesa Mozley, mesa vibratória, concentrador Knelson e MGS (Mozley Multi- Gravity Separator).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido ao baixo custo de beneficiamento e simplicidade de circuito, entre outras vantagens, muitos pesquisadores, (KLIMA et al., 1990; LEONARD, 1991; FOURIE, 1980; GODFREY, 1994), entre outros, citados por (FONSECA, 1995), realizaram estudos investigando exaustivamente o beneficiamento de finos de carvão abaixo de 0,59 mm (28 malhas) através de métodos de concentração gravítica, tais como ciclones de meio denso, conseguindo resultados apenas relativamente satisfatórios, em termos técnicos.

O tamanho mínimo de uma partícula que pode ser separada por processo de meio denso está relacionado com o tamanho máximo da partícula de magnetita que forma o meio denso e com a dificuldade ou sucesso em recuperar essa magnetita, no processo.

FOURIE, 1980, relatou a viabilidade técnica de separar partículas de até 75  $\mu\text{m}$  (200 malhas) através de separação em meio denso. Porém, para obter eficiência de separação a esta granulometria, pelo menos 50% da magnetita teria que estar abaixo de 10  $\mu\text{m}$ . O consumo de magnetita, no caso, foi alto, da ordem de 1 kg/t de carvão.

GODFREY (1994), relata que o desempenho na separação em meio denso da fração 105 x 25 $\mu\text{m}$  (150 x 560 malhas) é possível, usando magnetita abaixo de 5  $\mu\text{m}$ . Porém, vários estágios de classificação precederam a separação em ciclone de meio denso, e vários estágios de concentração para a recuperação do meio denso foram necessários, onerando muito o processo.

WONNACOTT e WILLS (1990), citados por FIGUEIREDO e CHAVES, (1998), consideram que as técnicas de concentração gravítica tornam-se muito ineficientes para tamanhos de partículas abaixo de 25 a 50  $\mu\text{m}$ . De um modo geral, o beneficiamento por concentração gravítica já se torna difícil para tamanhos de partículas abaixo de 74  $\mu\text{m}$ , visto que a partir desta granulometria a

eficiência do processo é reduzida, já que as partículas começam a se comportar como se fosse parte do fluido. Um dos problemas, relacionado à dificuldade em recuperar partículas finas e ultrafinas, está nas propriedades reológicas das polpas formadas por estes finos e ultrafinos (FIGUEIREDO e CHAVES, 1998).

Apesar do valor acadêmico destas pesquisas e dos resultados tecnicamente viáveis, estes processos tornam-se muito dispendiosos para as suas implantações na indústria devido à dificuldade de moagem da magnetita, que é um mineral duro, e à complexidade do circuito que se faz necessária para a recuperar a magnetita e retorná-la ao processo.

### **3.1. Concentradores centrífugos**

Como já mencionado, dentre os métodos de beneficiamento de minérios, os métodos de concentração gravítica são certamente os que apresentam menores custos de investimento e operacionais, maiores capacidades e menor complexidade operacional. Mas para que estes métodos sejam efetivamente eficientes duas premissas têm que ser inicialmente atendidas : a granulometria da alimentação tem que ser tal que as partículas a serem separadas estejam satisfatoriamente liberadas e que haja uma diferença mínima de densidade real (1 a 1,5) entre as partículas a serem separadas. Entretanto, na maioria das vezes, a eficiência dos métodos de concentração gravítica convencionais, como jigues, mesas concentradoras e espirais, perde eficiência de separação quando os diâmetros médios das partículas são inferiores a 50  $\mu\text{m}$  e a diferença de densidades reais torna – se menor que 1 (SILVA et al., 1998).

No afã de superar estas limitações de tamanho mínimo de partículas e pequenas diferenças de densidade entre os minerais de ganga e minerais minério, novos equipamentos de concentração gravítica têm sido desenvolvidos nas duas últimas décadas, principalmente na Austrália e Canadá, baseados na utilização da força centrífuga e na fluidização de leitos de partículas.

Estes equipamentos foram desenvolvidos e testados inicialmente pela ex - União Soviética, nos anos 50. Foram empregados industrialmente na China, por mais de 20 anos, no tratamento de rejeitos de minérios de estanho e tungstênio. Só mais recentemente foram introduzidos no Ocidente, no tratamento de minérios de ouro (FIGUEIREDO e CHAVES, 1998).

O campo centrífugo introduzido nos princípios básicos de funcionamento de alguns equipamentos tradicionais de concentração gravítica, propiciou a criação de "grandes gradientes gravitacionais aparentes", surgindo, assim, os equipamentos centrífugos de concentração, os quais apresentam :

- melhor seletividade no processo de separação entre partículas leves e pesadas, aumentando assim os teores dos minerais nos concentrados obtidos;
- melhor desempenho na separação de minerais de densidades próximas ( $\pm 0,5$ );
- maior eficiência na recuperação de ultrafinos de minérios ou mesmo lamas (partículas abaixo de  $5\mu\text{m}$ );
- maiores recuperações metalúrgicas; e
- grandes capacidades de tratamento.

Podem ser destacadas como principais vantagens destes equipamentos, as seguintes: simplificação do circuito de concentração, alta capacidade unitária, menores custos operacionais e de manutenção, maior segurança operacional, melhor controle operacional, maior nível de automação e principalmente, a possibilidade de tratamento de minérios em uma faixa granulométrica fina mais ampla, além de possibilitar a recuperação de antigos depósitos de finos de minérios. Adicionalmente, contribuem para a diminuição do impacto ambiental, principalmente pelo fato de não utilizarem nenhum tipo de reagente químico e apresentarem um baixo consumo específico de energia por tonelada processada (SILVA et al., 1998).



Entre os equipamentos de concentração gravítica que empregam a força centrífuga podem ser citados o concentrador centrífugo Knelson, concentrador Falcon, “Mozley Multi - gravity Separator” (MGS) e o jigge centrífugo Kelsey. Estes equipamentos vêm sendo muito aceitos na área de tratamento de finos de minerais pesados, em especial com minérios de ouro. Existem equipamentos similares nacionais que usam os mesmos princípios de funcionamento, os quais se diferenciam dos importados, mais em relação aos materiais com os quais eles são fabricados (plásticos e outros). É importante chamar a atenção para o fato de que estes equipamentos de concentração centrífuga foram projetados inicialmente para tratar minérios contendo tungstênio, estanho e ouro, os quais apresentam pequenos volumes de concentrado, se comparados com os minérios de ferro, de carvão e de titânio de areias de praia.

### **3.1.1. Concentrador Centrífugo Knelson**

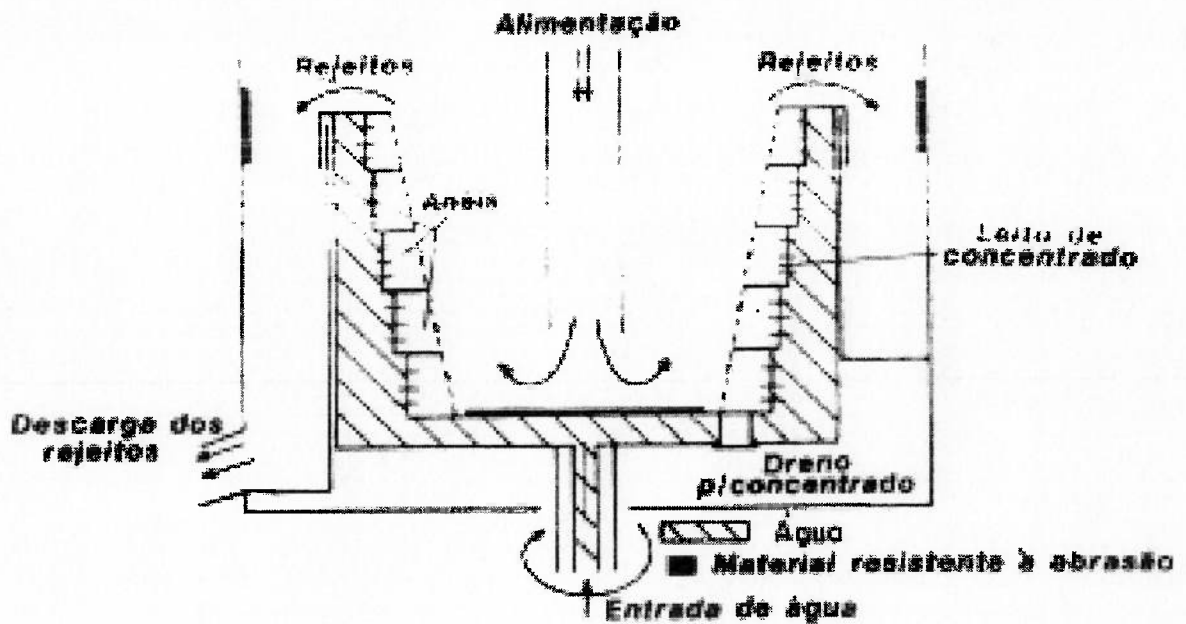
O concentrador centrífugo Knelson foi desenvolvido, em 1982, pelo engenheiro Byron Knelson. Até chegar ao estágio atual de desenvolvimento este concentrador centrífugo passou por diversas fases de aperfeiçoamento. Teve larga aceitação na indústria mineral, embora apresente como desvantagem o fato de trabalhar em regime descontínuo, ou seja, a descarga do concentrado é feita de forma periódica, intercalando-se ciclos de concentração e ciclos de limpeza. Este tipo de concentrador aplica-se, preferencialmente, para minérios com teor do mineral de interesse na ordem de ppm (partes por milhão) (LINS et al., 1992; SILVA et al., 1998). Até agora, sua maior aplicação, é na concentração de minérios de ouro, principalmente nos garimpos.

O equipamento consiste de uma cesta cônica perfurada, constituída de uma série de anéis ou séptos horizontais, colocados, internamente, a igual distância um do outro, ao longo da parede da cesta, que gira em alta velocidade. Estes anéis ou ranhuras têm a finalidade de reter as partículas de minerais pesados. A Figura 2 mostra o princípio de funcionamento deste tipo de concentrador. A alimentação deve ser bitolada a uma granulometria de – 6 mm e introduzida no equipamento

sob a forma de polpa, com 20 a 40% de sólidos em peso, através de um tubo central e estático, que conduz a polpa até a base da cesta. As partículas, ao atingirem a base da cesta, são impulsionadas em direção às suas paredes laterais pela ação da força centrífuga gerada pela rotação da cesta. Forma-se, então um leito de volume constante nos anéis, que devem concentrar as partículas de minerais pesados à medida que as mais leves vão sendo expulsas do leito pelas mais pesadas, com a ajuda da água de contrapressão ou de fluidização, que torna o leito permeável. Esta permeabilidade do leito permite que uma partícula fina de mineral pesado penetre nesse leito e fique retida nos anéis, devido à ação da força centrífuga, que é cerca de 60 vezes a força da gravidade (60 g), a uma velocidade de 600 rpm (LINS, 1992).

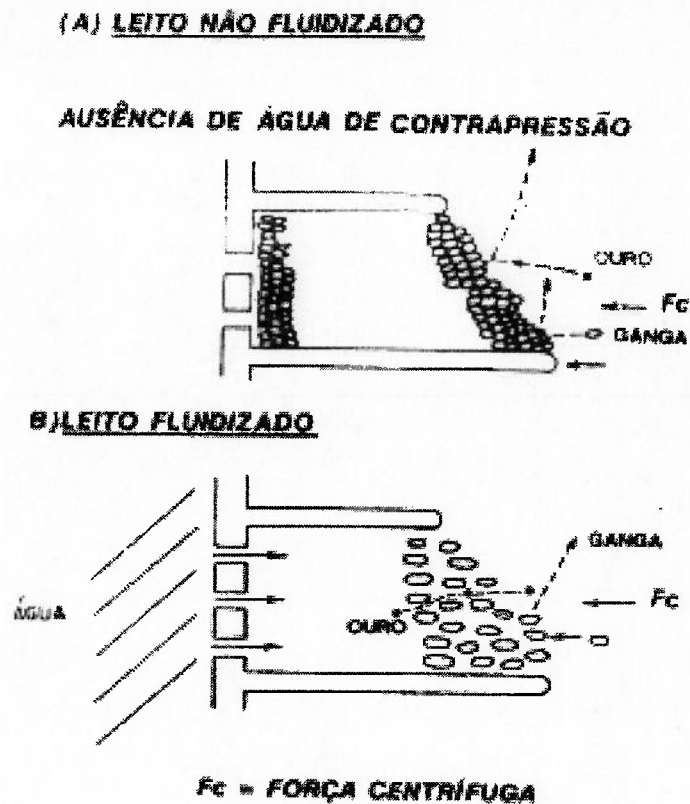
A água de contrapressão é introduzida na cesta de fora para dentro, a partir de uma camisa d'água, fixa, existente em volta da cesta. Ela é injetada através de furos existentes nos anéis, ao longo da parede da cesta. Com a otimização da água de fluidização evita-se a compactação do material no interior dos anéis, tornando o leito permeável, onde as partículas mais leves vão dando lugar às partículas pesadas, enquanto as mais leves são arrastadas por cima dos anéis em direção à área de descarga de rejeitos, situada no topo do cone.

Desta forma, consegue-se, no final da operação, um leito com grande concentração de minerais pesados distribuídos pelos anéis da cesta, com boa recuperação de partículas de minerais pesados, mesmo as mais finas (da ordem de 5 a 10 $\mu$ m) e uma boa eficiência de separação (FONSECA, 1995). A Figura 3 elucida o efeito da água de contrapressão no funcionamento deste tipo de equipamento.



**Figura 2 – Seção transversal de um concentrador Knelson e princípio do seu funcionamento**

Há uma variação do campo centrífugo com a altura do cesto devida à diferença de tamanho dos raios dos anéis. Em razão disto, nos anéis inferiores, há uma tendência de se concentrarem as partículas maiores e mais densas, enquanto que nos anéis superiores, onde os raios da cesta são maiores (maior força centrífuga), os minerais pesados de granulometria mais fina, podem ainda ser recuperados.



**Figura 3 – Influência da água de contrapressão na formação do leito de concentrado nos anéis do concentrador Knelson**

A capacidade de tratamento destes equipamentos vai desde 6 até 150 t/h. O ciclo de operação do equipamento é de 6 a 8 horas (para ouro), ao término do qual o concentrado que fica entre os anéis é retirado por meio de um dreno localizado no fundo do cone. O tempo de operação do equipamento está condicionado à quantidade de minerais pesados presentes na alimentação. Portanto, quanto maior for a proporção desses minerais pesados na polpa, menor será o período de operação do equipamento.

Os parâmetros operacionais mais importantes são a vazão de alimentação, a percentagem de sólidos na alimentação e a pressão da água de fluidização.

A Figura 4 mostra a foto do concentrador Knelson em tamanho de laboratório.



**Figura 4 – Foto do concentrador Knelson de laboratório (3”)**

### **3.1.2. Jigue centrífugo Kelsey**

O jigue centrífugo Kelsey foi desenvolvido na Austrália e é fabricado pela firma “Geo Logics of Australia”, tendo estado em operação na concentração de vários tipos de finos de minerais pesados, em várias e grandes empresas de mineração, desde 1990. É um equipamento de separação já patenteado em mais de 40 países e já instalado e operando em mais de 20 usinas de concentração em todo o mundo (“Mining Magazine, 1999), porém no beneficiamento industrial de finos de carvão ele ainda não é aplicado.

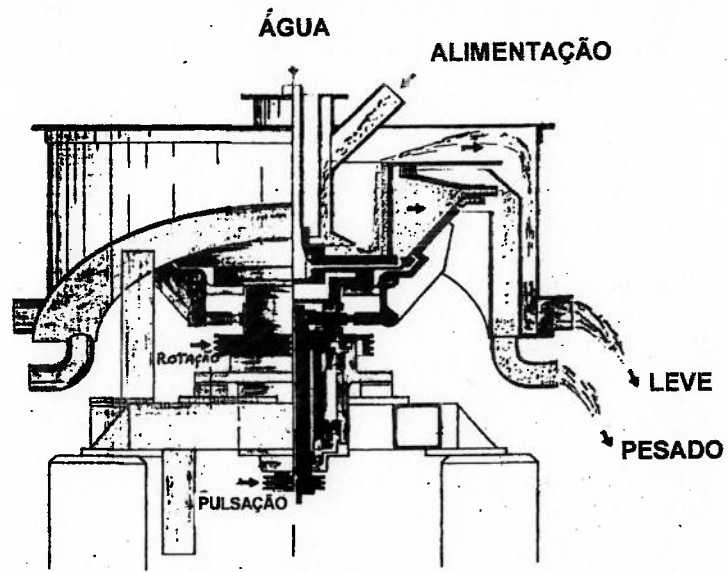
É um equipamento que usa também a força centrífuga e o efeito de pulsação do leito para aumentar a seletividade de separação dos finos e ultrafinos de minerais pesados, possibilitando maior recuperação metalúrgica desses finos e ultrafinos e teores mais elevados dos minerais nos produtos produzidos nas usinas de concentração.

O jigue centrífugo Kelsey foi desenvolvido, inicialmente, para a concentração dos minerais pesados contidos em areias. Para este tipo de concentração, a faixa de força centrífuga utilizada foi de 30 a 200 g (FONSECA, 1995). Obtinham-se concentrados primários dos minerais pesados (concentrado "bulk"), com recuperações em massa acima de 90% de ultrafinos de minerais pesados (80% passante em 53  $\mu\text{m}$ ), com teor de minerais pesados da ordem de 88% (Mining Magazine, 1999).

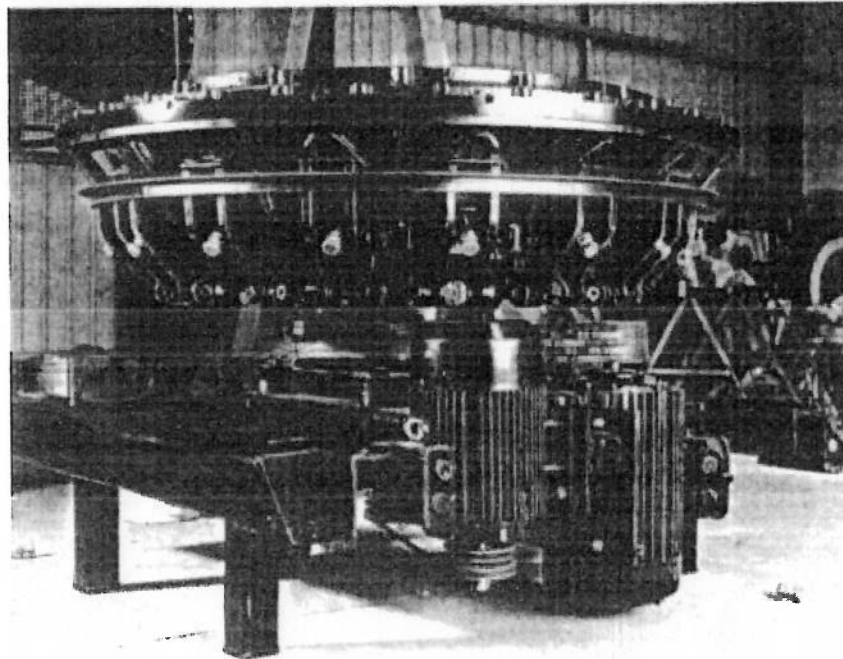
O princípio de funcionamento desse tipo de jigue consiste, basicamente, na combinação do princípio de pulsação dos jigues com aplicação da força centrífuga, de forma semelhante à das centrífugas convencionais. Ou seja, o equipamento é como se fosse um jigue convencional montado sobre uma base giratória que, girando em alta velocidade, produz uma força centrífuga que permite alterar o campo gravitacional aparente sobre as partículas a serem separadas. A ação desta força centrífuga permite a recuperação de partículas abaixo de 40 $\mu\text{m}$ .

O funcionamento do jigue consiste na alimentação da polpa de minério, com 25 a 40% de sólidos, no interior de uma câmara constituída por uma tela semelhante à existente em jigues convencionais, porém montada verticalmente. Esta câmara girando com velocidade da ordem de 30 a 45 rpm, cria um campo centrífugo da ordem de 80 g. Ao mesmo tempo, um outro mecanismo realiza a pulsação do leito mediante a injeção de água na câmara interior. Esta pulsação permite que o leito se dilate e contraia, com velocidades diferentes, permitindo que as partículas pesadas ultrapassem o leito, sendo, então, separadas das partículas leves. O material pesado que atravessou o leito é continuamente descarregado através de pequenos orifícios. O material leve é descarregado pelo topo (SILVA et al., 1998). A Figura 5 mostra o diagrama esquemático do equipamento e o princípio do seu funcionamento e a Figura 6, a foto do equipamento. Tem a vantagem, portanto, de ser um equipamento de funcionamento contínuo.

Segundo FEDOTOV et al. (1997), citado por SILVA et al., (1998), as principais aplicações do jigue Kelsey têm sido no beneficiamento de cassiterita, areias de praia, ouro, carvão, platina, chumbo, manganês e minério de ferro.



**Figura 5 – Jigue centrífugo Kelsey – diagrama esquemático**



**Figura 6 – Foto do Jigue Kelsey**

### **3.1.3. Concentrador Falcon**

O concentrador Falcon é fabricado pela "Falcon Concentrator Co." É um equipamento de concentração centrífuga, também de origem canadense, que se

diferencia do concentrador Knelson principalmente no que diz respeito à velocidade de rotação (que é bem maior no Falcon), à ausência de anéis e de leito fluidizado (a sua cesta não é perfurada) e pelo fato de sua operação poder ser contínua. Este tipo de concentrador tem um campo centrífugo cerca de 5 vezes maior que o concentrador Knelson ( $\approx 300 g$ ) e não usa água de contrapressão (LINS et al., 1992 e FONSECA, 1995).

Devido ao seu alto grau de centrifugação, este tipo de equipamento terá mais condições, pelo menos teoricamente, de recuperar minerais pesados de granulometrias ultrafinas e de separar outros minerais pesados menos densos que o ouro. O concentrado de minerais pesados obtido através deste equipamento sai parcialmente desaguado e deslamado (SILVA et al., 1998).

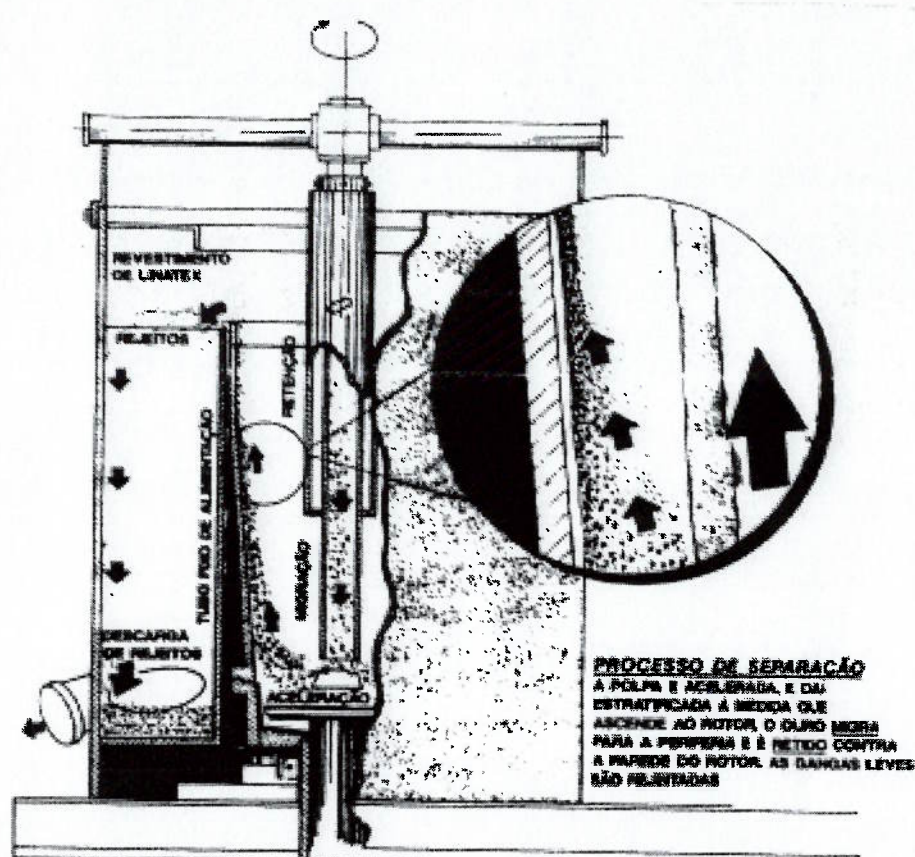
A utilização deste equipamento é particularmente interessante em aplicações onde se deseja obter uma pequena quantidade de material fino e pesado e o descarte de uma parcela expressiva da massa alimentada, ou seja, como um pré-concentrador. O modelo "Falcon C" demonstrou ter também um bom desempenho quando utilizado na operação "scavenger", aumentando a recuperação no processo. Este tipo de equipamento tem tido bastante sucesso no tratamento de diferentes tipos de minerais, incluindo ouro, cobre, estanho, carvão, minério de ferro, prata, minerais pesados e, mais significativamente, tântalo, onde apresentou excelentes resultados, tratando rejeitos considerados finais.

O Falcon consiste de uma cesta cilindro-cônica sem anéis e sem furos, que gira a alta velocidade no interior de uma camisa fixa externa, cuja função é coletar o rejeito. A polpa é alimentada no centro e no fundo do cone, onde é afetada pela aceleração e vai se estratificando à medida em que ascende no rotor. O mineral denso migra para a saída e é retido contra a parede do rotor; os minerais leves passam por sobre o mineral denso retido e são descarregados como rejeitos. A Figura 7 mostra o princípio de funcionamento do equipamento. A retirada do concentrado é obtida por lavagem do material acumulado na parede da cesta, o qual é descarregado pelo fundo após a parada do aparelho, caracterizando



também uma operação intermitente (modelo descontínuo, Figura 8). A granulometria de alimentação é de 10 malhas (1,65 mm) (LINS et al., 1992).

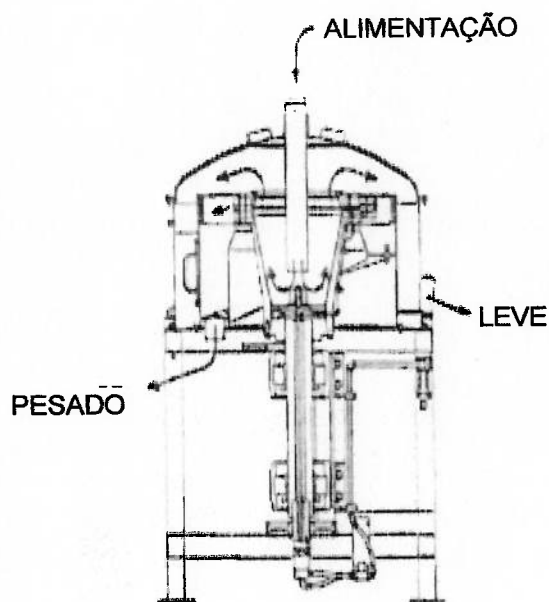
É fornecido, comercialmente, em modelos para operação em bateladas, bateladas com automatização do processo de descarga (modelos SB usualmente utilizados para concentração de ouro) e de descarga contínua. São fornecidos em escala comercial, equipamentos com capacidade para tratar desde 0,9 até 136 t/h (SILVA et al., 1998 e FONSECA et al., 1995).



**Figura 7 – Esquema de separação do concentrador Falcon**

No caso do concentrador Falcon, os parâmetros operacionais principais são a percentagem de sólidos na alimentação, a granulometria do minério e o tempo de operação. A geometria do rotor é um fator crítico no desempenho do equipamento. Dependendo do tipo de minério (maior ou menor densidade, por

exemplo), deverá ser projetado um rotor com geometria apropriada (LINS et al., 1992).



**Figura 8 - Concentrador Falcon: modelo descontínuo**

#### **3.1.4. "Multy Gravity Separator" (MGS)**

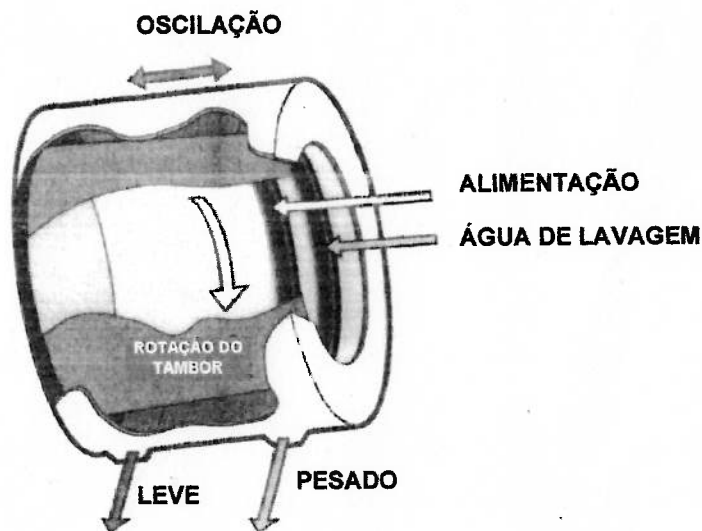
O concentrador MGS (Multy Gravity Separator) é um dos últimos desenvolvimentos de Richard Mozley; ele incorpora num único equipamento os princípios de funcionamento de dois outros equipamentos, quais sejam: a mesa vibratória e a centrífuga (FEDOTOV et al., 1997; FALCON CONC. INC., 1997), citados por SILVA et al. (1998)

O equipamento consiste, basicamente, de um tambor horizontal, ao qual se aplica um movimento de rotação no sentido horário e um movimento de oscilação, semelhante ao usado nas mesas vibratórias. O movimento de rotação do tambor, em torno do seu eixo, gera um campo gravitacional de 8 a 22 g. Sob estas acelerações uma partícula de 2  $\mu\text{m}$  teria o mesmo comportamento que uma partícula de mesma densidade de 45  $\mu\text{m}$  (SILVA et al., 1998).

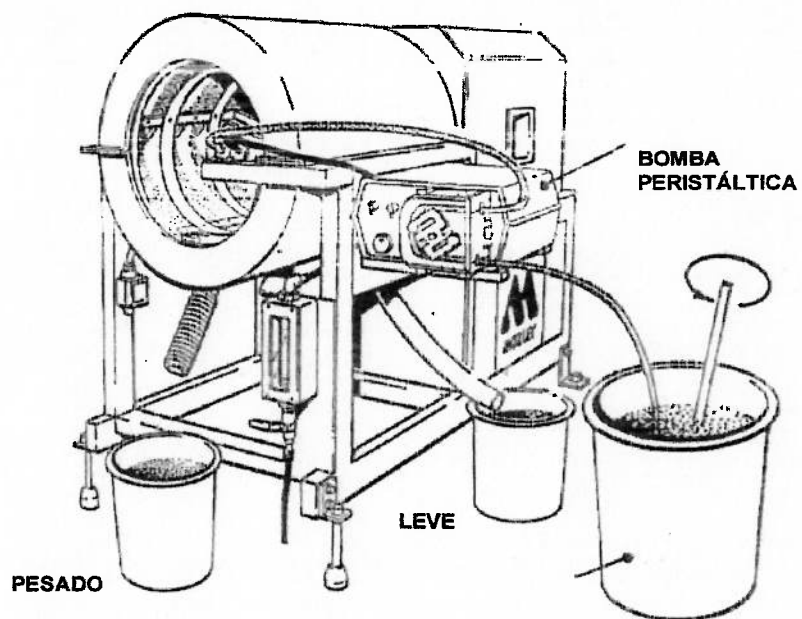
A polpa de minério, com 25 a 35% de sólidos, é alimentada através de um tubo localizado na entrada do tambor. Uma placa de orifício de forma circular reduz a velocidade de entrada da polpa e a distribui ao longo da superfície interna do tambor. As partículas mais pesadas são mais afetadas pelo campo gravitacional e pelo movimento de oscilação do tambor do que as partículas leves, formando um leito estratificado, através do qual se dá a separação. Pela variação do ângulo de inclinação do tambor, pode-se regular a vazão de descarga do rejeito. É introduzida também água de lavagem, a qual promove a remoção de lamas, possibilitando portanto um maior enriquecimento dos concentrados obtidos.

A Figura 9 mostra o princípio de funcionamento do MGS e a Figura 10 mostra o esquema de instalação e de operação deste equipamento, em laboratório.

O MGS tem sido utilizado no beneficiamento de ouro zinco, tântalo, estanho, grafite etc.



**Figura 9 – MGS – Diagrama esquemático do modelo Mozley C902**



**Figura 10 - Forma de instalação do equipamento MGS para a realização de ensaios de laboratório**

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, os trabalhos foram conduzidos em equipamentos tradicionais de concentração gravítica (mesa Mozley e mesa vibratória) e em concentradores centrífugos. A mesa vibratória foi utilizada somente para remoção da pirita de granulometria mais grossa, como a finalidade de preparar a amostra de finos de carvão, não beneficiada, coletada na Cooperminas, para os ensaios no concentrador Knelson. Os trabalhos realizados na mesa Mozley serviram para balizar todos os ensaios de concentração gravítica que foram realizados neste estudo.

As principais etapas envolvidas nos trabalhos de pesquisa em laboratório, visando perseguir o objetivo almejado, foram as seguintes:

- Amostragem dos finos de carvão nos lavadores;
- Preparação das amostras para os ensaios de laboratório e análises químicas;
- Análise granulométrica e determinações de teores de cinzas e enxofre nas frações obtidas;
- Caracterização mineralógica;
- Ensaios em mesa Mozley;
- Ensaios em mesa vibratória;
- Ensaios no concentrador centrífugo Knelson;
- Ensaios no MGS – *Multi-Gravity Separator*, da Mozley;
- Resultados obtidos e discussão;
- Conclusões

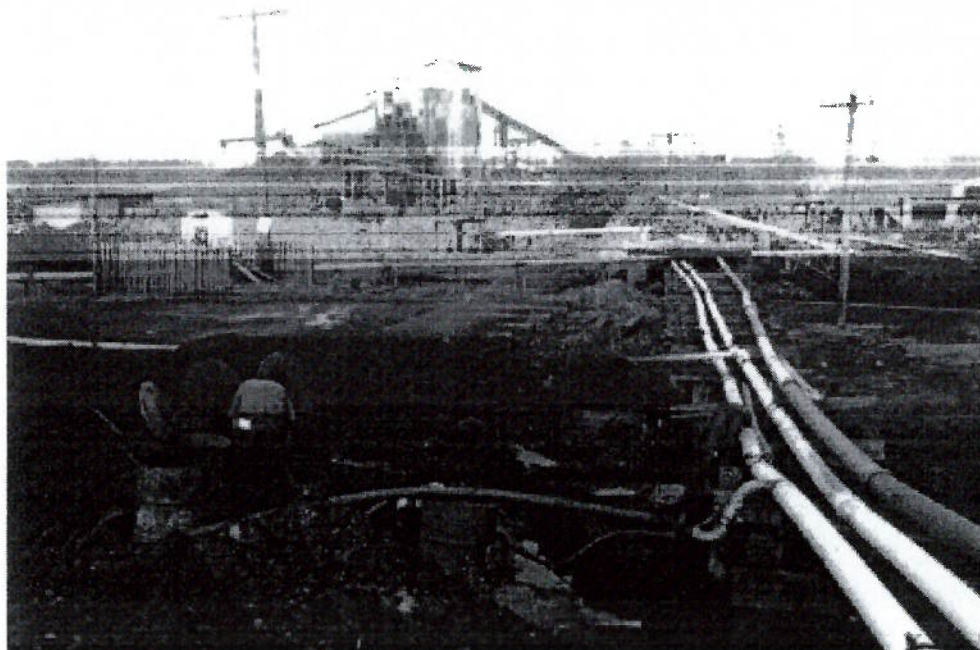
#### **4.1. Amostragem dos Finos de Carvão nos Lavadores**

As amostras de finos de carvão, para este estudo, foram coletadas nos lavadores de carvão da Cooperminas e da Carbonífera Criciúma S. A., ambos localizados no município de Forquilha, próximo da cidade de Criciúma - SC. No lavador da Cooperminas foi coletada amostra de finos de carvão, sem ser beneficiada. No lavador da Carbonífera Criciúma S. A. foi coletada amostra do concentrado de flotação.

Visando tornar a amostragem a mais representativa possível, esta foi realizada tentando cortar transversalmente todo o fluxo de descarga do material, ou seja, da polpa.

Durante a coleta das amostras foram necessários vários períodos de espera para a decantação dos finos nos tambores ou nas bombonas, visando coletar a maior quantidade possível de material, tendo em vista que a percentagem de sólidos na polpa é baixa, em torno de 10%. Tomou-se, ainda, a precaução de deixar uma pequena lâmina d'água acima do nível da parte sólida, contida nos tambores e nas bombonas, para uma melhor conservação do material.

A amostra coletada na Cooperminas é constituída do material passante na peneira desaguadora do carvão grosso que sai do jigge Batac. Nominalmente, este material deveria estar abaixo de 0,59mm (28 malhas). A Figura 11 mostra, em detalhe, o ponto de coleta da amostra no lavador da Cooperminas.



**Figura 11 – Ponto de coleta da amostra, em primeiro plano, e, ao fundo, o lavador da Cooperminas**

As amostras coletadas nos dois lavadores supra mencionados foram acondicionadas em bombonas de plástico e em tambores de 200 l e enviadas, parte para o Cetem, e parte para o Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTM), do Departamento de Engenharia de Minas, da Escola Politécnica da USP. Para o Cetem foi enviada a maior parte da amostra coletada na Cooperminas e para o LTM foi enviada a maior parte da amostra coletada na Carbonífera Criciúma S. A.

A Figura 12 mostra o pessoal do CETEM e da Cooperminas envolvido na amostragem, bem como os tambores de 200 l utilizados na amostragem.



**Figura 12 – Equipe de amostragem, da Cooperminas e Cetem**

Dependendo da frente de lavra que está sendo operada, há uma pequena variação nos teores de cinzas e enxofre nos finos de carvão produzidos, como demonstrou uma segunda amostragem realizada na Cooperminas. Estas variações, porém estão dentro de limites aceitáveis, os quais não chegam a influir nos resultados dos trabalhos. Por outro lado, a avaliação dos resultados dos ensaios foi sempre feita em função dos teores da alimentação dos ensaios.

A amostra de concentrado de flotação, coletada no lavador da Carbonífera Criciúma, denominado Unidade Mineira II, foi amostrada na descarga da tubulação que transporta o concentrado da flotação obtido no circuito de flotação da empresa.

Segundo o boletim de análise granulométrica fornecido pela Carbonífera Criciúma, cerca de 72%, em peso, do material sólido que alimenta a flotação, está abaixo de 74  $\mu\text{m}$  (200 malhas), tendo em vista que este é constituído do overflow da bateria de ciclones autógenos que trata os finos de carvão gerados no lavador. O underflow dos ciclones autógenos alimenta o circuito de espirais de Humphreys,



de onde se retira outro concentrado de finos de carvão, de granulometria mais grossa

#### **4.2. Preparação das Amostras de Finos de Carvão**

Após a chegada das amostras ao Cetem ou ao LTM, os tambores foram esvaziados, procedendo-se, em seguida, à preparação das amostras para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa. Esta preparação constou, basicamente, das seguintes etapas:

- retirada do excesso de água das amostras
- secagem das amostras ao ar livre e depois em estufa, a temperatura  $\leq 70^{\circ}$ ;
- desagregação do material;
- homogeneização do material em pilha alongada;
- retirada de alíquotas para análises químicas, granulométricas, caracterização mineralógica, ensaios de concentração e outros;
- peneiramento para obtenção da granulometria adequada para a alimentação dos equipamentos de concentração utilizados; e
- arquivo do restante de material em sacos plásticos contendo 1 kg e 10 kg de amostra, para os ensaios de concentração subsequentes ou repetições de ensaios e outras análises.

#### **4.3. Análise Granulométrica com Teores de Enxofre e Cinzas das Frações**

As análises granulométricas dos finos de carvão foram realizadas a úmido, com utilização de peneiras da série Tyler, normal. Estas análises foram realizadas para verificar a distribuição granulométrica e as distribuições de cinzas e enxofre nas diferentes frações granulométricas das amostras de finos de carvão coletadas nos lavadores de carvão da Carbonífera Criciúma e Cooperminas.

Para a realização desta análise granulométrica, as amostras foram devidamente secadas, homogeneizadas e quarteadas, pesadas e peneiradas, a úmido. Após a análise granulométrica, as frações granulométricas eram preparadas para a realização de análises químicas, com determinações de teores de cinzas, enxofre total, enxofre pirítico, enxofre sulfático e enxofre orgânico (por diferença), em cada uma das frações.

A preparação das amostras para as análises químicas consistiu da redução de tamanho das partículas de cada amostra, em gral de porcelana, até que todo o material ficasse abaixo de 65 malhas (0,208 mm). Em seguida procedia-se ao quarteamento para a retirada da quantidade necessária de amostra.

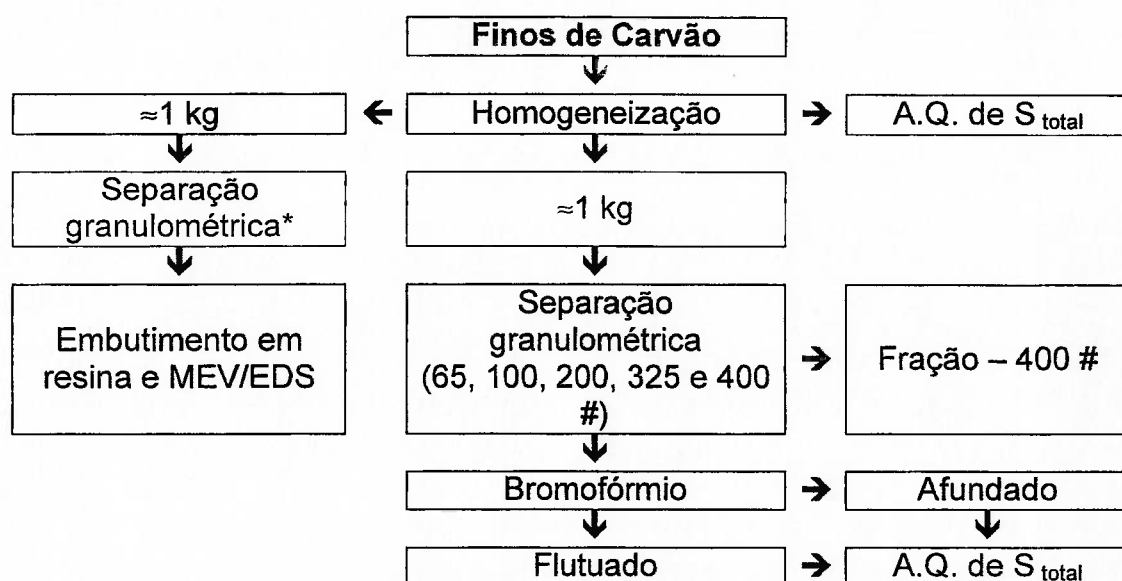
As peneiras da série Tyler que foram utilizadas nas análises granulométricas foram as seguintes: 10, 14, 20, 28, 35, 48, 65, 100, 150, 200, 325, e 400 malhas, correspondentes a aberturas de 1,651, 1,168, 0,833, 0,589, 0,417, 0,295, 0,208, 0,147, 0,104, 0,74, 0,044, e 0,37 mm, respectivamente, dependendo da granulometria da amostra utilizada na análise granulométrica.

#### **4.4. Caracterização Mineralógica**

A caracterização mineralógica foi realizada nos finos de carvão coletados no lavador da Cooperminas.

O objetivo desta caracterização foi verificar: a liberação do carvão, principalmente em relação à pirita, os tipos de associações pirita – carvão, realizar uma avaliação qualitativa das presenças e das formas de associação do enxofre pirítico e do enxofre orgânico nesses finos de carvão, bem como verificar a distribuição das diferentes formas de enxofre na amostra. Para isso, uma amostra de 1 kg de finos de carvão foi enviada para o setor de caracterização mineralógica (STM) do Cetem.

O fluxograma da Figura 13 mostra o procedimento adotado para a caracterização mineralógica dos finos de carvão da Cooperminas.



\* 10, 14, 20, 28, 35, 48, 65, 100, 150, 200, 270, 325, 400 e 635 malhas

**Figura 13 - Fluxograma do procedimento adotado para caracterização da amostra de finos de carvão**

A amostra foi peneirada nas malhas de 0,208; 0,104; 0,053; e 0,037 mm, respectivamente, 65, 150, 270 e 400 malhas (série Tyler). As frações assim obtidas foram quarteadas, sendo que uma parte de cada de cada uma delas foi embutida em resina epoxy aditivada e a outra submetida à separação em líquido denso (bromofórmio,  $d = 2,89 \text{ g/cm}^3$ ). Os produtos flutuados e afundados no bromofórmio foram enviados para análises de enxofre total para estimativa do grau de liberação da pirita da amostra.

As amostras embutidas em resina epoxy foram examinadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) para avaliações semiquantitativa do grau de liberação da pirita, e qualitativa das distribuições de enxofre orgânico e enxofre pirítico.

A não utilização de análises por difração de raios X, apropriadas ao presente estudo, deveu – se a impossibilidades técnicas momentâneas do setor de caracterização mineralógica do CETEM. A mineralogia comentada nesse relatório será inferida em função de resultados de caracterização mineralógica

efetuada em finos de carvão de mesma procedência (Relatório Técnico Cetem n 05 / 97), onde detectou – se quartzo, caulinita, calcita, muscovita, pirita e feldspato como matérias minerais na amostra de carvão.

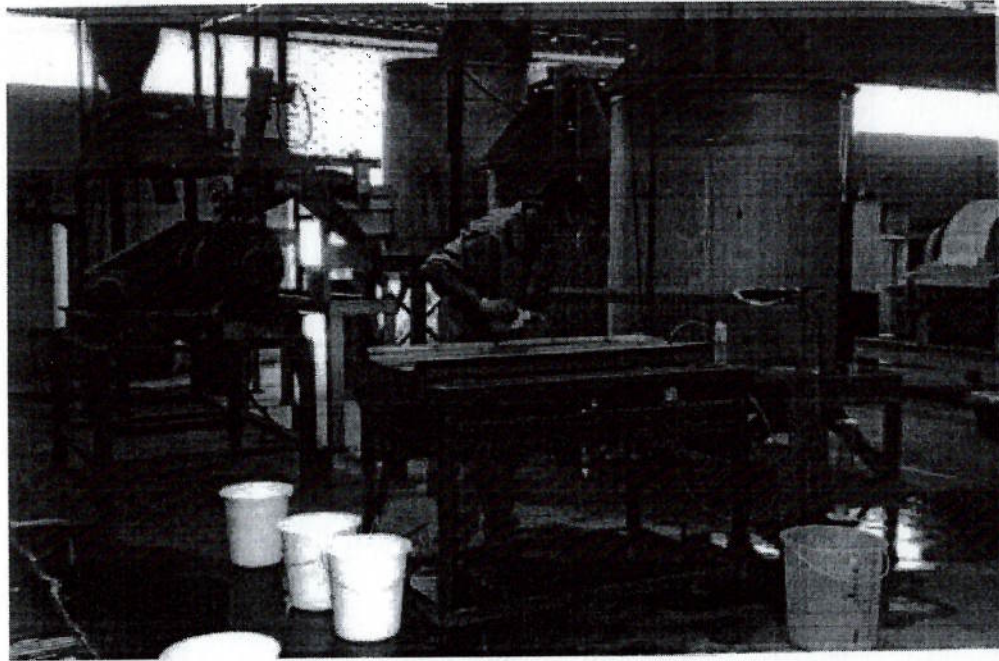
O microscópio de varredura utilizado foi um LEO S 440, equipado com sistema de microanálise por dispersão de energia Link ISIS L 300, com detetor de SiLi Pentafet, janela ultrafina ATW II, de resolução de 133 eV para 5,9 keV. Todas as análises foram executadas com 20 kV de tensão de aceleração de elétrons. As imagens foram geradas predominantemente por detetor de elétrons retro-espalhados (*backscatter elétrons detector – BSD*), onde os níveis de cinzas são proporcionais ao peso atômico médio dos elementos excitados pelo feixe de elétrons durante a varredura, sendo portanto imagens composicionais, com os tons mais claros representando as fases de densidades atômicas médias mais elevadas. A resolução da microanálise por EDS é da ordem de 1  $\mu\text{m}$  de raio em superfície e uma profundidade da ordem de 1,5 a 5  $\mu\text{m}$ , dependendo da densidade do material no ponto analisado (ALCOVER NETO, 2001).

#### **4.5. Ensaios em Mesa Mozley**

A mesa Mozley é um equipamento de laboratório para a concentração de minerais pesados, constituindo-se em uma ferramenta muito útil, para trabalhos de reconhecimento da amostra em laboratório. Os resultados dos ensaios realizados, se bem conduzidos, fornecem indicações importantes da possibilidade ou não de separação, do mineral ou dos minerais pesados contidos na amostra, por métodos de concentração gravítica. No presente trabalho, os ensaios realizados na mesa Mozley tiveram como objetivo avaliar a possibilidade de remoção da pirita contida nos finos de carvão de Santa Catarina por métodos de concentração gravítica, verificar a distribuição granulométrica da pirita, e verificar a existência de partículas mistas na amostra em estudo.

A mesa Mozley utilizada nos ensaios tem as seguintes características: 122 cm de comprimento, 91,2 cm de largura e 91,2 cm de altura. A bandeja onde é

colocada a amostra para a realização dos ensaios, é de aço inoxidável, forma ligeiramente cônica, e de dimensões 122 x 45,7 cm. A amplitude de oscilação transversal varia de 5 a 12 cm. A Figura 14 mostra a mesa Mozley acima referida instalada no Cetem.



**Figura 14 – Mesa Mozley do Cetem**

Os ensaios na mesa Mozley foram realizados com as amostras de finos de carvão coletadas na Cooperminas e na Carbonífera Criciúma.

As variáveis operacionais deste equipamento, são (Prospecto da Mesa Mozley):

- ângulo de inclinação longitudinal;
- amplitude de oscilação;
- frequência de oscilação;
- vazão de água de irrigação; e
- vazão de água de lavagem.

Na realização dos ensaios, uma amostra seca de 50 g de carvão era colocada na extremidade da mesa, oposta à descarga. Com o auxílio de uma pissete, adicionava-se água, para desaglomerar bem as partículas e molhar a amostra, para que a mesma pudesse fluir facilmente ao longo da mesa. Em seguida, a mesa era colocada em operação, e coletava - se o material na descarga, em intervalos de 1 min, num total de 4 min. Depois de coletadas as amostras da descarga, nos tempos determinados, o material que permanecia na mesa, no final da operação, era o concentrado de pirita, ou seja, a quantidade de pirita que se conseguiu remover da amostra, naquele ensaio. Os produtos recolhidos na descarga, nos tempos determinados, e aquele que permanecia na mesa no final da operação, eram secados, pesados e realizadas análises de enxofre total e enxofre pirítico nos mesmos. Todos os ensaios foram realizados em duplicata, para verificar a reprodutibilidade dos mesmos.

Estes ensaios procuraram verificar a influência de variáveis como ângulo de inclinação ( $1,75^\circ$  e  $3,61^\circ$ ), amplitude de oscilação (63,5 e 165 mm), frequência de oscilação da mesa (60 e 80 rpm), vazão da água de irrigação (1,8 e 3,6 l/min) e vazão da água de lavagem (1 e 2 l/min) na remoção de pirita.

Devido não se dispor de massa necessária para realização da determinação de enxofre pirítico e enxofre total, foi necessário considerar apenas dois produtos: concentrado de carvão (produto obtido na descarga, após 1 min de operação da mesa) e rejeito (produtos obtidos nas descargas, nos 3 intervalos de 1 min. subsequentes + concentrado piritoso que permaneceu na mesa, no final do ensaio).

#### **4.6. Ensaio em Mesa Vibratória**

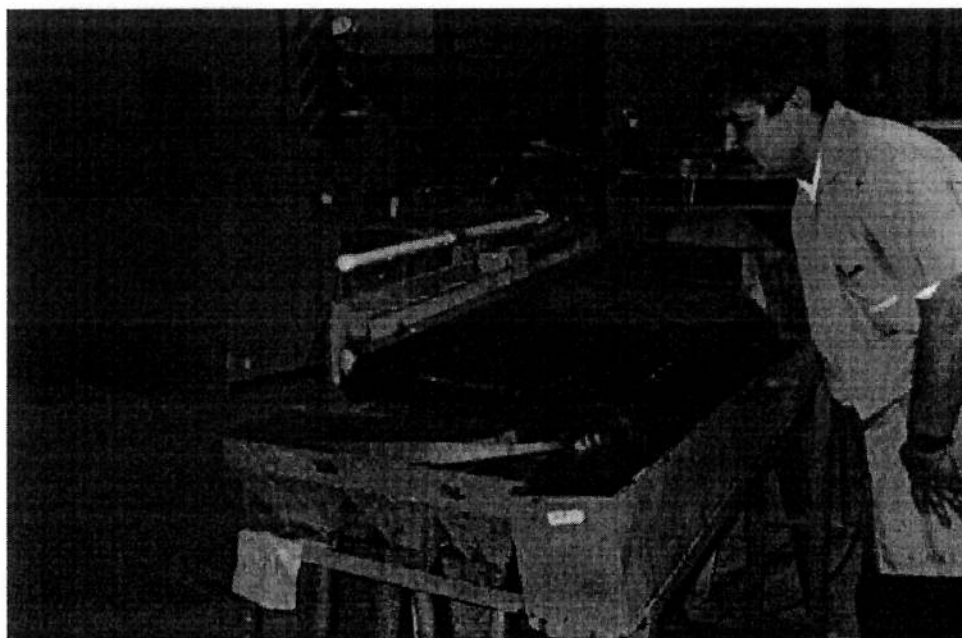
Os ensaios realizados na mesa vibratória tiveram por finalidade a remoção da maior quantidade possível de pirita, principalmente a de granulometria mais grossa existente na amostra, obtendo-se, assim, dois produtos: um concentrado piritoso e um outro produto com menor teor de enxofre pirítico. A pirita ainda remanescente neste produto mais leve da mesa, certamente será aquela de

granulometria mais fina, a qual deverá ser removida pelo concentrador centrífugo Knelson. Os produtos parcialmente depiritizados na mesa constituíram as alimentações do concentrador centrífugo Knelson.

A mesa vibratória utilizada nos ensaios realizados no Cetem, é do tipo *Deister*, de laboratório, de dimensões 128 x 55 cm. O alimentador usado para alimentar os finos de carvão na mesa é do tipo calha vibratória, marca Jeffrey Traylor. A vazão de água nos ensaios, foi controlada por um rotâmetro, com escala variando de 1 a 10 GPM (galões por minuto). A Figura 15 mostra a mesa vibratória utilizada nos ensaios.

Nos ensaios realizados em mesa vibratória foram verificados os efeitos das seguintes variáveis operacionais, na remoção da pirita:

- ângulo de inclinação da mesa;
- vazão de alimentação de sólidos; e
- vazão de água.



**Figura 15 – Mesa vibratória Deister do Cetem**

A amplitude e a frequência de oscilação foram determinadas nos ensaios exploratórios e mantidas fixas na realização de todos os ensaios de depiritização.

Para facilitar a verificação da variação do ângulo de inclinação transversal da mesa, durante os ensaios de remoção de pirita, foram marcadas, em um disco de alumínio, várias posições que correspondem a diferentes ângulos de inclinação da mesa. As posições marcadas no disco foram 0; 1; 2; e 3, correspondendo aos ângulos de inclinação 0,5; 1,5; 2; e 2,5°, respectivamente.

A vazão de alimentação de sólidos foi na faixa de 130 a 160 g/min, constituindo uma polpa com percentagem de sólidos em torno de 25%.

#### **4.7. Ensaios no Concentrador Centrífugo Knelson**

As características do concentrador centrífugo Knelson existente no C utilizado para a realização dos ensaios são as seguintes:

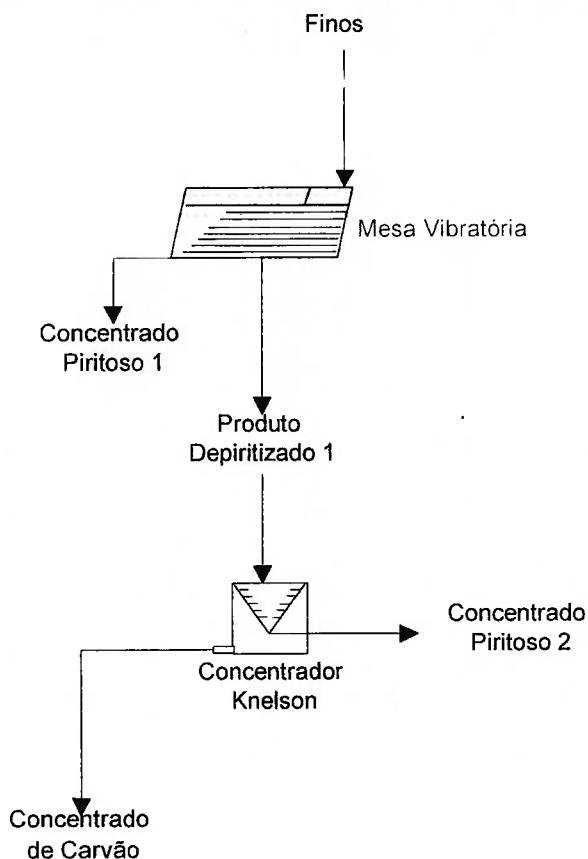
- diâmetro do recipiente externo: 19 cm;
- diâmetro e altura do recipiente onde é alojada a cesta: 9x9 cm; e
- diâmetro e altura da cesta :

Acoplado ao concentrador centrífugo Knelson, existente no Cetem, foi instalado um manômetro, com escala de 0 a 15 psi (libra / polegada<sup>2</sup>), para controle da vazão de água de fluidização.

Por ser o concentrador Knelson um equipamento que funciona de forma descontínua, e por ter sido projetado para tratar minérios de baixo teor, da ordem de ppm (ouro), a sua alimentação foi constituída de uma amostra de finos de carvão anteriormente depiritizada em mesa vibratória, tal como mostra a Figura 16.

Por outro lado, a pirita de granulometria mais grosseira é facilmente removida em equipamentos tradicionais de concentração gravítica, como a própria mesa vibratória, espirais concentradoras e ciclones autógenos, não precisando passar pelo concentrador Knelson.





**Figura 16 – Esquema de preparação das amostras para os ensaios no concentrador Knelson**

As variáveis que foram estudadas nos ensaios realizados no concentrador Knelson, foram as seguintes:

- granulometria de alimentação;
- vazão de alimentação de polpa;
- percentagem de sólidos na polpa de alimentação da centrífuga; e
- pressão da água de contra pressão ou de fluidização.

A rotação da centrífuga foi mantida constante durante a realização de todos os ensaios.

As percentagens de sólidos na polpa de alimentação variaram na faixa de 10 a 30%. As pressões de água de contrapressão variaram na faixa de 4 a 12 psi (libra / polegada<sup>2</sup>)

#### 4.8. Ensaio no MGS (Multi Gravity Separator)

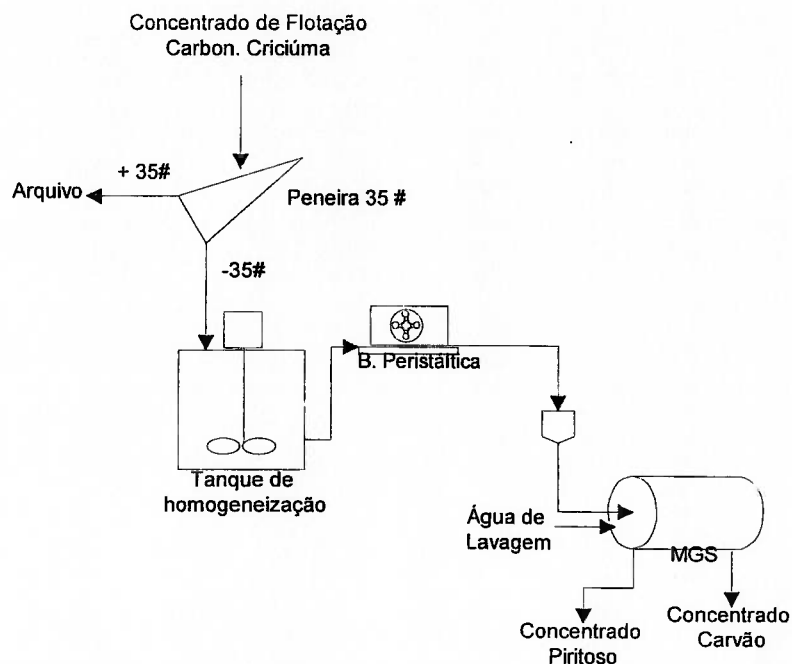
O equipamento MGS que foi utilizado para a realização dos ensaios é o modelo C 900, tendo as seguintes características técnicas:

- dimensões: 162 x 71 x 109 cm
- capacidade: até 200 kg / h;
- velocidade de rotação do tambor: 100 a 240 rpm, para a voltagem de 220 V;
- frequência de oscilação: 4 a 5,7 cps (ciclos por segundo);
- amplitude de oscilação: 10 a 20 mm;
- granulometria de alimentação dos sólidos: 1 a 500  $\mu\text{m}$ ;
- variação do ângulo de inclinação: 0 a 9°; e
- vazão de água de lavagem: 0 a 10 L / min (rotâmetro)

Os ensaios com este equipamento foram realizados no LTM (EPUSP), onde existe este tipo de equipamento, já instalado, com possibilidade de realização de trabalhos em escalas de laboratório e usina piloto. Os ensaios foram realizados em escala semicontínua.

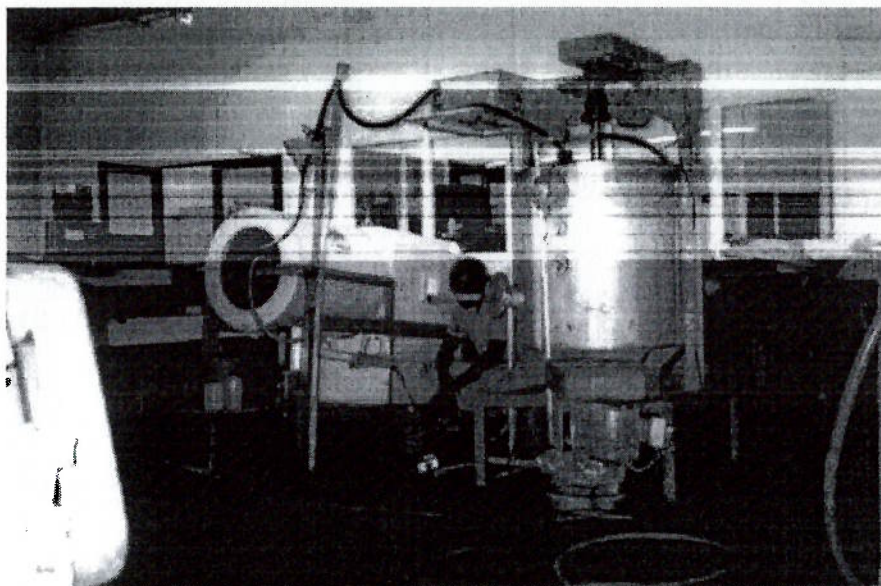
O circuito utilizado para a realização dos ensaios constou de um tanque condicionador, com capacidade de 315 L de polpa, provido com sistema de agitação à base de hélice e de bomba vertical para recirculação da polpa para o próprio tanque / condicionador; bomba peristáltica para transportar e controlar a alimentação de polpa do tanque de homogeneização para o MGS; bomba d'água para a alimentação da água de lavagem; rotâmetro, com escala de 0 a 10 l/min para controle da vazão de água de lavagem e do próprio MGS (equipamento principal).

A alimentação do MGS foi constituída da fração – 35 # (410 $\mu$ m) do concentrado de flotação. A Figura 17 mostra o esquema de preparação da amostra para alimentar o MGS, tirando a fração +35 # e as instalações utilizadas nos ensaios.

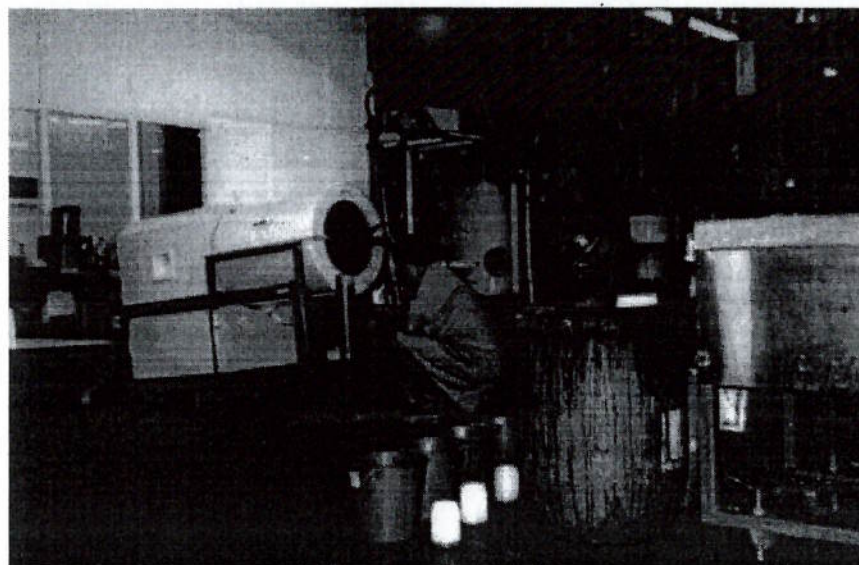


**Figura 17 – Esquema de preparação da amostra para ensaios no MGS e as instalações utilizadas nos ensaios no LTM**

As Figuras 18 e 19 mostram a prática de mostragem dos produtos: do MGS (concentrado de carvão e concentrado piritoso, respectivamente).



**Figura 18 – Amostragem de concentrado de carvão no MGS**



**Figura 19 – Amostragem do concentrado piritoso no MGS**

O sistema de agitação no tanque e a recirculação da polpa para o tanque através da bomba vertical, propiciaram uma boa homogeneização da polpa que alimentava o MGS, evitando que o material sólido sedimentasse no fundo do tanque. Esta boa homogeneização da polpa no tanque foi comprovada através das determinações de percentagem de sólidos na polpa, densidade de polpa e medidas de vazão de alimentação da polpa, nas amostragens realizadas na

mangueira que transportava a polpa da bomba vertical para o tanque; e na alimentação da centrífuga MGS, através da bomba peristáltica, antes e no final dos ensaios.

A granulometria de alimentação dos finos de carvão foi abaixo de  $0,412\ \mu\text{m}$  (35 malhas).

As variáveis estudadas no período de realização dos ensaios foram as seguintes:

- vazão de alimentação da polpa (2 a 5 l/mim);
- percentagem de sólidos da polpa (12; 15; 20; 23; 25; e 30%);
- velocidade de rotação do tambor (150; 200; e 220 rpm);
- inclinação do tambor (4,5; 5; e  $6^\circ$ ); e
- vazão de água de lavagem (1; 1,5; 2; e 2,5 l/min.)

A oscilação do tambor foi mantida constante, em 4,8 c p s, durante a realização de todos os ensaios.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Análise Granulométrica com Teores de Cinzas e Enxofre das Frações

#### 5.1.1. Finos de carvão da Cooperminas

Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Analisando a Tabela 1, observa-se que, à medida que diminui a granulometria, aumentam os teores de enxofre das frações. Verifica-se que o teor de enxofre pirítico é bem mais elevado na fração granulométrica entre 0,147 e 0,044 mm (100 e 325 malhas, respectivamente), variando de 1,9 a 2,25%. Esta fração representa 20% da massa total da amostra; e nela os métodos tradicionais de concentração gravítica já não mais respondem com a eficiência desejada.

Observa-se, também, nesta Tabela, um teor muito elevado de cinzas distribuído por todas as frações granulométricas da amostra. Porém abaixo de 325 malhas, esse teor de cinzas passa ser superior a 72%. A massa de material correspondente a esta faixa granulométrica é de cerca de 40% do total da amostra.

**Tabela 1 – Análise granulométrica e teores de enxofre e de cinzas das respectivas frações**

Peneiras Malhas Tyler	Aberturas (mm)	Retido (%)	S <sub>TOTAL</sub> (%)	S <sub>PIRÍTICO</sub> (%)	Cinzas (%)	Acum. %	% Distribuição/ Fração	
							S <sub>TOTAL</sub>	S <sub>PIRÍTICO</sub>
28	0,589	7,92	1,1	0,59	32,2	7,92	4,7	4,1
35	0,417	7,38	1,4	0,65	46,41	15,30	5,6	4,2
48	0,295	6,21	1,7	0,77	34,71	21,51	5,7	4,2
65	0,208	9,05	2,2	1,08	39,8	30,56	10,9	8,5
100	0,147	9,03	2,4	1,37	42,46	39,59	11,8	10,8
150	0,104	5,50	2,8	1,88	47,48	45,09	8,4	9,1
200	0,074	5,18	3,3	1,96	51,38	50,27	9,4	8,9
270	0,053	5,82	3,4	2,25	56,64	56,09	10,8	11,5
325	0,044	3,83	3,0	2,15	61,32	59,92	6,3	7,2
400	0,037	3,30	2,4	1,67	70,04	63,22	4,3	4,8
-400	-0,037	36,78	1,1	0,83	72,83	100,00	22,1	26,7
Am. Calc.	-	100,00	1,83	1,14	55,58	-	100,0	100,0

**Tabela 2 – Análise granulométrica, mostrando os valores acumulados de teores de cinzas e de enxofre total e pirítico das frações**

Peneiras Malha Tyler	Aberturas (mm)	Peso Retido Acum. (%)	Cinzas Acum. (%)	S <sub>TOTAL</sub> Acum.(%)	S <sub>PIRÍTICO</sub> Acum.(%)
28	0,589	7,92	32,21	1,13	0,59
35	0,417	15,30	39,21	1,26	0,62
48	0,295	21,51	37,92	1,39	0,66
35	0,208	30,56	38,49	1,63	0,79
100	0,147	39,59	39,41	1,81	0,92
150	0,104	45,09	40,41	1,93	1,04
200	0,074	50,28	41,59	2,08	1,14
270	0,053	56,09	43,18	2,22	1,26
325	0,044	59,92	44,31	2,27	1,31
400	0,037	63,22	45,69	2,28	1,33
-400	-0,037	100,00	55,57	1,85	1,15

### 5.1.2. Finos de carvão da Carbonífera Criciúma

Os resultados são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Análise granulométrica dos finos de carvão e teores de enxofre total, pirítico e orgânico**

Peneiras Malha Tyler	Aberturas (mm)	Peso Retido %	Peso Retido Acum. (%)	S <sub>TOTAL</sub> (%)	S <sub>PIRÍTICO</sub> (%)	S <sub>ORGÂNICO</sub> (%)
35	0,417	1,9	1,9	1,64	0,72	0,90
48	0,295	8,1	10,0	1,38	0,52	0,85
35	0,208	3,1	23,1	1,42	0,55	0,85
100	0,147	15,5	38,6	1,67	0,74	0,92
150	0,104	10,8	49,4	1,92	0,95	0,96
200	0,074	9,1	58,5	2,73	1,86	0,85
270	0,053	7,6	66,1	3,12	1,97	1,13
325	0,044	3,3	69,4	2,8	nd	nd
400	0,037	3,1	72,5	3,34	nd	nd
-400	-0,037	27,5	100,00	2,09	1,24	0,84
Am. Calc.	-	100,0	-	2,05	-	-
Am. Anal.	-	-	-	2,0	1,12	0,82
Alim. MGS	-	-	-	1,91	0,96	-

## 5.2. Caracterização Mineralógica

Os resultados das determinações de enxofre total e enxofre pirítico realizadas nas frações da análise granulométrica dos finos de carvão coletados na Cooperminas, mostraram a presença de uma quantidade relativamente grande de enxofre orgânico nos finos de carvão de Santa Catarina

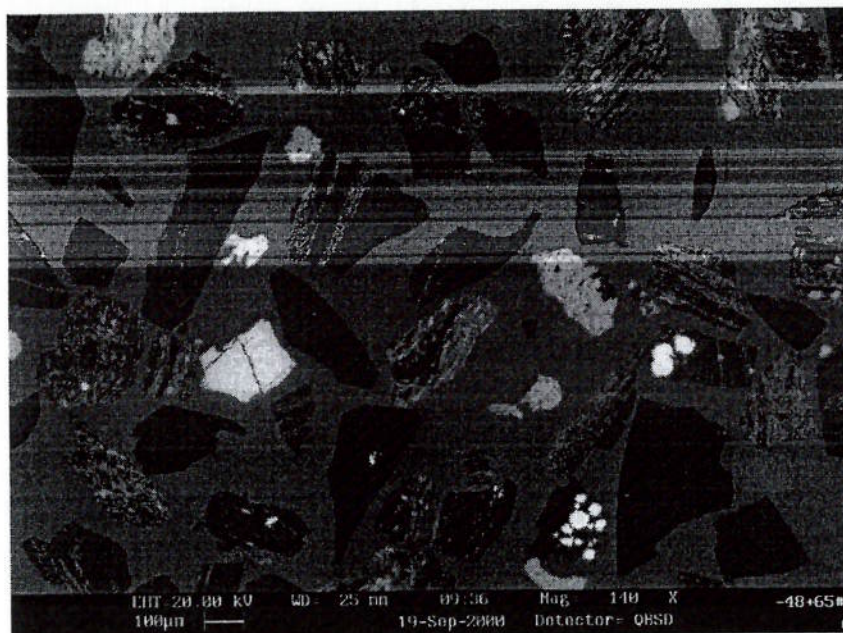
Os ensaios densimétricos realizados nas frações granulométricas : - 1,651 + 0,208; - 0,208 + 0,149; - 0,149 + 0,074; - 0,074 + 0,044; -0,044 + 0,037; - 0,037 mm, respectivamente, - 10 + 65; - 65 + 100; -100 + 200; - 200 + 325; - 325 + 400; e - 400 malhas, mostraram que as percentagens de enxofre total e enxofre pirítico aumentam bastante na faixa granulométrica entre 0,208 e 0,037 mm, respectivamente, entre 65 e 400 malhas, como mostra a Tabela 4.

**Tabela 4 - Distribuição percentual de enxofre nas frações flutuadas e afundadas dos finos de carvão da Cooperminas (ALCOVER, 1996; ALCOVER, 2001)**

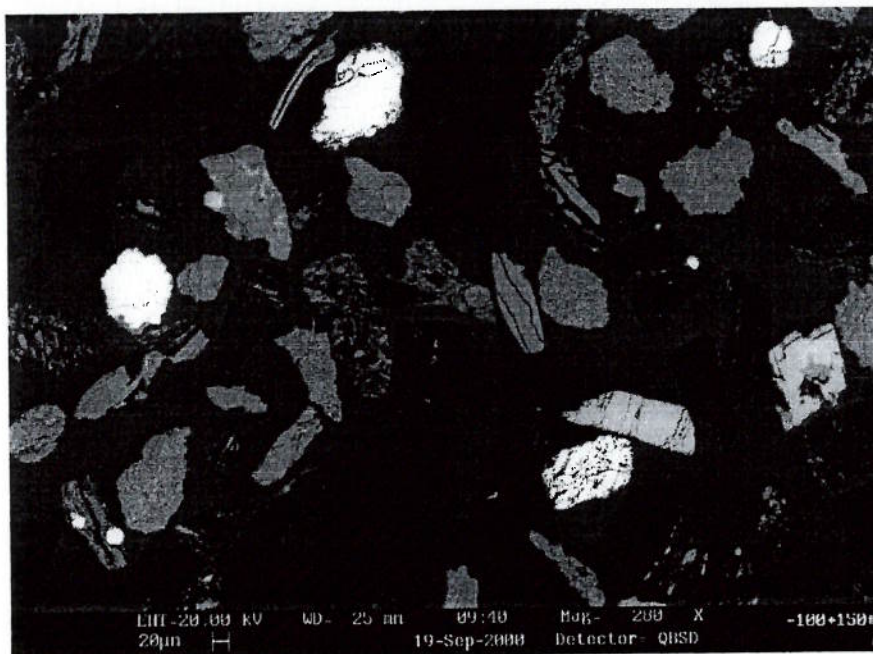
Fração mm	Retido % massa	Flutuado		Afundado		% S <sub>total</sub> Calculada
		% massa	% S <sub>total</sub>	% massa	% S <sub>total</sub>	
0,210	28,19	99,65	1,31	0,35	33,78	1,42
0,149	10,67	97,54	1,22	2,46	40,15	2,18
0,074	13,30	95,20	1,19	4,80	40,22	3,06
0,044	9,34	93,39	0,93	6,61	38,08	3,38
0,037	4,68	92,42	0,67	7,58	29,21	2,83
- 0,037	33,82	nd	nd	nd	nd	1,54

As imagens das Figuras 20, 21, 22 e 23 (ALCOVER, 2001), realizadas nas faixas granulométricas - 295 + 208; - 147 + 104; - 74 + 53; e - 37 + 20 µm, respectivamente, - 48 + 65; - 100 + 150; - 200 + 270; e - 400 + 635; mostram, qualitativamente, a liberação da pirita em relação ao carvão e as associações (microinclusões) de pirita no carvão. Estas imagens mostram que existem grãos de pirita livres e associados ao carvão desde as frações mais grosseiras até as mais finas.

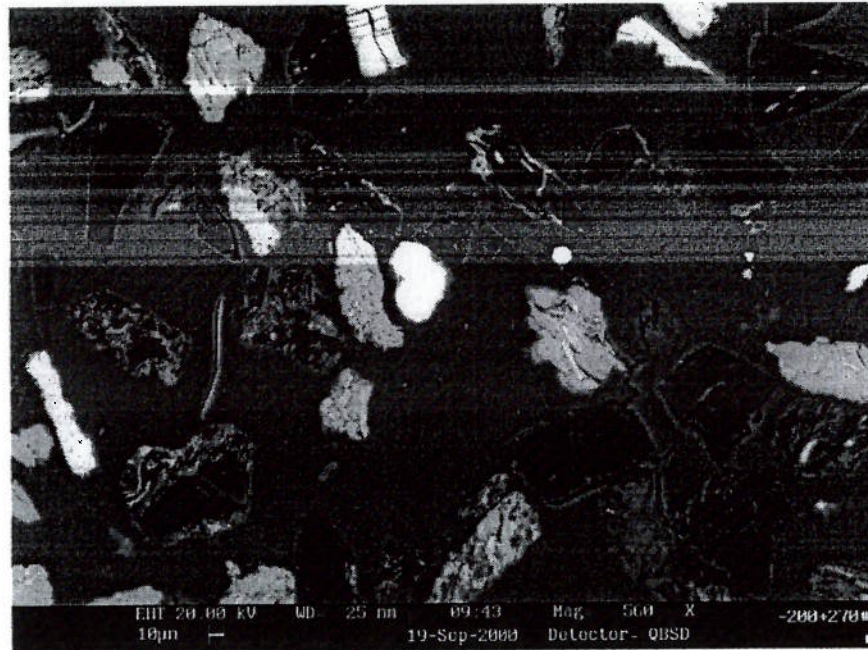




**Figura 20 - Imagem (BSD/MEV) de partículas -48 + 65 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicatos (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy aditivada.**



**Figura 21 - Imagem (BSD/MEV) de partículas -100 + 150 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicatos (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy.**

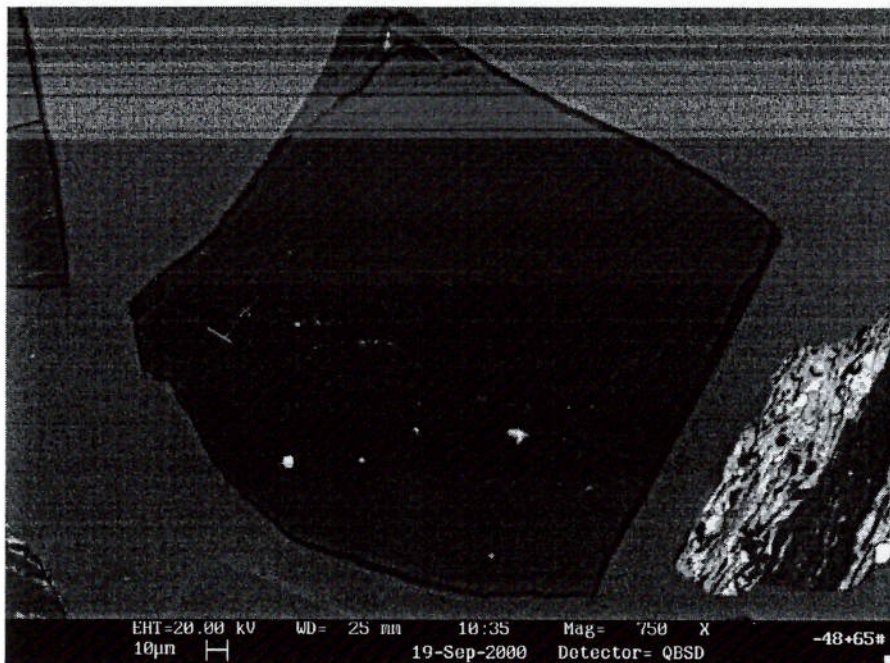


**Figura 22 – Imagem (BSD/MEV) de partículas –200 + 270 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicatos (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy.**



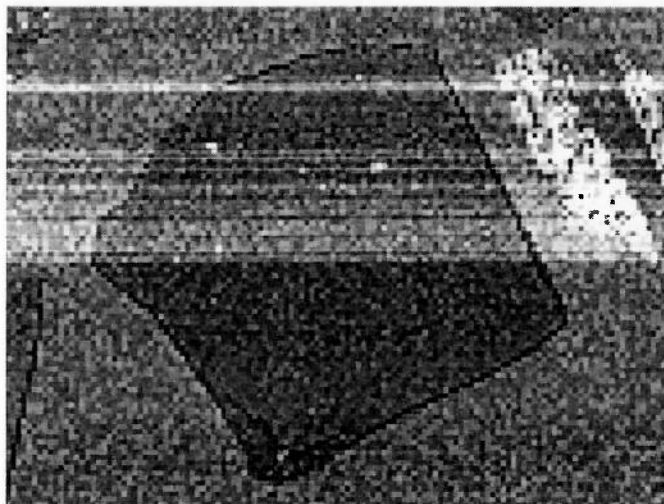
**Figura 23 – Imagem (BSD/MEV) de partículas –400 + 635 # contendo carvão (cinza mais escuro), silicatos (cinza médio) e pirita (cinza mais claro/branco) embutidas em resina epoxy.**

A Figura 24 mostra um grão de carvão em detalhe onde foram caracterizadas, via EDS, microinclusões de pirita.

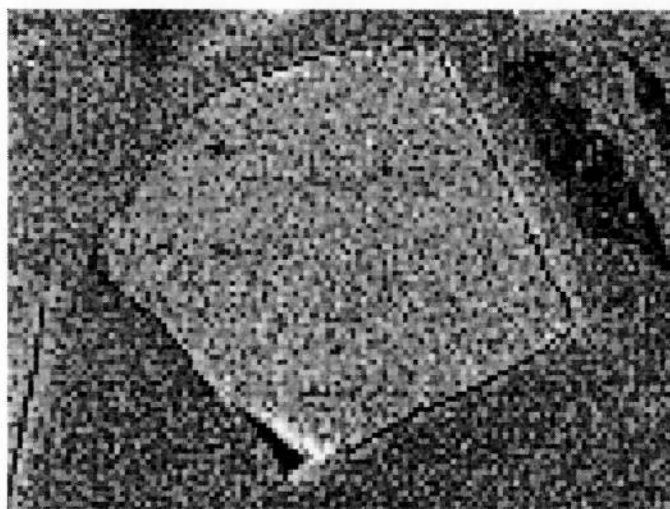


**Figura 24 – Detalhe de microinclusões de pirita e silicatos em partícula em partícula de carvão**

As imagens das Figuras 25, 26, 27 e 28 representam mapeamento EDS dos elementos C, S e Fe efetuado sobre a mesma partícula de carvão da Figura 12 (imagem invertida). A detecção de enxofre e não detecção de ferro na superfície do grão de carvão é um indicativo da grande presença de enxofre orgânico (não pirítico) associado aos finos de carvão de Santa Catarina (ALCOVER, 2001).



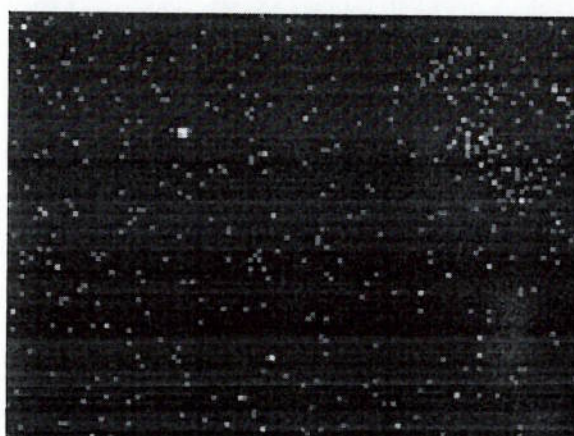
**Figura 25 – Imagem (MEV/EDS) de corte aleatório em grão de carvão**



**Figura 26 – Mapeamento de carbono na superfície representada pela imagem da Figura 24**



**Figura 27 – Mapeamento de enxofre na superfície representada pela imagem da Figura 24**



**Figura 28 – Mapeamento de ferro na superfície representada pela imagem da Figura 24**

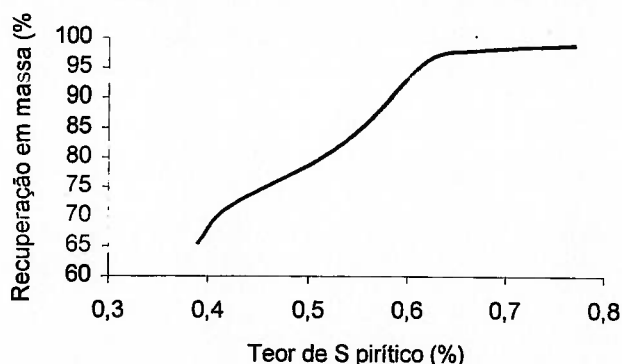
### **5.3. Ensaio em Mesa Mozley**

Os resultados dos ensaios em mesa Mozley (Tabela 5) mostraram ser possível a obtenção de um produto com 0,5 % de enxofre pirítico, nos métodos de concentração gravítica, com uma recuperação em massa do concentrado de aproximadamente 80 %. Ou a obtenção de um concentrado com 0,4% de enxofre

pirítico e uma recuperação em massa de aproximadamente 66%. A Figura 29 foi montada considerando os ensaios mais significativos da Tabela 5.

**Tabela 5 – Resultados obtidos nos ensaios em mesa Mozley, (amostra da Cooperminas)**

Nº	Condições Operacionais					Massa Retida (%)		S <sub>TOTAL</sub> (%)		S <sub>PIRÍTICO</sub> (%)		Cinzas (%)	
	A	B	C	D	E	Conc.	Rej.	Conc	Rej.	Conc.	Rej.	Conc.	Rej.
1	63,5	80	3,61	3,6	1,0	95,10	4,70	1,20	4,55			52,45	78,55
2	63,5	80	3,61	1,8	1,0	90,65	9,35	1,10	7,30			50,35	80,00
3	63,5	80	3,61	1,8	2,0	85,63	14,37	1,05	5,35			52,15	80,35
4	63,5	80	3,61	3,6	2,0	90,77	9,23	1,15	7,10			51,45	76,50
5	165	80	3,61	3,6	1,0	94,27	5,73	0,99	8,75	0,70	7,40	51,95	72,95
6	165	80	3,61	1,8	1,0	96,08	3,92	1,00	13,30	0,62	10,70	52,45	79,10
7	165	80	3,61	1,8	2,0	97,90	2,10	1,20	21,30	0,67	16,05	54,90	
8	165	80	3,61	3,6	2,0	98,77	1,23	1,35	28,65	0,77	20,70	53,25	
9	165	60	3,61	3,6	1,0	84,65	15,35	1,05	5,60	0,51		47,40	84,00
10	165	60	3,61	1,8	1,0	85,98	14,02	0,96	5,30	0,56	4,10	48,10	84,75
11	165	60	3,61	1,8	2,0	79,59	20,41	0,88	4,25	0,51	3,15	46,35	80,40
12	165	60	3,61	3,6	2,0	84,30	15,70	1,05	5,00	0,57	3,75	48,35	79,25
13	63,5	60	3,61	1,8	1,0	64,73	35,27			0,42	1,80	43,80	71,70
14	63,5	60	3,61	1,8	2,0	65,57	34,43			0,39	2,02	43,50	70,05
15	63,5	60	3,61	3,6	2,0	71,42	28,58			0,42	2,15	45,65	72,15
16	63,5	60	3,61	3,6	1,0	70,60	29,40			0,42	2,00	46,55	69,20
17	63,5	80	1,75	3,6	1,0	66,42	33,58						
18	63,5	80	1,75	1,8	1,0	64,89	35,11						
19	63,5	80	1,75	1,8	2,0	66,47	33,53						
20	63,5	80	1,75	3,6	2,0	73,77	26,23						
21	63,5	60	1,75	1,8	1,0	62,14	37,86						
22	63,5	60	1,75	1,8	2,0	69,46	30,54						
23	63,5	60	1,75	3,6	2,0	73,88	26,12						
24	63,5	60	1,75	3,6	1,0	69,77	30,20						
25	165	80	1,75	3,6	1,0	83,03	16,97						
26	165	80	1,75	1,8	1,0	76,06	23,94						
27	165	80	1,75	1,8	2,0	80,26	19,74						
28	165	80	1,75	3,6	2,0	88,73	11,27						
29	165	60	1,75	3,6	1,0	89,73	10,27						
30	165	60	1,75	1,8	1,0	87,67	12,33						
31	165	60	1,75	1,8	2,0	86,43	13,57						
32	165	60	1,75	3,6	2,0	92,94	7,06						



**Figura 29 – Curva de recuperação em massa (%) vs. teor de enxofre pirítico acumulado (%), obtido na mesa Mozley**

Para a menor amplitude utilizada, quanto maior foi a frequência, maior foi a recuperação em massa do concentrado. Observou-se que para o maior ângulo de inclinação, quanto maior foi a frequência, maior foi a recuperação em massa. No entanto, para a frequência menor, não foram observadas diferenças significativas na recuperação em massa dos produtos. Para a menor inclinação da mesa, quanto maior for a frequência, menor será a recuperação em massa.

A – Amplitude (mm); B – Frequência (rpm); C – Ângulo de inclinação da mesa (°); D – Água de irrigação (l/min); E – Água de lavagem (l/min);

#### 5.4. Ensaio em Mesa Vibratória

Os ensaios realizados na mesa vibratória tiveram por finalidade remover a maior quantidade possível de pirita existente nos finos de carvão, principalmente a de granulometria mais grossa, visando preparar a amostra para os ensaios no concentrador centrífugo Knelson, que, devido às suas características, é indicado para tratar somente minérios com baixo teor de minerais pesados, como o ouro. A cesta onde se concentram os minerais pesados é de volume relativamente pequeno, e por isto, enche rapidamente.

Os ensaios de mesagem realizados apresentaram um percentual de redução de enxofre total da ordem 20%, passando de um teor de

aproximadamente 2% na alimentação para um teor de cerca de 1,6% no produto depiritizado, com uma recuperação em massa da ordem de 90%. Este produto com 1,6% de enxofre total e 1,34 % de enxofre pirítico obtido com os ensaios na depiritização na mesa vibratória constituiu a alimentação para os ensaios na centrífuga Knelson.

### **5.5. Ensaios no Concentrador Centrífugo Knelson**

No concentrador Knelson os ensaios foram realizados com os finos de carvão coletados na Cooperminas. Estes finos são constituídos do material passante nas peneiras desaguadoras do carvão grosso que é produzido no jigue Batac da empresa. Nominalmente, a abertura destas peneiras desaguadoras é de 0,59 mm (28 malhas).

Antes de alimentar o concentrador Knelson, estes finos de carvão foram submetidos a ensaios em mesa vibratória para a retirada da maior quantidade possível de pirita destes finos, principalmente a pirita de granulometria mais grossa, por dois motivos: 1) conseguir realizar ensaios de depiritização de finos de carvão no Knelson; 2) a pirita que saísse na mesa vibratória não deveria ser retirada no Knelson, pois a separação na mesa é muito menos dispendiosa, além de ser um equipamento muito fácil de operar.

Em ensaios anteriores, realizados com finos de carvão de Santa Catarina, sem realizar uma depiritização prévia, não foi possível concluir nada, pois a cesta do concentrador Knelson enchia em poucos segundos de operação.

Depois da realização de vários ensaios exploratórios no concentrador centrífugo Knelson do Cetem, verificou-se que as variáveis de maior efeito neste tipo de concentrador são a pressão da água de fluidização do leito e a percentagem de sólidos na polpa de alimentação. Baseando-se nisto, foi feita uma programação de ensaios na qual a pressão da água de fluidização foi variada na faixa de 4 a 12 psi (libra / polegada<sup>2</sup>) e a percentagem de sólidos, na faixa de 10 a 30% de sólidos.



As Tabelas, 6, 7, 8, 9 e 10 mostram os resultados obtidos, com a realização destes ensaios.

**Tabela 6 – Resultados de ensaios no concentrador centrífugo Knelson com 10% de sólidos**

<b>KNELSON (10% SÓLIDOS)</b>					
<b>P (psi)</b>	<b>Duração Ensaio (seg)</b>	<b>Conc. Carvão (Leve)</b>		<b>Rejeito. Piritoso (Pesado)</b>	
		<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>	<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>
4	30	89,4	1,33	10,6	2,8
4	60	90,0	1,29	10,0	3,12
4	90	90,8	1,32	9,2	3,50
4	120	91,9	1,30	8,1	3,18
8	30	81,6	1,31	18,4	2,66
8	60	89,6	1,24	10,4	2,15
8	75	96,0	1,29	4,0	3,67
12	30	80,4	1,33	19,6	2,80
12	60	92,7	1,30	7,3	3,19
12	90	99,0	1,29	1,0	4,33

**Tabela 7 – Resultados de ensaios no concentrador centrífugo Knelson com 15% de sólidos**

<b>KNELSON (15% SÓLIDOS)</b>					
<b>P (psi)</b>	<b>Duração Ensaio (seg)</b>	<b>Conc. Carvão(Leve)</b>		<b>Rejeito. Piritoso (Pesado)</b>	
		<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>	<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>
4	30	82,9	1,34	17,1	3,03
4	60	91,7	1,21	8,3	3,29
4	90	89,6	1,11	10,4	2,55
4	120	92,1	1,37	7,9	3,86
8	30	84,0	1,39	16,0	3,18
8	60	92,6	1,26	7,4	3,55
8	90	59,7	1,18	40,3	2,54
12	30	84,0	1,40	16,0	3,19
12	60	86,5	1,20	13,5	3,66
12	90	96,7	1,19	3,3	3,23

**Tabela 8 – Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 20% de sólidos**

<b><i>KNELSON (20% SÓLIDOS)</i></b>					
<b>P (psi)</b>	<b>Duração Ensaio (seg)</b>	<b>Conc. Carvão(Leve)</b>		<b>Rejeito. Piritoso (Pesado)</b>	
		<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>	<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>
4	120	94,0	1,35	6,0	4,09
4	120	88,2	1,15	11,8	2,87
12	34,1	89,9	1,31	10,1	3,11

**Tabela 9 – Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 25% de sólidos**

<b><i>KNELSON (25% SÓLIDOS)</i></b>					
<b>P (psi)</b>	<b>Duração Ensaio (seg)</b>	<b>Conc. Carvão(Leve)</b>		<b>Rejeito. Piritoso (Pesado)</b>	
		<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>	<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>
8	15,5	78,6	1,28	21,4	2,30
12	26,8	80,6	1,33	19,4	2,98

**Tabela 10 – Resultados de ensaios no concentrador Knelson com 30% de sólidos**

<b><i>KNELSON (30% SÓLIDOS)</i></b>					
<b>P (psi)</b>	<b>Duração Ensaio (seg)</b>	<b>Conc. Carvão(Leve)</b>		<b>Rejeito. Piritoso (Pesado)</b>	
		<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>	<b>% Peso</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>
8	22,4	88,6	2,15	11,4	2,93
12	15,2	87,9	1,33	12,1	2,84

Pela análise das Tabelas acima, pode-se verificar que, mantidas as outras variáveis constantes, quanto maior a duração do ensaio, menor é o teor de enxofre total no concentrado de carvão; maior a recuperação em massa do concentrado; e maior é a concentração de enxofre no rejeito piritoso. Isto apresenta uma certa lógica, pois maior tempo de duração do ensaio, dá a possibilidade de uma maior purificação do rejeito piritoso nos anéis da cesta, e libera mais carvão limpo para o concentrado de carvão.

### 5.6. Ensaio No *Multi-Gravity Separator* (MGS)

A amostra, teve que ser peneirada para tirar a fração acima de 0,42 mm (35 malhas), pois o manual de operação do equipamento recomenda que a granulometria máxima com a qual o mesmo deve ser operado é 500  $\mu\text{m}$ .

Foram realizados vários ensaios exploratórios, visando determinar as faixas de variação das variáveis operacionais e de processo mais adequadas para a amostra a ser estudada velocidade de rotação do tambor, que varia de 100 a 280 rpm;

Com a realização destes ensaios exploratórios, foi possível fixar algumas variáveis operacionais e determinar a faixa de variação das variáveis de processo.

O ângulo de inclinação do tambor foi fixado em 5° e a velocidade de rotação do tambor foi fixada em 240 rpm, que é a máxima que se pode atingir, devido à voltagem da instalação elétrica do laboratório ser de 220 V. A vazão de polpa variou de 121 a 193 kg / h, enquanto a correspondente vazão de sólidos variou de 15 a 46 kg / h, dependendo da % de sólidos utilizada no ensaio.

As Tabelas de 11 a 15, mostram os resultados obtidos, em função das variações da % de sólidos da alimentação da polpa e da vazão da água de lavagem utilizada.

**Tabela 11 – Resultados de ensaios no MGS, com 12% de sólidos**

<b>MGS (12% SÓLIDOS)</b>				
<b>Água de lavagem (L/min)</b>		<b>Conc. Carvão</b>		
<b>Rotâmetro</b>	<b>Medida Direta</b>	<b>PESO (%)</b>	<b>% S<sub>T</sub></b>	<b>%S<sub>P</sub></b>
1,0	1,22	99,88	1,73	0,86
1,25	1,50	99,78	1,78	0,85
1,5	2,0	99,85	1,90	1,06
2,0	2,3	99,84	2,0	1,1

Tabela 12 – Resultados de ensaios no MGS, com 15% de sólidos

MGS (15% SÓLIDOS)				
Água de lavagem (L/min)		Conc. Carvão		
Rotâmetro	Medida Direta	PESO (%)	% S <sub>T</sub>	%S <sub>P</sub>
1,0	1,25	99,63	1,51	0,64
1,25	1,5	99,75	1,42	0,73
1,5	2,0	99,28	1,59	0,76
2,0	2,32	99,60	1,65	0,85

Tabela 13 – Resultados de ensaios no MGS, com 20% de sólidos

MGS (20% SÓLIDOS)				
Água de lavagem (L/min)		Conc. Carvão		
Rotâmetro	Medida Direta	PESO (%)	% S <sub>T</sub>	%S <sub>P</sub>
1,0	1,2	98,10	1,33	0,55
1,5	2,0	99,45	1,49	0,69
2,0	2,4	99,58	1,58	0,71
2,5	-	98,90	1,59	0,72

Tabela 14 – Resultados de ensaios no MGS, com 23,3% de sólidos

MGS (23,3% SÓLIDOS)				
Água de lavagem (L/min)		Conc. Carvão		
Rotâmetro	Medida Direta	PESO (%)	% S <sub>T</sub>	%S <sub>P</sub>
1,0	1,27	98,45	1,25	0,48
1,5	1,94	97,86	1,36	0,58
2,0	2,52	98,75	1,49	0,64
2,5	2,8	96,30	1,47	0,67

Tabela 15 – Resultados de ensaios no MGS, com 25,5% de sólidos

MGS (25,5% SÓLIDOS)							
Água de lavagem (L/min)		Conc. Carvão			Conc. Piritoso		
Rotâmetro	Medida Direta	PESO (%)	% S <sub>T</sub>	%S <sub>P</sub>	PESO (%)	% S <sub>T</sub>	%S <sub>P</sub>
1,0	1,32	88,5	1,08	0,48	11,5	8,4	7,4
1,5	1,67	91,0	1,12	0,58	9,0	10,0	9,0
2,0	2,0	93,1	1,25	0,64	6,9	11,7	10,0
2,5	3,0	93,4	1,24	0,67	6,6	15,3	13,6

As variáveis de processo que se mostraram ser de maior efeito no MGS foram a percentagem de sólidos da polpa, a vazão da água de lavagem e a velocidade de rotação do tambor.

A velocidade de rotação do tambor, depois de ensaiada, foi mantida em 240 rpm (rotações por minuto).

Pela análise destas Tabelas, verifica-se que à medida que foi aumentando a percentagem de sólidos da polpa de alimentação obteve-se concentrados de carvão com teores cada vez mais baixos de enxofre total e enxofre pirítico, sem prejudicar as recuperações em massa, praticamente todos acima de 90%.

A Tabela 15, por exemplo, onde foi utilizada a maior % de sólidos (25,5%), mostra a obtenção de um concentrado de carvão com teor de enxofre total em torno de 1,1% e enxofre, enxofre pirítico da ordem de 0,03%; a recuperação em massa sendo acima de 90%. Pelos dados anteriores, verifica-se que o MGS, como já era esperado, teve um ótimo desempenho em termos de rejeição de enxofre pirítico. Partindo de um teor de enxofre pirítico na alimentação de 0,96%, verifica-se que a rejeição de enxofre pirítico foi acima de 90%, com recuperação em massa em torno de 90%.

Deve ser ressaltado, ainda, que através do controle da água de lavagem, pode-se controlar, facilmente, o teor de enxofre total no concentrado de carvão, com perdas mínimas na recuperação (< 5%).

Os concentrados piritosos obtidos nos ensaios no MGS mostraram, através de lupa de laboratório, uma pirita com aspecto carbonoso, predominando a pirita de granulometria bem fina.

## 6. CONCLUSÕES

A análise granulométrica dos finos de carvão da Cooperminas (sem beneficiamento) mostrou que mais de 30% de sua massa é composta de partículas abaixo de 37  $\mu\text{m}$  (400 malhas). O mesmo praticamente ocorrendo com a amostra do concentrado de flotação coletada na Carbonífera Criciúma.

O enxofre se distribui, em ambas as amostras, por todas as frações granulométricas, sendo mais concentrado na fração -100 +325 malhas.

As imagens de mapeamento MEV/EDS em partículas de carvão da Cooperminas mostraram, com bastante evidência, a presença de grande quantidade de enxofre orgânico nessas partículas. Isso corroborou com os resultados das análises químicas de enxofre total, pirítico e orgânico realizadas.

As análises de enxofre total, pirítico e orgânico realizadas no concentrado de flotação dos finos de carvão da Carbonífera Criciúma, mostraram a mesma proporção e a mesma tendência em relação a este elemento.

Os estudos realizados no concentrador Knelson com finos de carvão da Cooperminas, mostraram que este equipamento consegue depirritizar mais ainda concentrado de flotação previamente depirritizados em mesa vibratória, com recuperações em massa da ordem de 90%, porém, o percentual de redução de enxofre total ficou abaixo do conseguido no MGS. As recuperações em massa deste produto foram da ordem de 90%. Por outro lado, o concentrador Knelson apresenta a desvantagem de sua operação ser ainda de forma descontínua.

Nos estudos realizados com o concentrador centrífugo MGS (*Mozley Multi-Gravity Separator*), com concentrado de flotação da Carbonífera Criciúma, os melhores resultados foram obtidos com alimentação contendo 25,5% de sólidos. Partindo de uma alimentação com 1,91% de enxofre total e 0,96% de enxofre pirítico, foram conseguidos concentrados de carvão com teor de enxofre total variando entre 1,1 e 1,2% e enxofre pirítico entre 0,3 e 0,4 %.

Os resultados abrem possibilidades de alternativas de beneficiamento para os finos de carvão de Santa Catarina, combinando processos gravíticos convencionais, flotação e concentradores centrífugos.

Poderão ser testadas as seguintes alternativas de circuitos de beneficiamento:

- 1) Alimentação finos (-28 #) → Mesa vibratória → Flotação → Centrífuga → Conc. final carvão.
- 2) Alimentação Finos → Peneira 65 # →  $\left\{ \begin{array}{l} (+) 65 \# \rightarrow \text{Mesa vibratória} \rightarrow \text{Flotação} \rightarrow \text{Conc. grosso carvão} \\ (-) 65 \# \rightarrow \text{Flotação} \rightarrow \text{Centrífuga} \rightarrow \text{Conc. fino carvão.} \end{array} \right.$
- 3) Alimentação finos → Ciclone autógeno → overflow → Flotação → Centrífuga → Conc. Carvão
- 4) Alimentação finos → Mesa vibratória → Flotação → C. carvão →  $\left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \text{Peneira 100 \#} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (+) 100 \# \rightarrow \text{Concentrado grosso de carvão.} \\ \rightarrow (-) 100 \# \rightarrow \text{Centrífuga} \rightarrow \text{Conc. fino de carvão.} \end{array} \right. \end{array} \right.$

A operação do MGS é facilmente controlada em termos de dessulfuração e de recuperação em massa do concentrado que se quer obter, apenas com controle da vazão da água de lavagem, mantendo fixas e otimizadas as demais variáveis operacionais.

Nos concentrados piritosos predominam presença da pirita de granulometria fina.

Os concentrados piritosos apresentaram teores de enxofre total de 8,4 a 15,3 % e enxofre pirítico entre 7,4 e 13,6 %.

Estes concentrados, vistos em lupa, mostraram que as superfícies dos grãos de pirita tendo aparência de partículas de carvão. A olho nu a cor da superfície dos grãos de pirita se apresentam de forma pardacenta.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOVER NETO, A. **Caracterização mineralógica de finos de carvão**. Rio de Janeiro, CETEM / CNPq, 1996 (RT 05 / 97).
- ALCOVER NETO, A. **Caracterização de amostra de finos de carvão**. Rio de Janeiro, CETEM /MCT, 2001 (RT 01/ 2001).
- ALBUQUERQUE, G. A. S. C. et al. Indústria carbonífera brasileira: conveniência e viabilidade. **Estudos e documentos**, n 23, 36 p., Rio de Janeiro, CETEM / CNPq, 1995.
- ALMEIDA, S. L. M.; CAMPOS, A. R.; CHAVES, A. P. **Estudo de rebritagem de carvão vapor**. Rio de Janeiro, CETEM/MME, 1983. (Relatório técnico)
- ANUARIO MINERAL BRASILEIRO. Brasília, 1999.
- APLAN, F. F. The influence of reagent dosage on the flotability of pyrite during coal flotation. In: SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 28 (1-3), p. 747-764, 1993.
- APLAN, F. F. Coal flotation In: FUERSTENAU, M. C., ed. Flotation A. M. Gaudin memorial volume. New York, AIME, 1976. v. 2, p. 1235 – 64.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Brasília, 1999.
- BALTAR, C. A. M. **Estudo de depiritização de carvão**. Porto Alegre, PPGEMM, UFRGS, 28 p.,1989. (Relatório de curso)
- BRAWN, D. J. Coal flotation. In: FUESTENAU, D. W., ed. Froth Flotation – 50<sup>th</sup> anniversary volume, New York, AIME, 1962 p. 518 – 538.
- BUSTAMANTE, H.; WOODS, G. Interaction of dodecylamine and sodium dodecylsulphate with a low – rank bituminous – coal. In: Colloids and Surfaces, v. 12, p. 381 – 399, 1984.



- CAMPOS, A. R. Métodos gravimétricos de beneficiamento de carvões. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., Salvador - BA., 1981.
- CAMPOS, A. R. Mineração e beneficiamento do carvão mineral. In: CURSO "ECONOMIA E TECNOLOGIA DA ENERGIA", Rio de Janeiro, ed. Marco Zero/FINEP, 1985, p. 227 – 242.
- CAMPOS, A. R.; LUZ, A. B. Separação em Meio Denso. In: TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 2. ed., p. 298 – 337, Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 1998.
- CAMPOS, A. R.; ALMEIDA, S. L. M.; SANTOS, A. T. Estudo tecnológico dos carvões do Brasil: relatório final. Rio de Janeiro, CETEM/CNPq, 1977.
- CAMPOS, A. R.; ALMEIDA, S. L. M. Flotação de carvão de Santa Catarina em escala de bancada e piloto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 8., Porto Alegre, RS, Novembro de 1981, p. 77 – 92.
- CAMPOS, A. R. Beneficiamento do carvão energético – Condicionamentos técnicos e econômicos. In O Carvão Mineral na Nova Realidade Brasileira. In: SEMINÁRIO CAEEB/MME, Itaipava, RJ, 1986.
- CAMPOS, A. R. **Visitas técnicas aos lavadores de carvão da Cooperminas e da Carbonífera Criciúma**, nov. 2000. Relatório de viagem, inédito.
- CARRISSO, R. C. C. Flotação de finos de carvão da mina Verdinho: Unidade mineira II-SC: relatório técnico. Rio de Janeiro, CETEM/CNPq, 1984.
- CARVALHO, O. Uma análise retrospectiva da política nacional do carvão. **Revista econômica do nordeste**, Fortaleza, v. 16, n. 1, p. 35 – 51, 1985.
- CHAVES, A. P. Estado da arte do beneficiamento do carvão no Brasil. In: CONGRESSO ÍTALO - BRASILEIRO EM ENGENHARIA MINERAL, 2., Cagliari, Itália, 18 p., 1992.

- Atti. Cagliari : Universita Degli Studi Di Cagliari, 1992. p.**
- CHAVES, A. P.; CASSOLA, M. S. Processos densitários. Apostila. 31 p., 1994.
- CHAVES, A. P.; HENNIES, W. T.; ORTEGA, J. W. A. Flotação de finos de cominuição do carvão de Santa Catarina. In: ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, 2; ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 12. Rio de Janeiro, p. 571-581, 1987.
- CHAVES, A. P. **Flotação de carvão de Santa Catarina (região de alto e médio metalúrgico)**. São Paulo, 1979. 142p. Tese (Doutorado) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo.
- FIGUEIREDO, P. C.; CHAVES, A. P., Recuperação de partículas minerais finas e ultrafinas no âmbito da concentração gravítica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 17., e SEMINÁRIO DE QUÍMICA E COLÓIDES APLICADA À TECNOLOGIA MINERAL, 1., Águas de São Pedro – SP, p. 483 – 492, 1998.
- FONSECA, A. G. Challenges of Coal Preparation. In: Mining Engineering, vol. 47, n. 9, p. 828-834, 1995.
- FUERSTENAU, D. W.; ROSENBAUN, J. M.; LASKOWSKI, J. S. Effect of surface functional groups on the flotation of coal. In : Colloids and Surfaces, 1983.
- HOFFMANN, E. A contribution to the flotation of Santa Catarina coals. In : ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, 1, e ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 9,. Rio de Janeiro, 1982. p.
- INFORMATIVO ANUAL DA INDÚSTRIA CARBONÍFERA BRASILEIRA, Brasília, 1999.

- LINS, F.F.; COSTA, L. S. N.; DELGADO, O. C.; GUTIERREZ, J. M. A. Concentrador centrífugo: Revisão e aplicações potenciais. **Série de Tecnologia Mineral**, n. 55. Rio de Janeiro, CETEM / CNPq, 32 p.,1992.
- LIMA, R. M. F.; CORREIA, J. C. G.; CAMPOS, A. R. Flotação em coluna de finos de carvão. In: ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, 3, e ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 15, São Lourenço, MG, 1992. p. 389 – 402
- LIU, Y. A. Physical cleaning of coal. Present and Developing Methods. Marcel Dekker, INC. New York and Basel, p. 293 – 351, 1989.
- LUTTRELL, G. H.; MANKOSA, M. J.; YOON, R.-H. Combining Advanced flotation and Centrifugal gravity separation for improved sulfur rejection. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> ANNUAL COAL PREPARATION EXHIBITION and CONFERENCE, Lexington, Kentucky, 1993, p. 73 – 81.
- LUTTRELL, G. H.; VENKATRAMAN, P.; YOON, R. -H. Development of a combined flotation/gravity separation circuit for fine coal cleaning. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> INTERNATIONAL COAL PREPARATION CONGRESS, Krakow, Poland, 1994a. p. 335 – 43.
- LUTTRELL, G.H.; VENKATRAMAN, P.; YOON, R.-H. Combining flotation and enhanced gravity separation for improved ash and sulfur rejection. In: Proceedings for the ELEVENTH ANNUAL INTERNATIONAL PITTSBURGH COAL CONFERENCE, Pittsburgh, Pennsylvania,. Setembro de 1994 b. p. 1273 – 78.
- MILIOLI, V. A. Produção e beneficiamento de carvão em Santa Catarina. Seminário sobre Tecnologia do Carvão. Florianópolis – SC, 1981a.
- MILLIOLI, V. A.; BRANDALISE, R. A. Beneficiamento do carvão de Santa Catarina no Lavador de Capivari S/A. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO

- DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 8<sup>o</sup>, Porto Alegre, RS, , 1981b. p. 2 – 17
- MINING ENGINEERING, Challenges in Coal Preparation, 1995.
- MINING MAGAZINE. Gravity concentration, p. 136 – 148, Março de 1999. p. 1273 – 1278.
- MOZLEY – Laboratory Mineral Separator (Prospecto da mesa Mozley).
- MOZLEY – RICHARD MOZLEY LIMITED Multi – gravity separator operating manual. Redruth. 1992. 30 p.
- NÓVOA, R. V. Beneficiamento de carvões do sul do Brasil. In: SIMPÓSIO DO CARVÃO NACIONAL, 3<sup>o</sup>, Curitiba – PR. Dezembro de 1969.
- NÓVOA, R. V. Beneficiamento dos refugos piritosos de Santa Catarina. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE MINERALURGIA, 1, São Paulo IPT/EPUSP, 1970. 21 p.
- NÓVOA, R. V. O Lavador de Capivari e sua função no beneficiamento do carvão de Santa Catarina. Carvão de Pedra, n. 17, p 9 – 12, 1971.
- NÓVOA, R. V. Carvão nacional para a Siderurgia a coque. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Porto Alegre - RS, Outubro de 1974.
- NÓVOA, R. V. Avaliação das características de lavabilidade de um carvão brasileiro da camada Barro Branco, por Testemunho de Sonda, 1976.
- NUNES, A. V.; MULLER, E.; SANTOS, M. A. Diagnóstico do carvão mineral catarinense. SECTME / SC, 77 p., 1990.
- PAPÉE, J. Dessulfuração de carvão metalúrgico de finas granulometrias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO, 2, Porto Alegre, 1989.

- PERES, A. E. C. Introdução à tecnologia mineral, métodos de concentração. In: Apostila de Beneficiamento de Minérios, p. 4 – 8. 1989.
- PIRES, M. B. A ferrovia do carvão. Folheto da RFFSA - Rede Ferroviária Federal S. A., 1990.
- REVISTA BRASIL MINERAL, n. 10, setembro de 1984.
- REVISTA BRASIL MINERAL, n. 147, janeiro / fevereiro, 1997.
- RÚBIO, J. Beneficiamento físico - químico de finos de carvão. In: Carvão Mineral – Caracterização e Beneficiamento. v. 1, p. 143 – 191, 1988a.
- RÚBIO, J. Carvão Mineral – Caracterização e Beneficiamento, vol. 1, p. 13-45, Porto Alegre, 1988b.
- SAMPAIO, C. H; TAVARES, L. M. Caracterização do desempenho de espirais de Reichert no beneficiamento de finos do carvão de Cambuí – Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO, 2., Porto Alegre - RS, 1989. Anais. p. 268 – 280.
- SCHIMMOLLER, B. K.; JACOBSEN, P. S.; HUCKO, R. E. Industrial use of technologies potentially applicable to the cleaning of slurry pond fines. In: INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON COAL UTILIZATION AND FUEL OIL SYSTEMS, 19., Clearwater, Florida, p. 805 – 817, 1994.
- SCHNEIDER, C. L.; RÚBIO, J. Beneficiamento gravimétrico de carvões por jigagem no Brasil. Revista Brasil Mineral, p. 5 – 16, janeiro, 1987.
- SILVA, E. C.; TORRES, V. M.; SANTOS, N. A. Concentradores centrífugos – Uma nova era na concentração gravítica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 17, e SEMINÁRIO DE QUÍMICA DE COLÓIDES APLICADA À TECNOLOGIA

MINERAL, 1, , Águas de São Pedro – SP, 23 a 26 de Agosto de 1998. p. 533 – 551.

SUMÁRIO MINERAL, Brasília, 1998.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DO CARVÃO – SNIIEC, 1995.

MACEDO, C.T. , CAMPOS, A.R.; CARVALHO, E.A. Beneficiamento de finos de carvão de Santa Catarina. VII Jornada de Iniciação Científica (JIC), Rio de Janeiro, CETEM/CNPq, 1999, 9 p.

VENKATRAMAN, P; LUTTRELL, G.H.; YOON, R.-H. Fine coal cleaning using multy-gravity separator. In SME Annual Meeting and Exhibit - High Efficiency Coal Preparation Conference , Denver, Colorado, February, p. 109 – 117, 1995.

VIANA JÚNIOR, A. et al. Métodos físicos de concentração gravítica. In TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA. In Memoriam Professor Paulo Abib Andery, p. 115 – 164, ITEP, 1980.

VILELA, R. O. Carvão catarinense escreve sua história. Jornal do Carvão, Ano 1, Nº 01, SIECESC, Outubro de 1994.

YOON, R. -H; LUTTRELL, G. H.; MANKOSA, M. J. Bench-scale testing of the multi-gravity separator in combination with microcel. In: Proceedings of Ninth ANNUAL COAL PREPARATION, UTILIZATION AND ENVIRONMENTAL CONTROL CONTRACTORS CONFERENCE, Pittsburgh, Pennsylvania, 1993a. p. 23 – 30.

YOON, R. -H.; LUTTRELL, G. H.; ADEL, G. T.; RICHARDSON, P. E. Development of enhanced sulfur rejection process. In: Proceedings of Ninth ANNUAL COAL PREPARATION UTILIZATION AND ENVIRONMENTAL CONTROL CONTRACTORS CONFERENCE, Pittsburgh, Pennsylvania, 1993b. p. 112 – 19.

YOON, R. -H; LUTTRELL, G. H.; MANKOSA, M. J. A method of improving sulfur rejection by combining flotation and fine gravity separation. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE, Seoul, Korea, 1993c. p. 1 – 9.