

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS MATERIAIS

CARACTERIZAÇÃO PARA O BENEFICIAMENTO  
DO CARVÃO DE CANDIOTA

POR

*Carlos Hoffmann Sampaio*

*Engenheiro de Minas*

*Porto Alegre, Maio de 1983.*

## A G R A D E C I M E N T O S

Gostaria de agradecer ao Prof. JORGE RUBIO pela orientação e incentivo à concentração deste trabalho.

Ao Prof. JAIME A. SOLARI SAAVEDRA pela orientação no estudo de flotação aglomerante.

Aos colegas eng<sup>os</sup>. SERGIO BRUCHCHEN e MARCO ANTONIO DA SILVA NUNES pelo grande auxílio nos testes e análises realizadas.

À professora ZULEICA CARRETA CORREA DA SILVA, PAULO SÉRGIO GOMES PAIM e GILBERTO INÁCIO HENZ pelo auxílio na análise petrográfica.

Aos eng<sup>os</sup>. SLAWOMIR D. PIATINICKI, NELI WARPECHOWSKI e IVONE MARIA AGOSTINI pelo auxílio nos testes de flutua-afunda e hidrociclonagem, bem como a CIENTEC pela possibilidade de realização destes testes em seus laboratórios.

À colega ELBA CALESSO TEIXEIRA pelo auxílio nos testes de espessamento.

Aos colegas eng<sup>os</sup>. CLÁUDIO NUNES e JORGE LUIZ BROWN SEGUI pelo auxílio nos testes de britagem e peneiramento.

Às colegas KATIA MARIA PAIM POZZER, JANICE DA SILVA e LENORA FERREIRA COSTA pelas análises realizadas.

Ao colega LUIZ ANTONIO FERREIRA pelo auxílio e conselhos técnicos nos testes fotográficos.

A todos os colegas, professores e funcionários do PPGEMM pelo companherismo e convívio simpático durante a realização deste trabalho.

À Companhia Riograndense de Mineração pelas amostras cedidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte financeiro concedido.

À Vera pelo esmero na datilografia.

A meus pais.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta estudos sistemáticos da caracterização do carvão de Candiota em termos do seu beneficiamento.

O carvão de Candiota possui características de moabilidade que o indicam como bastante friável. A geração de finos (-28 malhas) atinge valores superiores a 20% independente do grau de britagem. As distribuições granulométricas resultantes da britagem do carvão obedecem a equação de ROSIN-RAMMLER-BENNETT, dentro do intervalo previsto (frações menores do que 4 malhas e maiores do que 100 malhas). Os valores de  $n$  e  $d'$  não variam significativamente com a abertura do britador o que evidencia sua friabilidade. Foram estabelecidas equações que relacionam a abertura do britador, coeficientes de distribuição e diâmetro médio.

Estudos microscópicos demonstraram que, o grau de disseminação da matéria inorgânica é muito intenso, e sua liberação atinge malhas muito pequenas (provavelmente menores do que 400 malhas). O teor de cinzas, como por exemplo do grau de disseminação, não variou significativamente com a diminuição de tamanho, como acontece com outros carvões. Foram estabelecidos dois critérios de liberação das partículas em função da quantidade de matéria carbonosa presente nas unidades mistas (20 - 80% e 5 - 95%, respectivamente). Estes índices de partículas mistas

(5 - 95% de matéria carbonosa) mantiveram-se constantes até tamanhos aproximados de 115 malhas, para logo diminuírem nas frações menores. Ainda assim, para frações menores do que 53 micrômetro a quantidade de mistos (5 - 95%) foi de 34%.

As curvas de lavabilidade deste carvão (tanto da fração grossa quanto a fina), reflexo das características anteriores, indicam-no como de muito difícil beneficiamento (lavagem). Isto basicamente é devido ao alto grau de "near gravity material" presente e de seu grau de liberação.

Os testes de jigagem por bateladas, bem como outros processos de beneficiamento, demonstraram a dificuldade do beneficiamento deste carvão. O melhor teste de jigagem por bateladas, obteve uma recuperação de matéria carbonosa de 73,2% com um teor de cinzas de 45,5% no concretado (alimentação contendo 50% de cinzas).

Os testes de beneficiamento das frações finas por flotação convencional e floco-flotação indicam que estes processos são muito sensíveis a presença de mistos, e que a sua eficiência não se deve a problemas de oxidação, baixo "rank" ou hidrofobicidade. Isto porque a recuperação por ambos os processos físico-químicos não constitui problema, como o do alto teor de cinzas no concentrado.

O melhor resultado de flotação encontrado em um circuito otimizado foi de 37,86% de teor de cinzas (alimentação de 48,77% de cinzas), com recuperação de matéria carbonosa de 52,12%.

Nos testes de ciclonagem, obteve-se resultados melhores do que nos testes de flotação, com o melhor resultado obtendo uma recuperação de matéria carbonosa de 56,20%, com um teor

de 37,59% de cinzas (alimentação de 50% de cinzas).

Propõe-se, finalmente, um circuito de beneficiamento convencional do carvão de Candiota, incluindo uma classificação do carvão ROM com o objetivo de separar a alimentação em duas frações (+28 e -28 malhas), seguido de um processo de beneficiamento das frações grosseiras por meios densos (tanques), e um tratamento das frações finas por hidrociclonagem.

Os resultados obtidos concluem que o carvão de Candiota é o mais difícil de ser lavado dentre os carvões sul-brasileiros devido ao alto teor de cinzas e ao grau de disseminação, sendo que este teor de cinzas não varia muito com a granulometria, o que implica em um grau de liberação muito baixo. Sugere-se como outra alternativa no seu beneficiamento, o estudo de processos não convencionais que incluem um alto grau de cominuição até completa liberação.

## A B S T R A C T

This work presents sistematic studies of the characterization of Candiota's coal in terms of its beneficiation.

The coal from Candiota has such grindability characteristics that can be classified as a very friable solid. The amount of fines (-28 mesh) gerated by crushing reach values of the order of 20% independently of crusher operation. The size distribution resulting from crushing obeys the Rosin-Rammler-Bennett equation between minus 4 mesh and plus 100 mesh. The  $n$  and  $d'$  values of this equation do not change significantly with crusher opening which shows its friability characteristics. Equations were established relating crusher opening, distribution coeficients an mean diameter.

Miscroscopic studies showed that the degree of dissemination of the inorganic matter is very high with liberation occurring at very small sizes (less than 400 mesh). The ash content as example of the degree of dissemination, did not vary much with the decrease of particle size as happens with other types of coal. Two different criteria for the liberation of the particles were established as a function of the amount of carbonaceous material present in the middings (20-80 and 5-95% respectively). These indexes were constant up to 115 mesh and decreased for the finer fractions. Still,

for fractions smaller than 53 micra, the amount of middlings (5-95%) amounted about 34%.

The washability curves of this coal (coarse or small fractions) showed the characteristics given above, indicating how difficult to clean this coal is. This is due mainly to the high amount of "near gravity material" and to its liberation characteristics.

Jigging tests, batch or continuous as well as other beneficiation processes showed clearly the difficulty of cleaning such a coal. The best result obtained by jigging (batch) yielded 73,2% recovery and 45,4% ash (feed ash for 50%).

Beneficiation of fine fractions by conventional and agglomeration flotation indicated that these processes are too sensitive to the middlings presence and that their efficiency does not depend on oxidation, low rank or hydriphobicity. This is shown by the high recoveries obtained by all physicochemical processes (but high ash contents). The best results obtained by and optimized flotation circuit was 37,68% ash (48,77% feed ash) with a 52,12% coal recovery.

Cycloning results were somewhat better than those of flotation; 56,20% coal recovery with a 37,59% ash (50% feed ash).

Finally, a coal beneficiation flowsheet is proposed including classification of the ROM coal to divide the feed into two fractions (+28 and -28 mesh) followed by the beneficiation of the coarse material by heavy media (vessels) and the treatment of the fines fractions by hidrocycloning.

Results obtained in this work conclude that Candiota's coal is the most difficult to treat coal among those from the

south of Brasil due to the high ash content and the dissemination degree, the latter do not vary much with size wich means that liberation is obtained only at very small sizes. It is suggested as an alternative study of beneficiation non-conventional process including high cominution degree to complete liberation.

## ÍNDICE

I	-	INTRODUÇÃO -----	02
		1 - Carvões brasileiros -----	02
		2 - Estudo atual do beneficiamento de carvões bra sileiros -----	12
		3 - Justificativas e objetivos -----	17
II	-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	22
		1 - Carvão fóssil: Geologia, Gênese e Classifica ção -----	22
		2 - Beneficiamento de carvões - Introdução -----	28
		3 - Beneficiamento de frações grosseiras -----	31
		3.1. Estudos de lavabilidade -----	31
		3.2. Processos de beneficiamento -----	38
		4 - Beneficiamento de frações finas -----	49
		4.1. Processos baseados em diferenças de den sidade -----	49
		4.2. Processos baseados em fenômenos superfi ciais -----	54
III	-	EXPERIMENTAL -----	61
		1 - Materiais e equipamentos -----	62
		2 - Metodologia -----	65
IV	-	RESULTADOS E DISCUSSÕES -----	72

V	-	CONCLUSÕES E SUGESTÕES -----	123
VI	-	BIBLIOGRAFIA -----	127
VII	-	ANEXOS -----	139

## ÍNDICE DE TABELAS

1 - Reservas de Carvão do Brasil Meridional -----	05
2 - Consumo do carvão fóssil previsto para 1985 -----	08
3 - Estimativa de produção do carvão meridional -----	09
4 - Análise imediata, enxofre e poder calorífico de car- vões gaúchos -----	10
5 - Características gerais de lavadores de carvão no Bra- sil -----	13
6 - Principais características físicas, químicas e físico- -químicas do carvão de Candiota -----	18
7 - Resultado dos macerais dos carvões fósseis -----	26
8 - Relação entre grupo de maceral, grupo de microlitotipo e litotipo resultante -----	27
9 - Níveis de lavagem de carvão -----	30
10 - Propriedades de líquidos orgânicos usados nos testes de flutua-afunda -----	33
11 - Principais características dos jigues empregados na la- vagem de carvão -----	43
12 - Capacidade dos ciclones de meio dendo utilizados no be- neficiamento de carvões -----	47
13 - Reagentes empregados na flotação de carvões -----	55
14 - Flotação de carvões - Generalidades -----	56
15 - Células utilizadas em flotação de carvão -----	58

16 - Características de moabilidade - carvão de Candiota - valores de $n$ , $d'$ , $d_{50}$ e passante em 28 malhas e 1 mm em função da abertura de britagem -----	75
17 - Características de moabilidade - carvão de Leão - valores de $n$ ; $d'$ , $d_{50}$ e passante em 28 malhas e 1 mm em função da abertura de britagem -----	80
18 - Estudos de liberação - contagem de partículas -----	91
19 - Jigagem - Curva dos flutuados dos testes por bateladas (+ 10 - 3,5 malhas -----)	95
20 - Resultados obtidos nos testes de jigagem contínua ----	97
21 - Resultados obtidos nos testes de jigagem contínua ----	98
22 - Flotação realizadas com partículas - 400 malhas -----	113
23 - Ciclonação - testes realizados -----	115

## ÍNDICE DE ANEXOS

1 - Características de moabilidade - distribuição granulométrica - jogos de peneiras -----	139
2 - Características de moabilidade - distribuição granulométrica -----	140
3 - Características de moabilidade - distribuição granulométrica -----	141
4 - Características de moabilidade - distribuição granulométrica -----	142
5 - Características de moabilidade - distribuição granulométrica -----	143
6 - Características de moabilidade - distribuição granulométrica -----	144
7 - Características de moabilidade - distribuição granulométrica -----	145
8 - Características de moabilidade - pontos pertinentes a reta central -----	146
9 - Características de moabilidade - parâmetros da regressão linear -----	147
10 - Características de moabilidade - comparação dos resultados dos ajustes de equação para os gráficos de Rosin-Rammler-Bennett -----	148
11 - Características de moabilidade - ajustes de equação - erros encontrados -----	151
12 - Curvas de lavabilidade - fração grosseira (+28-5/16 malhas -----	152
13 - Ensaios de lavabilidade - curva de "near gravity material" para frações grosseiras -----	153

14	- Curvas de lavabilidade - fração fina (-28 malhas)	154
15	- Ensaio de lavabilidade - curva de "near gravity material" para frações finas	155
16	- Estudos de liberação - testes preliminares de flotação	156
17	- Estudos de liberação - testes de flotação para diversas faixas granulométricas	157
18	- Estudos de liberação - fotos	158
19	- Jigagem - resultados obtidos nos testes por bateladas (+10 -3,5 malhas)	164
20	- Flotação - efeito do pH	165
21	- Flotação - efeito do óleo de pinho	166
22	- Flotação - efeito do Walker	167
23	- Flotação - efeito do silicato de sódio	168
24	- Flotação - efeito do tempo - Célula F1	169
25	- Flotação - efeito do tempo - Cédula F2	170
26	- Flotação - efeito do tempo - Célula F3	171
27	- Flotação - distribuição granulométrica	172
28	- Flotação - distribuição granulométrica	173
29	- Flotação - distribuição granulométrica	174
30	- Flotação - distribuição granulométrica	175
31	- Flotação - distribuição granulométrica	176
32	- Flotação - distribuição granulométrica	177
33	- Flotação - distribuição granulométrica	178
34	- Floco-flotação - efeito do óleo diesel	179
35	- Floco-flotação - efeito do óleo diesel	180
36	- Floco-flotação - efeito do óleo diesel	181
37	- Floco-flotação - efeito do óleo diesel	182
38	- Floco-flotação - efeito do óleo diesel	183

39 - Floco-flotação - efeito do óleo de pinho -----	184
40 - Floco-flotação - efeito do Walker -----	185
41 - Floco-flotação - efeito do silicato de sódio -----	186
42 - Floco-flotação - efeito do pH -----	187
43 - Floco-flotação - efeito do tempo -----	188
44 - Ciclonação - distribuição granulométrica -----	189
45 - Ciclonação - distribuição granulométrica -----	190
46 - Ciclonação - distribuição granulométrica -----	191

I - INTRODUÇÃO

## I - INTRODUÇÃO

### 1 - CARVÕES BRASILEIROS

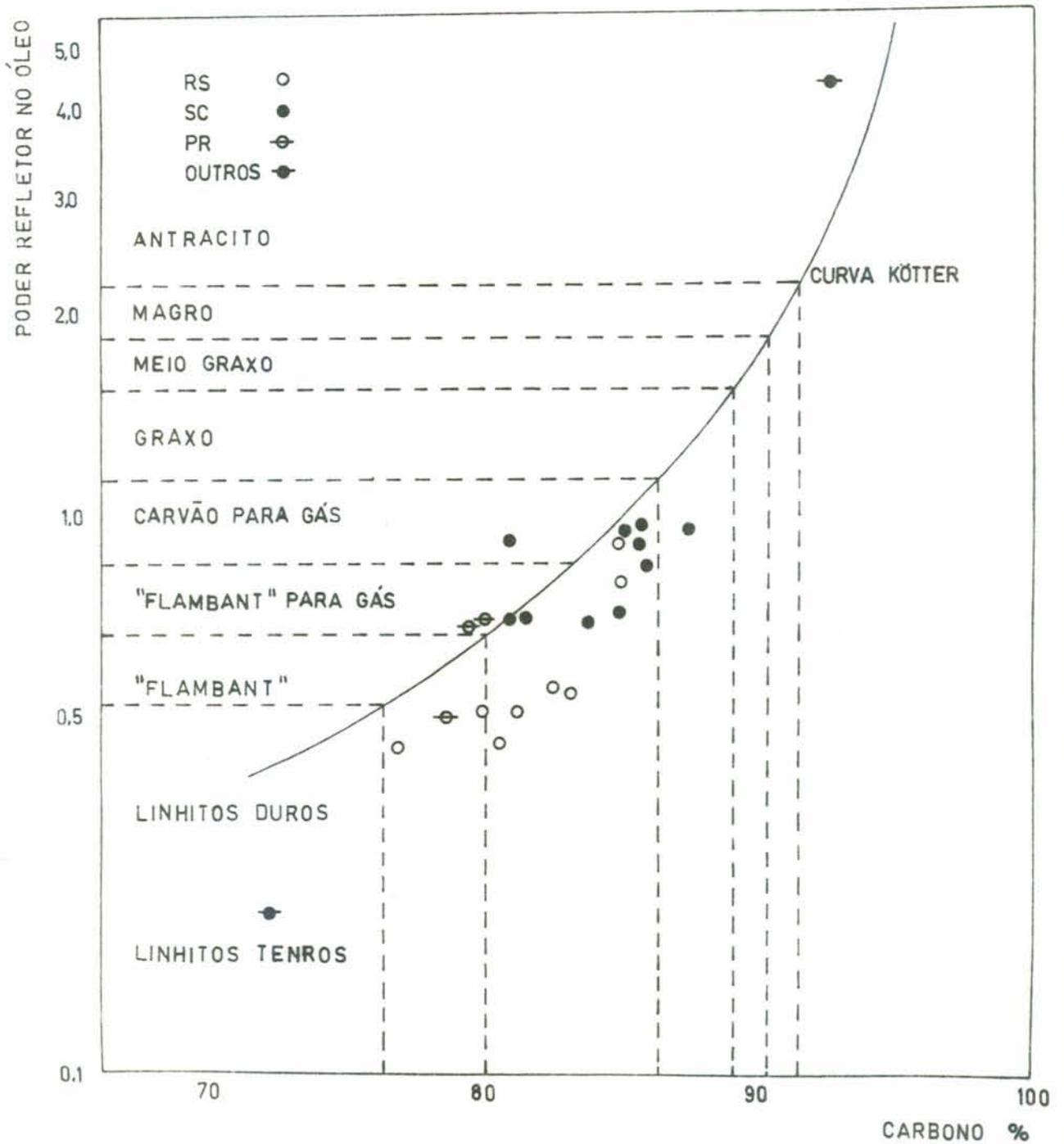
Normalmente os carvões são classificados de acordo com o seu grau de carbonificação ou "rank". Existem diversos métodos para determinar o grau de carbonificação da matéria vegetal, embora o "rank" não seja uma grandeza que se possa medir diretamente. Levando-se em conta isto, relaciona-se a mesma com propriedades físicas ou químicas que variem de modo significativo durante a carbonificação. Nos processos baseados em análise petrográfica microscópica, que são os únicos que oferecem segurança, utiliza-se o maceral vitrinita como referência para determinar o "rank", porque suas propriedades variam de modo contínuo durante a carbonificação.

Com base no poder refletor da vitrinita pura e isenta de água (determinado em microscópio especial), e no respectivo teor de carbono fixo, a Dra. J. Nahuys<sup>1</sup> estabeleceu a posição dos carvões sul-brasileiros na série metamórfica (grau de carbonificação), com base na "curva de KÖTTER". (Ver figura 1). Verifica-se que os carvões sul-brasileiros (especialmente os rio-grandenses), situam-se entre os carvões de baixo grau de carbonificação ("rank").

FIGURA 1

POSIÇÃO DOS CARVÕES BRASILEIROS NA

SÉRIE METAMÓRFICA - SEG. J. NAHUYS (1)



No tocante as reservas de carvão, cabe referir que somente os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná possuem atualmente reservas de carvão economicamente exploráveis. Na tabela 1 encontram-se as reservas brasileiras de carvão (1979). Com o incremento das pesquisas estas reservas aumentaram substancialmente, e hoje em dia (1983), são da ordem de 20.000.000 de toneladas.

TABELA 1 - RESERVAS DE CARVÃO DO BRASIL MERIDIONAL (x 1.000.000 TON).

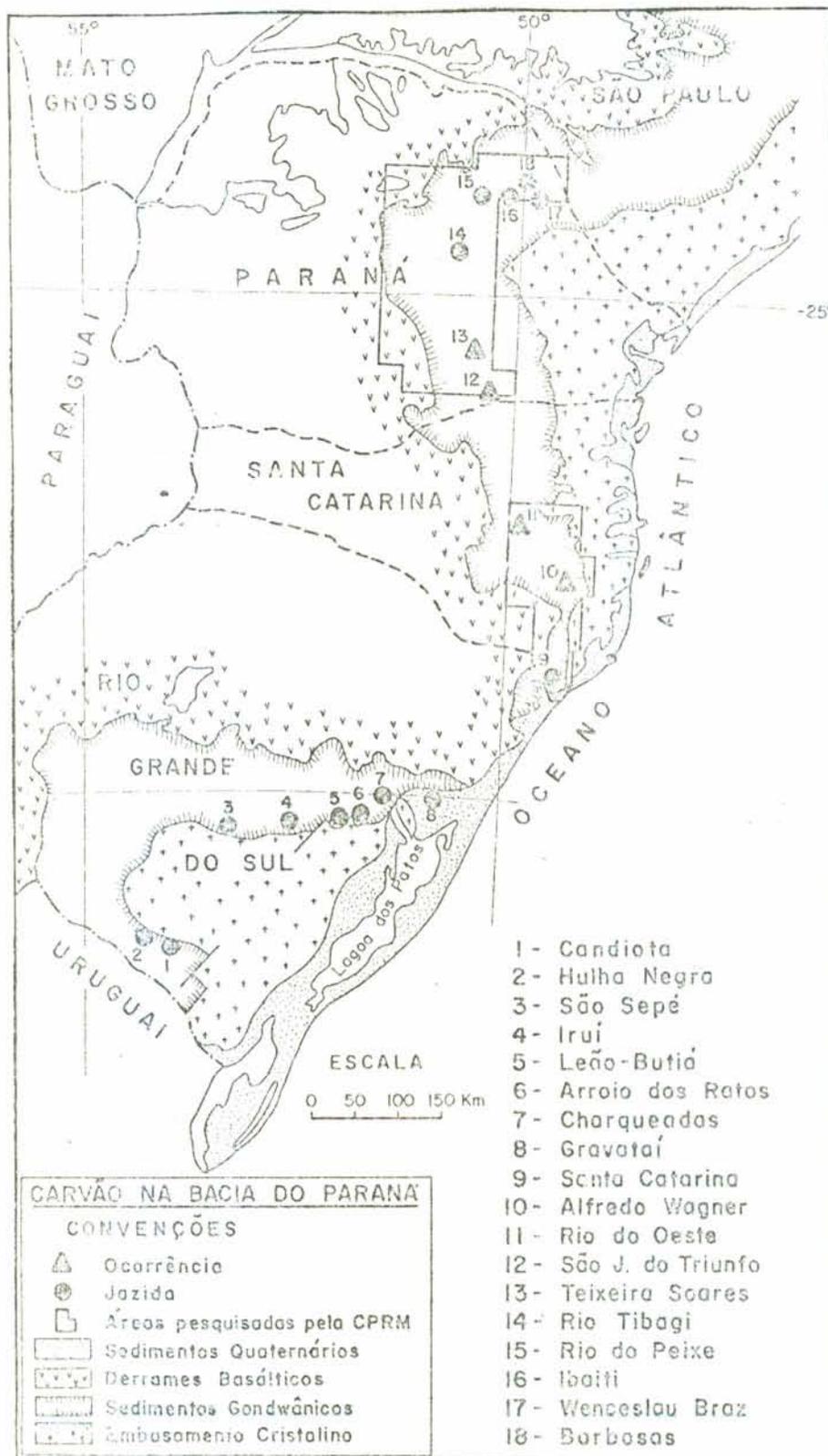
ESTADO	JAZIDAS		RESERVAS				TOTAL DA JAZIDA	
			MEDIDA	INDICADA	INFERIDA	TOTAIS		
RIO GRANDE DO SUL	CANDIOTA	CÉU ABERTO	302,50	250,00	-	552,50	8.000,00	
		MINA SUBTERRÂNEA	50,00	661,50	6.736,00	7.447,50		
	IRUI	CÉU ABERTO	16,00	-	-	16,00	1.829,70	
		MINA SUBTERRÂNEA	96,80	216,90	1.500,00	1.813,60		
	LEÃO-BUTIÃ	MINA SUBTERRÂNEA	160,00	-	1.500,00	1.660,00	1.660,00	
	CHARQUEADAS	MINA SUBTERRÂNEA	CAMADA I <sub>1F</sub>	325,70	188,10	63,00	576,80	1.560,70
			CAMADA I <sub>2D</sub>	340,20	143,70	500,00	983,90	
GRAVATAI	MINA SUBTERRÂNEA	-	-	1.000,00 <sup>(?)</sup>	-	1.000,00		
SUB-TOTAL			1.291,20	1.460,20	11.299,00	-	14.050,40	
SANTA CATARINA	SANTA CATARINA	CAMADA B.BRANCO	CÉU ABERTO	30,00	-	-	30,00	1.705,26
			MINA SUBT.	209,17	387,03	221,16	817,36	
		CAMADA IRAPUÃ	CÉU ABERTO	-	-	10,00	10,00	
			MINA SUBT.	-	-	-	-	
		CAMADA BONITO	CÉU ABERTO	15,00	-	-	15,00	
MINA SUBT.	15,90		206,50	610,50	832,90			
SUB-TOTAL			270,07	593,53	841,66	-		
PARANÁ	RIO DO PEIXE	MINA SUBTERRÂNEA	28,40	11,60	-	40,00	40,00	
TOTAIS			1.589,67	2.065,33	12.140,66	-	15.795,66	

FONTES: DACM, CRM, COPELMI, CPRM<sup>1</sup>

Verifica-se, nesta tabela, que o Rio Grande do Sul possui mais de 80% das reservas totais, sendo que, com o incremento das pesquisas, as reservas gaúchas podem aumentar substancialmente. Na figura 2 observa-se a localização das principais jazidas e minas de carvão do Brasil Meridional.

FIGURA 2 LOCALIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS JAZIDAS E  
MINAS DE CARVÃO DO BRASIL MERIDIONAL

FONTE: CPRM (1)



Com a crise internacional do petróleo e a demanda cada vez maior de energia, o Brasil viu-se forçado a recorrer a fontes alternativas para suprir o seu consumo de energia. Como o carvão é um produto relativamente abundante em nosso país, este veio a ocupar um importante papel no modelo energético brasileiro para os próximos anos<sup>2</sup>.

As metas para 1985 (Tabela 2) prevêem uma utilização do carvão nacional equivalente a 170.000 barris diários de petróleo no consumo nacional de energia. Para tanto, será necessário uma produção de 24 a 25 milhões de toneladas já em 1985, quase cinco vezes mais que as atuais 6 milhões de toneladas/ano. As produções estimadas, por estado produtor, e suas evoluções até 1985 são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 2 - CONSUMO DO CARVÃO FÓSSIL PREVISTO PARA 1985\*

1985 C O N S U M O	(1.000 t)	%
Termoeletricidade	3.850	16
Siderurgia	2.750	12
Cimento	5.065	21
Gaseificação	8.900	38
Combustão	2.400	10
Papel e Celulose	380	2
Transporte Ferroviário	90	1

FONTE: MODELO ENERGÉTICO BRASILEIRO, MME, NOV 1979.

\* Os dados referentes as Tabelas 2 e 3 foram feitos em 1979. Na realidade estes valores estão sendo considerados muito altos pelos órgãos governamentais embora no setor técnico eles representam dados coerentes. Com a atual crise e com a mudança da política mineral brasileira, estes números não poderão ser alcançados.

TABELA 3 - ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DO CARVÃO MERIDIONAL

ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO						
ORIGEM	PERÍODOS	1981	1982	1983	1984	1985
<i>Rio Grande do Sul</i>						
o COPELMI						
- Mina do Recreio		1.050	1.500	1.600	1.700	1.800
- Mina de Charqueadas		300	300	300	300	300
- Mina de Guaíba		-	-	-	650	1.300
- Mina de Gravataí		-	-	-	150	300
- Mina Faxinal/Água Boa		-	-	-	-	150
- Mina de Triunfo		-	-	-	-	150
o C.R.M.						
- Mina do Leão I		350	350	350	350	600
- Mina de Candiota		700	750	1.600	2.500	2.800
- Mina do Iruí		350	700	700	700	1.560
- Mina do Leão II		-	-	700	1.400	2.400
<i>Minas em Licitação</i>						
o C.P.R.M.						
		-	-	1.500	3.500	5.000
		2.750	3.600	6.750	11.400	16.500
<i>Santa Catarina</i>						
o Lavrador Capivari S.A.						
		2.100	2.850	3.150	3.350	4.100
o Próspera						
		200	250	500	500	500
o Criciúma						
		50	150	300	350	900
<i>Minas em Licitação</i>						
o C.P.R.M.						
		-	-	-	-	1.500
		2.350	3.250	3.950	4.200	7.000
<i>Paraná</i>						
o Cia. Carb. Cambuí						
		250	250	300	400	500
		250	250	300	400	500
		5.350	7.100	11.000	16.000	24.010

FONTE: CAEBB, 1980.

A exploração comercial do carvão nacional está a cargo no Brasil de empresas privadas, estatais e de economia mista<sup>3</sup>. No estado do Paraná há duas principais bacias carboníferas em mineração: Rio do Peixe e Rio Tabaji. Em Santa Catarina o carvão ocorre na região sudeste do estado (ver Fig.2). Sendo o único explorado com uma fração coqueificável, é de grande interesse para o parque siderúrgico nacional. Aproximadamente quinze companhias mineradoras são responsáveis pela produção de carvão em Santa Catarina. No Rio Grande do Sul (ver Figura 2), o carvão ocorre nas localidades de Candiota, São Sepê, Iruí, Leão-Butiã, Charqueadas, Morungava e Chico Lomã. Atualmente o carvão é lavrado em Candiota, Charqueadas e Leão-Butiã. A Tabela 4 apresenta algumas características quanto a análise imediata e poder calorífico de carvões do Rio Grande do Sul<sup>4</sup>.

TABELA 4 - ANÁLISE IMEDIATA, ENXOFRE E PODER CALORÍFICO DE CARVÕES GAÚCHOS.

	UMIDADE TOTAL (%)	MATERIAIS VO- LÁTEIS (%)	CARBONO FIXO (%)	CINZAS (%)	ENXOFRE TOTAL (%)	PODER CALOR. SUPER. (kcal/ kg).
MINA DO LEÃO("run of mine")	10,9	22,4	30,5	47,1	1,7	3.740
MINA DO LEÃO("Termoelétrico São Jerônimo")	13,8	25,2	34,9	38,5	1,10	4.400
MINA DO LEÃO("Termoelétrico II")	13,4	21,6	29,0	49,4	0,77	3.560
MINA DO LEÃO("fração nobre")	17,5	34,0	47,9	18,2	0,62	6.300
MINA DE CANDIOTA("r.o.m.")	15,2	22,3	27,6	52,0	1,9	3.200
MINA DE CHARQUEADAS (TECH)	6,7	19,5	26,9	53,6	0,7	3.100
JAZIDA DE IRUÍ (bruto)	9,5	28,6	22,7	48,7	0,3	3.620

FONTE: CARVÕES MINERAIS DO BRASIL - CARACTERÍSTICAS DE CARVÕES BRUTOS DO RS, CIENTEC.

Como observado na Tabela 4, a quantidade de enxofre conti

da em nossos carvões é relativamente baixa, sendo que o maior empecilho para a sua utilização encontra-se na alta quantidade de cinzas. Para amenizar este problema, faz-se um beneficiamento em parte de nossos carvões:

- A mina de Leão I beneficia toda a fração maior que 0,6 mm em jigue do tipo BAUM. A fração menor que 0,6 mm sofre desgüe em ciclones espessadores.

- Em Charqueadas a fração menor que 1 mm é separada a seco (ventiladores de pó). A fração entre 1 mm e 41 mm passa por uma peneira deslamadora onde são retidos os ultrafinos. O material restante é beneficiado em ciclones de meio denso.

- Em Recreio, o carvão sofre cominuição para o controle do "top size" e há apenas uma cata manual para a remoção de refugos.

- Na mina do Faxinal (COPELMI), faz-se lavagem das frações superiores a 0,6 mm em um jigue tipo Baum.

- O carvão de Candiota, por sua vez, mesmo constituindo a maior reserva de carvão do país, não é beneficiado, sofrendo somente uma etapa de britagem e logo transportado até a usina termoelétrica de Candiota.

*2 - ESTADO ATUAL DO BENEFICIAMENTO DE CARVÕES BRASILEIROS*

Devido a problemática de energia mundial, o Brasil foi forçado a recorrer a fontes alternativas de energia. Considera-se que o carvão, devido as grandes reservas encontradas, seria uma fonte energética importante. Anteriormente a crise energética, o carvão produzido no Brasil (basicamente em Santa Catarina) visava a produção de coque através de misturas com carvões importados e carvões de baixo "rank" (termoelétricos), mas o crescente preço do petróleo forçou muitas empresas a substituírem óleo combustível pelo carvão fóssil. Esta substituição exige das empresas mineradoras carvões de melhor qualidade, com poder calorífico maior e teores de cinza e enxofre menores. A demanda cada vez maior de carvões lavados fez com que diversas plantas de beneficiamento comecem a ser instaladas no sul do país. As plantas de beneficiamento de carvão visam, principalmente, uma diminuição dos teores de cinzas e enxofre para os carvões de Santa Catarina e uma diminuição de cinzas para os carvões gaúchos. Os principais lavadores de carvão encontrados no sul do país estão listados na Tabela 5. Além das plantas já em funcionamento, existem diversos outros projetos de construção de novos lavadores para os próximos anos, como por exemplo na mina de Candiotá<sup>6</sup> e Iruí<sup>7</sup>.

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DE LAVADORES DE CARVÃO NO BRASIL<sup>6,8,9,10,11</sup>

EMPRESA	LAVADOR	EQUIPAMENTO	CAPACIDADE	PRODUTOS	PRODUÇÃO (1981)
Carbonífera Próspera S/A	Sangão (SC)	2 jigues McNally Ciclones Flotação (4) células	600 t/h	CPL (32,1% Cz) FINOS(17,2% Cz)	423.900 ton 39.200 ton
	Siderópolis (SC)	1 jigue tipo BAUM Ciclones Flotação		CPL (31,2% Cz) FINOS(13,1% Cz) CV34(32,3% Cz)	343.547 ton 20.878 ton 161.416 ton
Carbonífera Barão do Rio Branco S/A	Barão do Rio Branco (SC)	Jigue Flotação	60 t/h	CPL (32,% Cz) FINOS(15,0% Cz)	56.972 ton 5.648 ton
Carbonífera Metropolitana	União (SC)	Jigue Ciclone Flotação	454 t/h	CPL (32% Cz) FINOS	580.228 ton 31.944 ton
Carbonífera Criciúma	São Roque (SC)	Jigue metálico tipo BAUM Jigue madeira tipo BAUM Hidrociclones espessadores Mesas concentradoras	450 t/h	CPL (32,1% Cz) FINOS	411.662 ton 20.407 ton
	Santa Rosa (SC)	Jigue madeira Hidrociclones(4) Mesa concentradora	100 t/h	CPL (32% Cz)	77.737 ton
Companhia Carbonífera de Urusanga - CCU	Santa Augusta (SC)	Jigue Ciclones Mesas concentradoras Flotação	100 T/h	CPL (31,9% Cz) FINOS(18% Cz)	264.248 ton 25.491 ton

Companhia Carb. de Urussanga (cont.)	São Geraldo (SC)	Jigue Ciclones Mesas concentradoras Flotação		CPL (30,4% Cz) FINOS (30,0% Cz)	67.879 ton 1.629 ton
	Rio Deserto (SC)	Jigue tipo BAUM Ciclones Mesa concentradora	70 T/h	CPL (36,3% Cz) FINOS (24,0% Cz)	13.754 ton 1.550 ton
	Santana (SC)	Jigue tipo BAUM Ciclones Mesa concentradora Flotação		CPL (28,7% Cz) FINOS(12,0% Cz)	304.677 ton 33.729 ton
Carbonífera Treviso S/A	Lavador Central (Urussanga - SC)	Jigue tipo BAUM Hidrociclones(4) Ciclone espessador	200 T/h	CPL (28% Cz) FINOS	126.169 ton 5.531 ton
Cia. Brasileira Carbonífera de Araranguá	Santa Luzia (SC)	Jigue de madeira Ciclones Flotação	90 T/h	CPL FINOS	67.843 ton 1.202 ton
	São Roque (SC)	Jigue de madeira Ciclones Flotação	150 T/h	CPL FINOS	145.546 ton 2.406 ton
	São Simão (SC)	Jigue de madeira Ciclones Flotação	90 T/h	CPL FINOS	86.382 ton 1.301 ton
Cia. Nacional de Mineração do Barro Branco	Ibracoque (SC)	Jigue (3) Mesas concentradoras Hidrociclones Flotação		CPL (31,4% Cz) FINOS	158.426 ton 5.261 ton

Cia. Carbonífera Catarinense S/A	Barro Branco (SC)	Jigue tipo BAUM Flotação	120 T/h	CPL (35,8% Cz) FINOS	143.506 ton 7.675 ton
Carbonífera Palermo	Palermo (SC)	Jigue de madeira Ciclones Flotação	160 T/h	CPL (34,3% Cz) FINOS (14,0% Cz)	23.193 ton 1.840 ton
	Boa Vista (SC)	Jigue de madeira Flotação		CPL (34,3% Cz) FINOS (9,0% Cz)	18.126 ton 1.544 ton
Coque Catarinense Ltda.	Usina Central (Criciúma-SC)	Jigue		CPL (35% Cz) FINOS (20% Cz)	18.219 ton 10.059 ton
Lavador de Capivari S/A	Capivari (SC)	Ciclones de meio denso	800 T/h	CM (18,5% Cz) CV (40% Cz) CV65 (65% Cz)	4.500.000 ton
Cia. Rio-grandense de Mineração	Leão I (RS)	Jigue tipo BAUM Hidrociclones	130 T/h	CV20 (19,4% Cz) CV35 (35,0% Cz) CV40 (40,3% Cz)	55.693 ton 43.698 ton 137.323 ton
Cia. de Pesquisa e Lavras Minerárias	Charqueadas (RS)	Cata manual		CET 3100 CET 3700	235.122 ton 15.634 ton
Aços Finos Piratini	Aços Finos Piratini (RS)	Ciclones meio denso	160-200 T/h	CEC 35 CET 3100	291.043 ton 46.091 ton
Mineradora Sta. Gertrudes Ltda.	Faxinal (RS)	Jigue tipo BAUM	200-300 T/h	CEC 3100 CEC 3700	Implantação em 1982
Cia. Carbonífera do Cambuí	Amando Simões (PR)	Jigue	336.000 T/h	CET 6000 grosso (5-38 mm-20% Cz) CET 6000 fino (0,5-5mm-20% Cz)	156.550 ton 57.423 ton
Indústria Klabin do Paraná de Celulose S/A	Monte Alegre (PR)	Jigue McNally	46 T/h	CV20 (24,2% Cz)	13.322 ton

CPL = Carvão pré-lavado

CV = Carvão vapor

CM = Carvão metalúrgico

CEC = Carvão energético para cimentaria

CET = Carvão energético para termoeletricidade.

### 3 - JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

A mina de Candiota localiza-se no município de Bagé, ao sul do estado do Rio Grande do Sul, a 400 km da capital e a 200 km do porto marítimo de Rio Grande. Com uma reserva total de 1,2 bilhões de toneladas de carvão, 408 milhões das quais medidas e a céu aberto, a mina de Candiota é explorada pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM) desde 1960. Com uma capacidade instalada de 800.000 Ton/ano de carvão "run of mine", possui atualmente como consumidor básico a usina termoelétrica Presidente Médici, de propriedade da Companhia Estadual de Energia Elétrica. O método de lavra empregado é o "CONTOUR MINING", isto é, a mineração é desdobrada em uma frente de aproximadamente 30 m, seguindo a grosso modo as curvas de nível da camada de carvão. A profundidade das camadas de carvão varia entre 8 a 14 m e a relação estéril/minério é de 1,3. O carvão não é submetido a nenhum processo de beneficiamento à boca da mina, seguindo como "run of mine" em caminhões fora-de-estrada de 68 toneladas à usina termoelétrica, onde é britado, pulverizado e injetado nas caldeiras<sup>5</sup>. Prevê-se para os próximos anos a instalação de uma planta de beneficiamento para obter-se carvões de melhor qualidade<sup>6</sup>. Atualmente são lavrados dois bancos de carvão separados por um argilito intermediário. Dentre as principais características físicas, químicas e físico-químicas deste carvão pode-se citar (Ver Tabela 6):

TABELA 6 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DO CARVÃO DE CANDIOTA.

	CAMADA SUPERIOR	CAMADA INFERIOR
Umidade de Equilíbrio (%)	16,8	18,8
Umidade higroscópica (%)	3,1	4,7
Matérias voláteis (%)	22,5	22,1
Carbono fixo - b.s. (%)	25,8	27,8
Cinzas - b.s. (%)	51,7	50,1
Carbono - b.s. (%)	34,3	34,9
Hidrogênio - b.s. (%)	2,7	2,8
Nitrogênio - b.s. (%)	0,5	0,7
Oxigênio + Halogênios - b.s. (%)	9,2	9,5
Poder calorífico superior - b.s. (cal/g)	3208,0	3416,0
Carbonatos - b.s. (%)	1,58	3,11
Enxofre pirítico - b.s. (%)	0,99	1,41
Enxofre sulfático - b.s. (%)	0,12	0,04
Enxofre orgânico - b.s. (%)	0,44	0,55
Enxofre total - b.s. (%)	1,55	2,00
Peso específico real (g/cm <sup>3</sup> )	1,9	1,9
Moabilidade - HGI	107	100
Índice de Inchamento - FSI	zero	zero
Reatividade do CO <sub>2</sub> (KOPPERS-JENKENER)	FACILMENTE REATIVO	FACILMENTE REATIVO
Macerais (flutuado em 1,5) - (%)		
Vitrinita	69	69
Exinita	5	4
Inertinita	18	13
Mat. mineral	8	14
Cinzas - Composição química (%)		
SiO <sub>2</sub>	71,2	71,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,6	21,4
CaO	0,7	0,5
MgO	0,4	0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,2	4,4
TiO <sub>2</sub>	0,7	0,7

MnO <sub>2</sub>	0,07	0,05
K <sub>2</sub> O	0,9	0,9
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,02
SO <sub>3</sub>	-	0,01

Um dos maiores problemas para a utilização do carvão de Candiota é a grande quantidade de matéria inorgânica que precisaria ser removida para um uso mais nobre. Desta forma o beneficiamento ou lavagem (separação das matérias orgânica e inorgânica) do carvão torna-se fundamental. Este beneficiamento abrangeria tanto partículas grosseiras como finas. Outro problema que dificulta sua lavagem é a tenacidade do material, pois nas etapas de extração, transporte e lavagem, o carvão sofreria um intenso trabalho mecânico. Este trabalho origina uma quantidade importante de finos que apresentam características onerosas no beneficiamento das frações grosseiras. Estas são geralmente separadas por métodos gravimétricos que utilizam aparelhos com baixa eficiência para as frações menores que 28 "mesh".

O carvão de Candiota é extremamente peculiar, pois devido a sua gênese, tem-se uma matéria carbonosa intimamente misturada com uma grande quantidade de matéria inorgânica, e com um baixo grau de liberação, ou seja, além do problema do teor de cinzas, tem-se também o problema de liberação. Esta liberação atinge malhas muito finas<sup>5</sup> (400 mesh), dificultando o seu beneficiamento.

Com base nos argumentos acima citados, o presente trabalho propõe-se a caracterizar o carvão de Candiota em termos de

sua suscetibilidade ao beneficiamento, com ênfase nas características de moabilidade, grau de liberação e lavabilidade. O beneficiamento das frações grosseiras e finas se propõe como uma forma de avaliar esta informação preliminar.

II - REVISÃO  
BIBLIOGRÁFICA

## II-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1 - CARVÃO FÓSSIL: GEOLOGIA, GÊNESE E CLASSIFICAÇÃO

A terra é constituída de diversas camadas concêntricas as quais correspondem a distintas composições químicas e estados físicos do material constituinte. A camada mais externa, chamada de crosta terrestre, está em constante movimentação, sendo que fenômenos superficiais tendem a aplainar seu relevo e fenômenos internos a desuniformizar esta superfície<sup>13-14</sup>.

A crosta terrestre é constituída pela "crosta continental" e pela "crosta oceânica" que flutuam sobre o manto, onde ocorrem dois tipos principais de movimentos:

1 - Movimentos horizontais (orogenéticos): segundo as teorias mais recentes a crosta terrestre estaria dividida em várias placas que se movimentam entre si.

2 - Movimentos verticais (epirogenéticos): são movimentos de grande extensão, lentos, não deformacionais que formam arqueamentos e abaixamentos da crosta terrestre.

A existência atual de petróleo e carvão na crosta terrestre é função da produção, acumulação e preservação da matéria orgânica que existiu sob a face da terra. Estima-se que cerca de .. 0,01% do carbono orgânico é preservado sob a forma de sedimentos, enquanto que o resto é reciclado na natureza.

Após a morte de um vegetal, diferentes processos de decomposição podem ocorrer:

- Desintegração: ocorre na presença de oxigênio, e pode ser considerada uma combustão lenta da matéria orgânica, passando esta, inteiramente à matéria inorgânica.

- Humificação: neste caso o oxigênio também atua, apenas que em menor quantidade, sendo a ação bacteriológica mais importante. O resultado é o humus que vem constituir a parte superior dos solos. A grosso modo humificação é uma desintegração mais lenta.

- Formação de turfa: a influência do oxigênio é muito baixa por causa do rápido recobrimento das plantas mortas. No início deste processo atuam bactérias aeróbicas que acidificam o meio tornando este inabitável para elas. Deste modo passam os fungos a serem os principais agentes da decomposição, pelo menos até profundidades de 40 cm quando o meio torna-se muito redutor surgindo então, as bactérias anaeróbicas. Com o contínuo soterramento da matéria orgânica (aproximadamente 10 m), a atividade das bactérias decresce e as modificações químicas tornam-se as mais importantes.

- Putrefação: ocorre no interior de corpos de água estagnadas e, por isto, com uma completa exclusão de oxigênio. A atividade das bactérias anaeróbicas sobre os organismos mortos produz primeiramente uma destilação de  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{S}$  e secundariamente  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2$ . Neste caso o sedimento orgânico formado é o sapropel.

Grande parte da matéria orgânica preservada é originada de turfeiras, as quais podem ser classificadas da seguinte maneira:

- "Peat bogs", (turfeiras em lagos): são turfas formadas em pequenos corpos de água, particularmente em clima úmido e frio. Podem ter até 10 m de espessura mas sempre possuem pequena ex-

tensão lateral.

- "Marshes", (turfeiras de altitude): são turfeiras que ocupam grandes áreas onde a turfa forma um depósito raso cobrindo terras encharcadas. São encontradas preferencialmente em clima frio e temperado. Consiste quase sempre de musgos podendo ocorrer também relvas e juncos.

- "Fresh-Water Swamps", (mangues de água doce): são mangues que se estendem próximos ao nível do mar e pequenas mudanças podem provocar secas ou invasão de água salgada. Os depósitos atuais de "Fresh-Water Swamps" formam imensas áreas tanto em zonas tropicais como em zonas temperadas.

- "Mangrove Swamps", (mangues de água salgada): são mangues que ocorrem próximo ao nível do mar, em regiões junto as costas, sendo que suas áreas são salobras ou salgadas. Normalmente são encontrados em regiões tropicais ou sub-tropicais e possuem boa extensão.

Em termos gerais podemos diferenciar dois tipos de carvões com composições petrográficas e químicas distintas, em consequência do condicionamento genético distinto:

- Carvões Húmicos: como o próprio nome diz são as substâncias húmicas os principais constituintes deste tipo de carvão. Isto relaciona-se a uma predominância dos elementos ligno-celulósicos sobre os lipo-proteicos, ou seja, do lenho sobre esporos, cutículas, resinas, algas, etc. De forma geral estes carvões são pobres em material inorgânico e apresentam disposição em fácies terrestres, onde o processo de formação de turfa foi o mais importante.

- Carvões Sapropêlicos: nestes a fração lipo-proteica, pre-

domina sobre a ligno-celulósica, ou seja, componentes como cutículas, esporos, resinas, algas, etc., predominam sobre os elementos lenhosos. Representam depósitos sub-aquáticos formados pelo processo de putrefação. Estes carvões são um tanto raros e portanto, não serão considerados no presente trabalho.

Para a formação de camadas de carvões húmicos é necessário que existam condições de formação da turfeira e da sua preservação. Como foi visto, as turfeiras próximas ao nível do mar (pa-rálicas) são as mais propícias para a formação de uma turfeira de grande porte. São também estas as que apresentam melhores condições de preservação. A evolução ideal de uma seqüência pará-lica é a seguinte:

- Regressão do mar com formação de corpos de água.
- Crescimento de vegetação nas bordas destes corpos de água.
- Acumulação de espessos pacotes de turfa.
- Transgressão marinha com deposição de matéria inorgânica soterrando os depósitos orgânicos.
- Aprofundamento destes depósitos e posterior formação de carvão.

A carbonificação da matéria vegetal engloba todos os processos nos quais se converte a matéria vegetal em combustível fós-sil, através de distintos e consecutivos estágios. Pode-se, re-sumidamente, classificar a carbonificação em duas etapas principais:

1 - Carbonificação bioquímica: na qual os agentes biolôgicos são os principais causadores das modificações físico-quími-cas da matéria orgânica. O processo de formação da turfa é o primeiro estágio de transformação da matéria vegetal e é denomi

nado de carbonificação bioquímica devido a atuação de bactérias.

2 - Carbonificação geoquímica: na qual os agentes geológicos são os principais causadores das modificações físico-químicas da matéria orgânica. Nesta etapa, aumentando-se a carbonificação, temos: turfa, linhito, hulha e antracito. Sendo que com o aumento da carbonificação temos um aumento do carbono fixo e do poder calorífico, e uma diminuição da umidade, hidrogênio, oxigênio e matérias voláteis presentes neste carvão

Ao observamos um carvão no microscópio podemos identificar uma variedade grande de partes homogêneas e separáveis que correspondem a distintos macerais<sup>1</sup>. A grosso modo, os macerais correspondem no carvão, aos minerais nas rochas. Os macerais podem ser enquadrados em três grupos maiores que distinguem-se por diferentes reflectâncias (ver Tabela 7).

TABELA 7 - RESUMO DOS MACERAIS DOS CARVÕES FÓSSEIS.

GRUPO DE MACERAL	MACERAL	ORIGEM	PODER REFLETOR
EXINITA	Telinita Colinita Vitrodetrinita	Esporos Algas Resinas Cutículas	Baixo
VITRINITA	Esporinita Cutinita Resinita Alginita Liptodetrinita	Material lenhoso	Médio
INERTINITA	Micrinita Macrinita Semifusinita Fusinita Esclerotinita Inertodetrinita	Qualquer partícula oxidada, normalmente lenhosa	Alto

FONTE: "Stach's Textbook of coal petrology", E.Stach.

Como os macerais não ocorrem normalmente isolados, e como a combinação destes é que proporciona o aspecto macroscópico dos carvões, definiu-se um sistema de classificação no qual chama-se de microlitotipo toda associação de macerais com mais de 50 micra de espessura, conforme Tabela 8<sup>15</sup>. Nesta tabela apresentam-se também os litotipos resultantes (o termo litotipo designa as distintas bandas macroscopicamente reconhecíveis nas camadas de carvão).

TABELA 8 - RELAÇÃO ENTRE GRUPO DE MACERAL, GRUPO DE MICROLITOTIPO E LITOTIPO RESULTANTE.

GRUPO DE MACERAL	GRUPO DE MICROLITOTIPO	LITOTIPO RESULTANTE
Vitrinita (V) > 95%	Vitrita	Vitrênio
Inertinita (I) > 95%	Inertita	Fusênio
Exinita (E) > 95%	Liptita	-
V + E > 95%	Clarita	Clarênio
I + E > 95%	Durita	Durênio
V + I > 95%	Vitrinertita	Depende de quem predomina: - Vitrênio - Fusênio
V + I + E > 5% cada	Trimacerita	Depende de quem predomina: - Vitrênio - Clarênio - Durênio - Fusênio

FONTE: "Stach's Textbook of Coal Petrology", E. Stach.

## 2 - BENEFICIAMENTO DE CARVÕES - INTRODUÇÃO

Beneficiamento (ou lavagem) de carvões, no seu sentido mais amplo, conceitua-se como sendo o conjunto de operações unitárias necessárias para separar, em maior ou menor grau, as impurezas (material inorgânico não combustível) da matéria carbonosa propriamente dita (material orgânico), em condições aceitáveis sob o ponto de vista técnico e econômico. Conforme a finalidade de utilização do carvão, as características do carvão lavado e o método empregado no seu beneficiamento irão variar. Os carvões brasileiros são atualmente utilizados nos seguintes segmentos industriais<sup>16,17</sup>:

- Siderurgia convencional de alto forno (em mistura com carvões metalúrgicos estrangeiros de boa qualidade, na proporção de 30%).

- Termoeletricidade.

- Geração de vapor de processo industrial em caldeiras.

- Redução direta de minério de ferro.

- Combustão em fornalhas para geração de gases quentes destinados à secagem de minérios, grãos, etc.

- Gaseificação, para a produção de gás combustível.

No beneficiamento de carvões, empregam-se processos e procedimentos adotados fundamentalmente com base em considerações técnico-econômicas. Em cada caso, os resultados finais e os custos correspondentes são cuidadosamente examinados, de modo que o carvão lavado possa competir com êxito no mercado consumidor.

A intensidade de beneficiamento que se efetua num carvão bruto é expressa por diversos níveis. Esta intensidade é determina

da por considerações comerciais (especificações do mercado) e pelos resultados dos ensaios de lavabilidade. Os níveis de lavagem podem ser classificados como (ver Tabela 9):

- Nível A: ausência de tratamento, os carvões são utilizados na condição de "run of mine", sofrendo geralmente alguma cominuição.

- Nível B: o carvão sofre cominuição para controle de "top size". Há remoção de refugo graúdo por cata manual.

- Nível C: beneficiamento somente da fração grosseira do carvão (+ 28 malhas).

- Nível D: beneficiamento de toda a fração grosseira. A fração fina (-28 malhas) é desaguada e embarcada junto com o carvão lavado, ou simplesmente colocado fora.

- Nível E: beneficiamento elaborado de todas as frações granulométricas. Adotada secagem térmica ou por centrifugação.

Nível F: beneficiamento completo e rigoroso de todas as frações granulométricas.

Pode-se dividir os processos de beneficiamento de carvões em dois grandes grupos:

- Processos baseados em diferenças de densidade, como exemplo temos jigagem, ciclonagem, vasos de meio denso, etc.

- Processos baseados em fenômenos superficiais, como exemplo temos flotação, aglomeração oleosa, etc.

Outro fator importante a considerar-se é o tratamento de efluentes e reciclagem da água em uma planta de beneficiamento. Geralmente o que se faz é um deságue deste rejeito por intermédio de espessadores, centrífugas, ciclones desaguadores ou bacias de sedimentação.

TABELA 3 - NÍVEIS DE LAVAGEM DE CARVÃO<sup>16</sup>

NÍVEL E BREVE DESIGNAÇÃO	ESCOPO	RECUP. % PESO	RECUP. DE BTU %	POTENCIAL DE REDUÇÃO		TRABALHO EFE- TUADO SOBRE O CARVÃO BRUTO	CIRCUITOS TÍPI- COS E EQUIPA- MENTOS USADOS	REFUGO	COMENTÁRIOS
				CINZAS	ENXOF.				
"A" Ausência de tratamento	Nenhuma prepa- ração	100	100	Nenhum		Nenhum o car- vão é transpor- tado ROM	Nenhum	Nenhum	Não é prática co- mum
"B" Apenas Cominui- ção	Somente contro- le do "top si- ze"	98-100	100	Nenhum a pouco	Nenhum	Britagem a 3" ou menos e re- moção de refu- go grão (ca- ta manual)	Peneira escal- padora; brita- dor ou quebra- dor rotativo (rotary brea- ker)	Fragmentos se- cos	Prática geral em todos os carvões ROM
"C" Tratamento dos Graúdos	Beneficiamento dos grãos	75-85	90-95	Razoã- vel a bom	Nenhum a pouco	Nível B segui- do de: peneir. e benef. a úm- ido	Idem ao B mais pen.vibr., jig, vasos meio den- so ou ciclones; desague	+3/8" drenado - 28M à lagoa de deposição.	Usado qdo. 3/8" é razoav. limpa ou mta. pedra presen- te na fraç.+ 3/8"
"D" Tratamento Deliberado	Beneficiamento dos finos	60-80	80-90	Bom	Regul.	Nível B segui- do de: peneir. úmido e benef. fração + 28 M 28 M x 0 fora	Idem ao C mais mesas concentr. ou "water only" ciclones. Algu- ma secagem ter- mica.	+1/4" drenado +28 M desag. -28 M filtr. ou lagoa	Usado para cv com boas caract. de lavabilidade
"E" Tratamento Elaborado	Beneficiamento dos ultrafinos	60-80	80-90	Bom a excel.	Regul. a Bom	Nível D mais o beneficiamento da fração 28M x 0	Idem ao D mais circuitos de flotação. Seca- gem térmica ou desague(centr.)	Idem ao D ex- ceto há mais finos	Usado para cv com excelentes carac. de lavabilidade.
"F" Tratamento Completo	Lavagem em profundidade	60-80	85-90	Carvão lavado excelente Middlings: ne- nhum a pouco		Nível E mais cominuição dan- do 2 prod: cv. lavado e mistos	Idem ao E mais equipamento a- dicional de co- minuição.	Substancial idêntico ao nível E	Obtenção de 2 ou mais produtos di- ferentes.

### 3 - BENEFICIAMENTO DE FRAÇÕES GROSSEIRAS

Em beneficiamento de carvões consideram-se, geralmente, partículas grosseiras aquelas de tamanho superior a 0,6mm(28 mesh), pois geralmente este tamanho é o limite inferior do bom funcionamento (boa eficiência) dos aparelhos de separação gravimétrica. O beneficiamento desta granulometria baseia-se em diferenças de tamanho e densidade entre a matéria orgânica (concentrado) e a matéria inorgânica (rejeito). A separação pode ser inferida através de curvas de lavabilidade, as quais são construídas para uma determinada faixa granulométrica e medem a distribuição de massas e os teores de cinzas respectivos para diversas densidades. A eficiência dos aparelhos empregados em beneficiamento de carvão é feita pela comparação destas curvas com sua "performance".

#### 3.1. Estudos de Lavabilidade

Para se conhecer as características de lavabilidade de um carvão, isto é, sua maior ou menor facilidade de lavagem, faz-se necessário a realização de uma série de ensaios, aos quais denominamos "estudos de lavabilidade" ou ensaios "flutua-afunda"<sup>16,18</sup>. A informação resultante fornece uma série de dados, tais como: densidade de separação ou corte que se deve adotar para a obtenção de um determinado produto, teor de cinzas deste produto ou produtos, recuperação mássica, teor de cinzas no rejeito, etc.

A norma adotada no Brasil, para ensaios de flutua-afunda (curvas de lavabilidade) de carvões é a norma francesa NF 03-016<sup>19</sup>. As premissas básicas adotadas são as seguintes:

- Granulometria de operação: 0,5 mm por 10 mm.

- Peso da amostra (P):

$P = 1,5 M$  (kg) para lotes constituídos de carvão com "top size" de 30 mm ( $M \leq 30$  mm), sendo M o "top size" dado em mm.

$P = 3,0 M$  (kg) para lotes constituídos de carvão com "top size" maior que 30 mm ( $M > 30$  mm)

Para se conhecer a composição densimétrica de um carvão, utilizam-se líquidos orgânicos densos, com densidades variando de 1,30 a 2,80 e intervalos variáveis de densidades específicas, conforme as necessidades e o tipo de carvão que está sendo ensaiado. Geralmente o intervalo próximo a densidade de corte é de 0,05 unidades de peso específico, enquanto que para densidades elevadas, ele pode ser de 0,2 ou 0,3 unidades de peso específico. As misturas de líquidos orgânicos especialmente recomendadas são encontradas na Tabela 10.

TABELA 10 - PROPRIEDADES DE LÍQUIDOS ORGÂNICOS USADOS NOS TESTES  
FLUTUA-AFUNDA

COMPOSTO	FÓRMULA	DENSIDADE
Tolueno	$C_7H_8$	0,866*
1,1,1,-Tricloroetano	$C_2H_3Cl_3$	1,349*
Tetracloroetileno (percloroetileno)	$Cl_2C:CCl_2$	1,631**
Etileno dibrometo	$C_2H_4Br_2$	2,172***
Iodeto de metila	$CH_3I$	2,280*
Tetrabromoetano	$CHBr_2CHBr_2$	2,964*
Certigrav§	Solvente halogenatados (cloretos-brometos)	Qualquer dese- jada

\*  $d \frac{20}{4}$  densidade do líquido a 20º C  
densidade da água a 4º C

\*\*  $d \frac{15}{4}$  densidade do líquido a 15º C  
densidade da água a 4º C

\*\*\*  $d \frac{25}{25}$  densidade do líquido a 25º C  
densidade da água a 25º C

§ Nome comercial

Para o teste de flutua-afunda propriamente dito, coloca-se o carvão em diferentes líquidos com densidades diferentes, separando-se assim frações de carvão com diversas densidades.

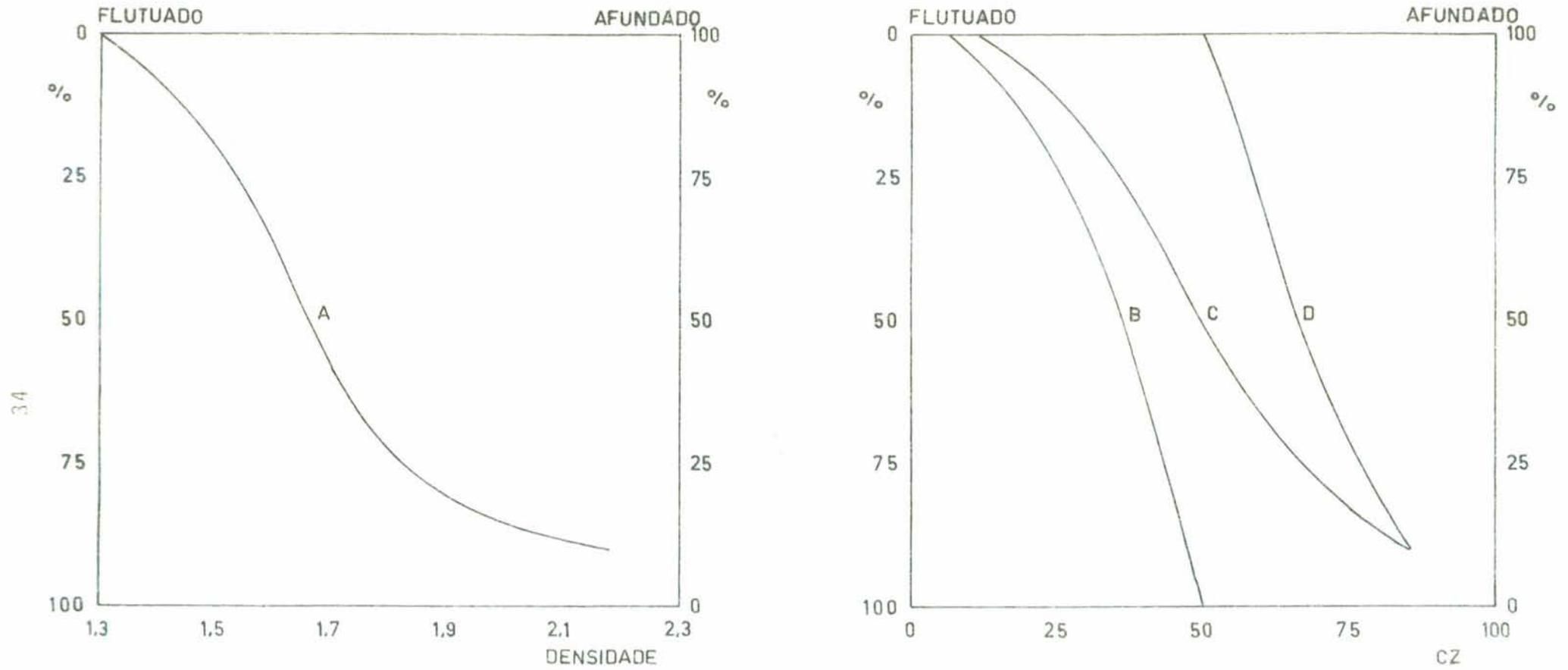
Após esta separação do carvão em diversas faixas densimétricas, plotam-se as seguintes curvas (ver figura 3):

- Curva densimétrica, na qual temos o produto flutuado (ou afundado) acumulado em função da densidade de corte (curva A - figura 3).

- Curva dos flutuados, na qual temos o peso cumulativo do flutuado em função do teor de cinzas acumuladas no mesmo material (curva B - figura 3).

FIGURA 3

CURVAS DE LAVABILIDADE



- A - CURVA DENSIMÉTRICA
- B - CURVA DOS FLUTUADOS
- C - CURVA ELEMENTAR
- D - CURVA DOS AFUNDADOS

- Curva dos afundados, na qual temos o peso cumulativo do afundado em função do teor de cinzas acumuladas no mesmo material (curva D - figura 3).

- Curva elementar na qual temos o peso cumulativo de material flutuado em função do teor de cinzas que possui a fração de carvão na densidade correspondente (curva C - figura 3).

Semelhantes curvas podem ser plotadas para o enxofre contido nos carvões, as quais são utilizadas para a sua remoção<sup>20</sup>.

Dentre os métodos existentes para a determinação da precisão em uma dada separação gravimétrica do carvão, ou para poder-se comparar diferentes processos de beneficiamento, o método mais empregado é a curva de partição ou curva de "TROMP"<sup>21</sup>. Para a sua construção utilizam-se os testes de flutua-afunda dos produtos (concentrado e rejeito) de um determinado lavador. Uma curva típica está representada na figura 4 e expressa o comportamento ideal do carvão em um certo lavador. Pode-se definir nesta curva a chamada densidade de separação ou de corte, a qual é a densidade em que 50% do material flutua e 50% afunda.

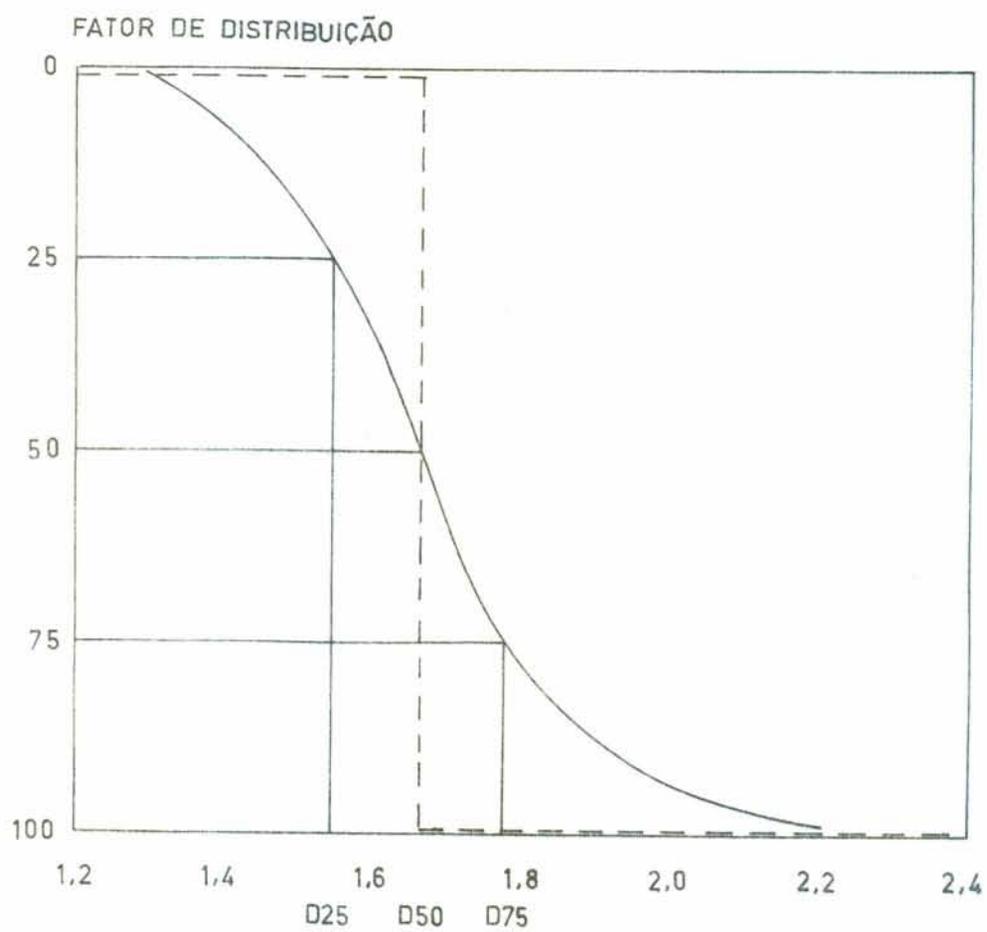
Para calcular-se o erro provável (Ep) de um sistema de beneficiamento faz-se (ver figura 4):

$$E_p = \frac{D_{75} - D_{25}}{2}^{21}$$

Nota-se por esta fórmula que quanto mais eficiente for o lavador mais vertical será a sua curva de "TROMP" e menor será o Ep.

FIGURA 4

CURVA DE TROMP



Define-se também imperfeição (I) para um equipamento de lavagem como:

$$I = \frac{E_p}{D50 - 1}^{2.1}$$

No caso de equipamentos que utilizam água como meio de separação (jigues, mesas concentradoras, etc.)

$$I = \frac{E_p}{D50}^{2.1}$$

Para os equipamentos que empregam meios densos, um dos fatores que contribue para a diminuição da precisão em equipamentos de lavagem é o chamado "Near-Gravity-Material"<sup>18</sup>, que é o material (quantidade) que tem  $\pm 0,1$  unidades de densidade em relação a densidade de corte. De um modo geral, quanto maior for sua quantidade, maior será a imperfeição na lavagem e muito menor será a eficiência de lavagem.

### 3.2. Processos de beneficiamento

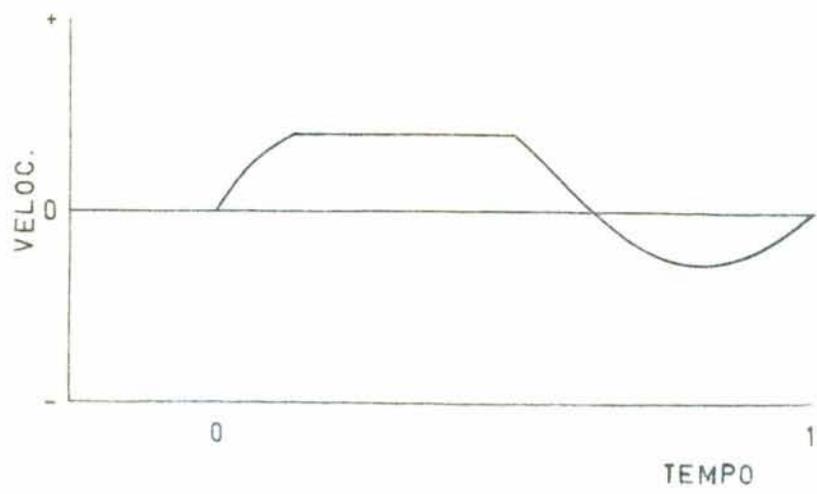
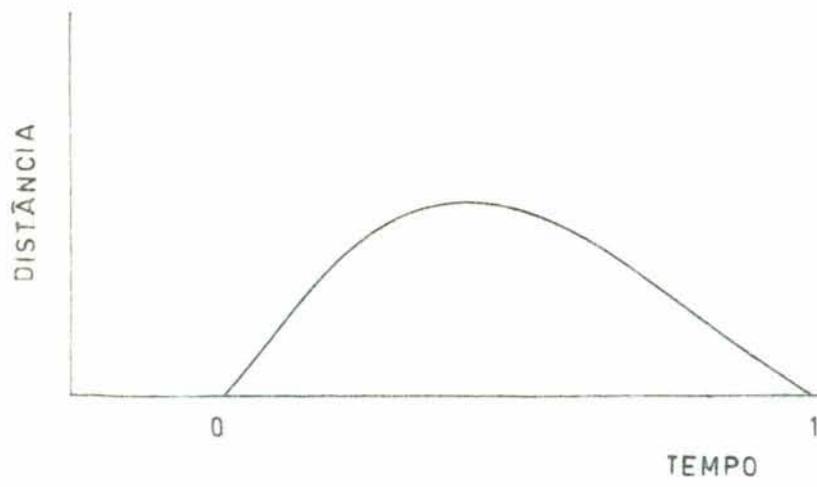
#### a - Jigagem

Jigagem é um processo de estratificação de partículas no qual o rearranjo destas resulta de uma expansão e compactação alternada de um leito de partículas por corrente de fluido pulsante. A direção vertical do fluxo do fluido reverte-se periodicamente. O arranjo das partículas resultante das distintas velocidades de sedimentação fazem com que a densidade das partículas do leito aumente do topo do jig para o fundo<sup>22, 23</sup>.

A separação das partículas por jigagem resulta da aplicação repetida de um movimento complexo cíclico da água. Nesta constante mudança do sistema hidrodinâmico, o golpe de impulsão governa, por criação de uma velocidade inicial e rápida da água, o erguimento das partículas no leito. As partículas são movidas para cima onde criam uma expansão do volume do leito. Na mesma subida da velocidade da água, as partículas de menor densidade (carvão), serão movidas mais alto no leito que as partículas de maior densidade (rejeito), tendo estas o mesmo tamanho. O sistema desacelera para a velocidade zero e muda de direção para subsequente golpe de sucção. Deve ser enfatizado que nem todas as partículas no sistema alcançam velocidade zero no mesmo instante. Sob esta condição do leito expandido, cada partícula tem alguma mobilidade para reposicionar-se em relação as outras. Após, as partículas movem-se para baixo para formar uma posição de leito compacto, onde a separação entre as partículas de menor tamanho continua, depois que os corpos maiores tiverem ocupado posições fixas. O fenômeno que ocorre durante o ciclo da jigagem pode ser descrito esquematicamente pela figura 5.

FIGURA 5

ONDA DE CHOQUE PROVOCADA PELO JIGUE



Estas curvas mostram uma rápida aceleração inicial durante o qual o leito move-se para cima como uma única unidade. Um período segue-se quando a aceleração bruscamente muda e a velocidade da água que está subindo torna-se constante. O intervalo AB fornece condições para uma abertura do leito do jigue quando as partículas movem-se em relação uma das outras. Quando o período de sucção começa e a água alcança sua altura máxima, a velocidade de ascensão tende a reverter sua direção. A velocidade do fluxo na etapa de sucção é modificada pela força da gravidade, resistida pelo atrito do ar e pelo movimento do êmbolo.

Três fenômenos distintos são comumente citados como sendo responsáveis pela estratificação durante a jigagem<sup>2,4,25</sup>:

1 - Aceleração Diferencial: quando a água está em sua posição mais alta o rejeito cairá mais rápido que o carvão. Em outras palavras, o rejeito tem uma razão de aceleração mais alta. Este fenômeno é conhecido como aceleração diferencial. Depois de um certo tempo, contudo, as partículas maiores de carvão começarão a cair mais rápido que as partículas menores do rejeito. Conseqüentemente deve haver um tamanho de carvão com uma velocidade maior que aquela da cinza que é algo menor em tamanho, mesmo pensando que o carvão tem uma densidade relativa mais baixa que o rejeito. Se for permitido ao carvão maior cair uma distância maior que o rejeito menor, formará uma camada em baixo do rejeito, de modo que produzindo erros na lavagem. Portanto o tempo deve ser cuidadosamente controlado durante a qual se efetua a aceleração diferencial. Isto significa marcar a frequência de pulsação muito precisamente.

2 - Sedimentação Impedida: devido que as partículas es

muito juntas no lavador, elas interferem mutuamente uma com as outras na razão de sedimentação. Algumas das partículas portanto, serão diminuídas na sua sedimentação por outras partículas. Esta sedimentação impedida efetua uma ajuda para fazer a separação mais rápida e, uma vez que a separação tem sido encontrada, ela ajuda a certificar que o material continua estratificado.

3 - Consolidação: em direção ao fim do golpe de sucção as partículas estão tão juntas que seus movimentos cessam e o leito começa a compactar. As partículas maiores compactam primeiro, então as partículas menores, nos interstícios, consolidam. Portanto, as partículas maiores cessam sua sedimentação primeiro, enquanto que as partículas menores podem passar através dos interstícios do leito quando procede-se esta consolidação. O rejeito pequeno cairá mais rápido que o carvão de igual tamanho, de modo que a mais larga separação de densidade relativas pode tomar lugar.

Os jigues basicamente, dividem-se em duas classes:

- Jigues hidráulicos: são aqueles que utilizam água como meio pulsátil para a separação.

- Jigues pneumáticos: são aqueles que utilizar ar como meio pulsátil para a separação.

Os jigues hidráulicos dividem-se, por sua vez, em duas classes:

- Jigues de crivo fixo: são aqueles nos quais o leito se forma sobre uma superfície estacionária perfurada, através da qual o líquido é forçado em movimento pulsatório.

- Jigues de crivo móvel: são os quais o leito se forma dentro de um tabuleiro de fundo perfurado e que é dotado de mo-

mento alternativo vertical dentro de um tanque, provocando movimento pulsatório da água através do fundo do tabuleiro.

Estes jiques de crivo fixo podem ser de três gêneros:

- Jiques de pistão
- Jiques de diafragma
- Jiques pulsadores

Os principais jiques atualmente usados são encontrados na Tabela 11.

TABELA 11 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS JIGUES EMPREGADOS NA LAVAGEM DE CARVÃO<sup>2 5</sup>

N O M E	PRODUTOS OBTIDOS	CAPACI- DADE	GRANULOME- TRIA USO	GENERALIDADES
Link-Belt	3			Possui dois compartimento os quais são divididos em células, tendo controle de água e ar separados.
McNally Norton	3	750-1000 T/h	+28 Malhas -8 poleg.	Possui 2 compartimentos sendo o 1º dividido em 2 células e o 2º em 3. Cada célula possui controle de água e ar.
McNally Mogul	3	Até 700 T/h	+29 Malhas - 3 poleg.	Variante do McNally Norton para carvões com pouco rejeito.
Jeffrey	3		+28 Malhas - 6 poleg.	É um jigue de diafragma. A frequência e força de pulsação podem ser ajustados. Possui controle automático para saída de rejeitos.
O R C	3	Variada	+60 Malhas - 6 poleg.	É projetado em células individuais. Pode-se unir unidades independentes para a formação de um aparelho maior.
Jigue de Feldspato McNally	2	100 T/h	-1/2 pol.	Possui 3 células independentes com entrada de água e ar. A tela do jigue possui abertura maior que o carvão e menor que o feldspato.
BATAC	3	12-20 T/h	+ 100 Malhas	Possui 3 compartimentos com 6 células. Câmaras de ar colocadas abaixo da grade do jigue.

#### b - Jigue Batac

O jigue Batac, desenvolvido na Alemanha (Schuchteman e Kremer - Caum e Humboldt Wedag), é um jigue de grande capacidade, e tem seu princípio de funcionamento baseado no jigue japonês TACUB<sup>26</sup>. Sua principal diferença para o jigue do tipo BAUM são suas câmaras de ar que são colocadas abaixo da grade do lavador, possibilitando uma distribuição uniforme da água de lavagem com um aumento na área útil do lavador. O princípio que causa a pulsação da água é o mesmo do jigue Baum, contudo, os métodos de distribuição de ar, a ação de pulsação do ar e o controle do leito foram grandemente melhorados e automatizados.

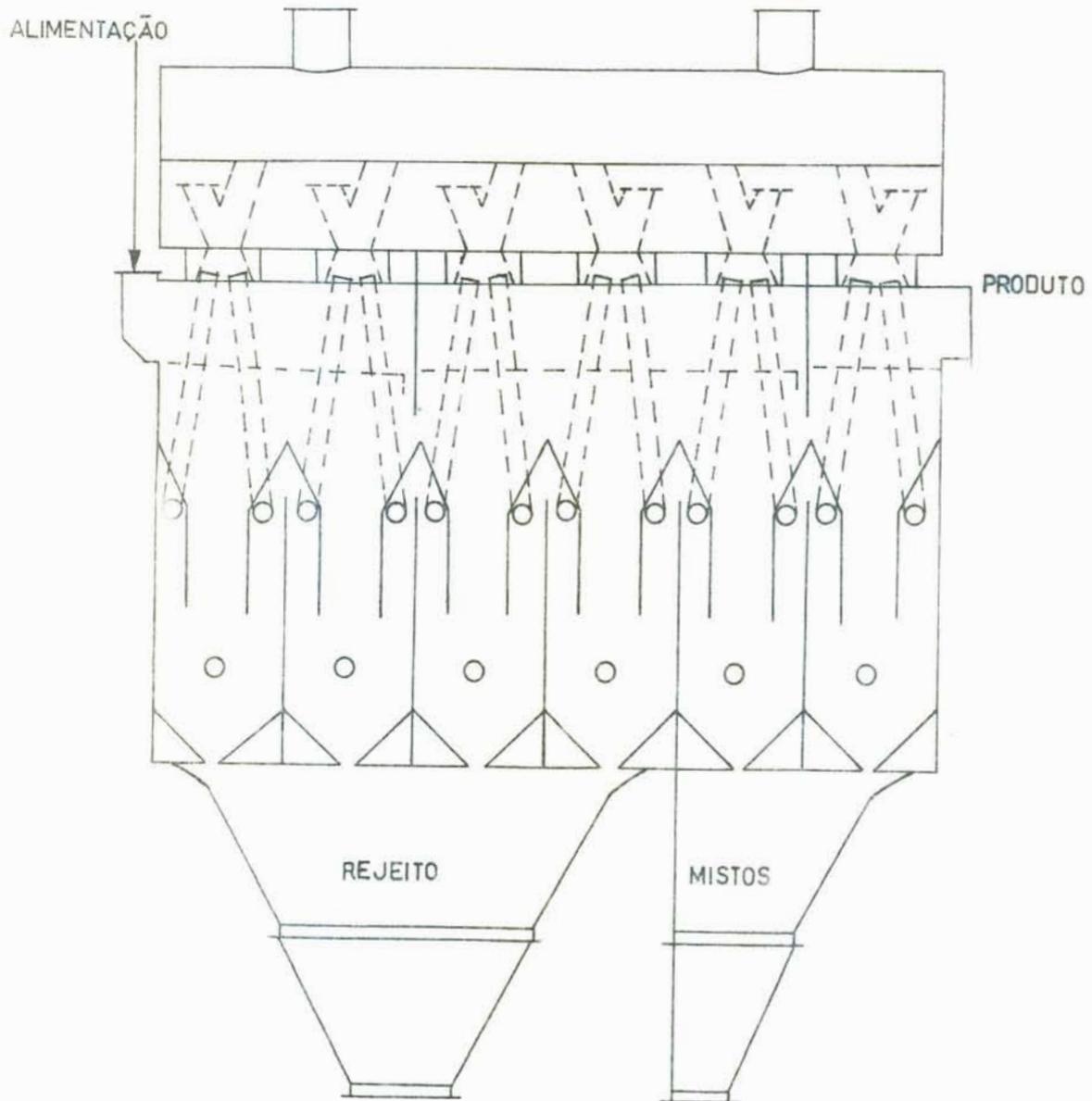
No jigue BATAC não há câmaras de ar lateral (como no jigue BAUM). Ele é desenhado com uma série de câmaras de ar múltiplas, comumente duas para cada célula, estendendo-se em baixo do leito do jigue (ver figura 6) provendo-o, assim, de uma distribuição uniforme de ar<sup>27</sup>.

Na figura 6 pode-se ver um jigue BATAC de 6 células e 3 compartimentos. Materiais com alto peso específico são descarregados, através da grade, pelos ejetores de rejeito e mistos. Quando do beneficiamento de partículas menores de 5/8 de polegadas, pode-se usar um leito de feldspato em certos compartimentos.

Com estas modificações, o jigue BATAC permite a lavagem de grandes quantidades de material (13 - 20 ton/h.m<sup>2</sup>) com boa eficiência para as frações finas<sup>28,29</sup>, como por exemplo o utilizado na Pennsylvania Mines Corp<sup>30</sup>.

FIGURA 6

JIGUE BATAÇ



### c - Ciclones de meio denso

O ciclone de meio denso, utilizado na lavagem de carvão, é uma unidade cilíndrica-cônica com um ângulo de aproximadamente 20°. A alimentação, tanto do minério quanto do meio denso, é feita tangencialmente à secção cilíndrica, onde um turbilhamento é criado devido a força rotacional induzida. Partículas pesadas movem-se, então, na direção do ápex ao longo das paredes do ciclone. As partículas de pouca densidade (carvão) fluem para a parte central do ciclone onde são retiradas pelo vortex<sup>31</sup>.

O ciclone de meio denso é usualmente montado com um ângulo de 10° com respeito a horizontal, para permitir a retirada do seu material quando o ciclone não está operando.

Este ciclone normalmente utiliza uma polpa de magnetita finamente moída misturada em água como um meio para efetuar a separação entre o carvão e suas impurezas no campo de centrifugação<sup>32, 33</sup>. Na tabela 12 observa-se a capacidade dos ciclones de meio denso utilizados no beneficiamento de carvões.

TABELA 12 - CAPACIDADE DOS CICLONES DE MEIO DENSO UTILIZADOS NO BENEFICIAMENTO DE CARVÕES<sup>2 9</sup>

TAMANHO (mm)	DIÂMETRO (pol)	FLUXO DO MEIO DENSO (m <sup>3</sup> /h)	ALIMENTAÇÃO (T/h)	UNDERFLOW (T/h)	ALTURA DA CAR- GA MÍNIMA - PRESSÃO (m)
200	8	16	6,5	4,0	1,3
350	14	52	20,0	12,5	3,15
500	20	125	50,0	30,0	4,5
600	24	190	75,0	45,0	5,4
700	28	265	105,0	65,0	6,4

#### d - Vasos de meio denso

Vasos de meio denso são aparelhos que separam carvões de suas cinzas pela imersão de carvões brutos em um líquido com densidade intermediária. O processo é especialmente vantajoso quando trabalha com carvões de peso específico menor que o usado em jigues ou carvões com alta percentagem de "near gravity material". Outra vantagem é que o sistema possibilita a produção de uma ampla gama de produtos diferentes com um pequeno ajuste no meio denso utilizado.

O sistema consiste de um vaso separador que é preenchido com uma suspensão de magnetita (ou outro material) em água. Possui um mecanismo para extração de carvão flutuado, um sistema de remoção de mistos (quando um terceiro produto é desejado) e, um sistema de remoção de rejeitos. Para a remoção da magnetita dos produtos, faz-se necessário um separador magnético. Possui também, um sistema de alimentação de magnetita, para suprir as perdas, e um controle de densidade de polpa para manter a den

tidade constante<sup>34</sup>.

Dentre os vasos de meio denso utilizados atualmente, para o beneficiamento de carvão, pode-se citar<sup>35</sup>:

- WEMCO CONE-TYPE VESSEL
- McNALLY LO-FLO DENSE MEDIA VESSEL
- McNALLY TROMP THREE-PRODUCT DENSE MEDIA VESSEL
- McNALLY DENSE MEDIA BATH
- DMS DENSE MEDIUM PRECISION COAL WASHER
- LINK-BELT TANK HEAVY MEDIA SEPARATORS
- BARVOYS VESSEL
- HAND P HEAVY MEDIA WASH BOX
- NELDCO SUBMERGED FEED PROCESSOR
- WEMCO DRUM SEPARATORS

De um modo geral os vasos de meio denso trabalham com granulometrias entre 6,3 mm a 35,6 mm e sua capacidade varia de 10 a 800 Ton/h.

#### 4 - BENEFICIAMENTO DE FRAÇÕES FINAS

Em beneficiamento de carvão define-se finos, como sendo aquele material com granulometria inferior a 0,6 mm (28 mesh)<sup>36</sup>. Ao contrário das frações grosseiras, em que todos os métodos de beneficiamento são baseados em diferenças de densidade entre o carvão e a matéria inorgânica, para os finos existem processos baseados em fenômenos físico-químicos superficiais, nos quais sua melhor ou pior eficiência de separação é função do "rank", liberação, química interfacial, etc.

##### 4.1. Processos baseados em diferenças de densidade

###### a - Ciclonagem

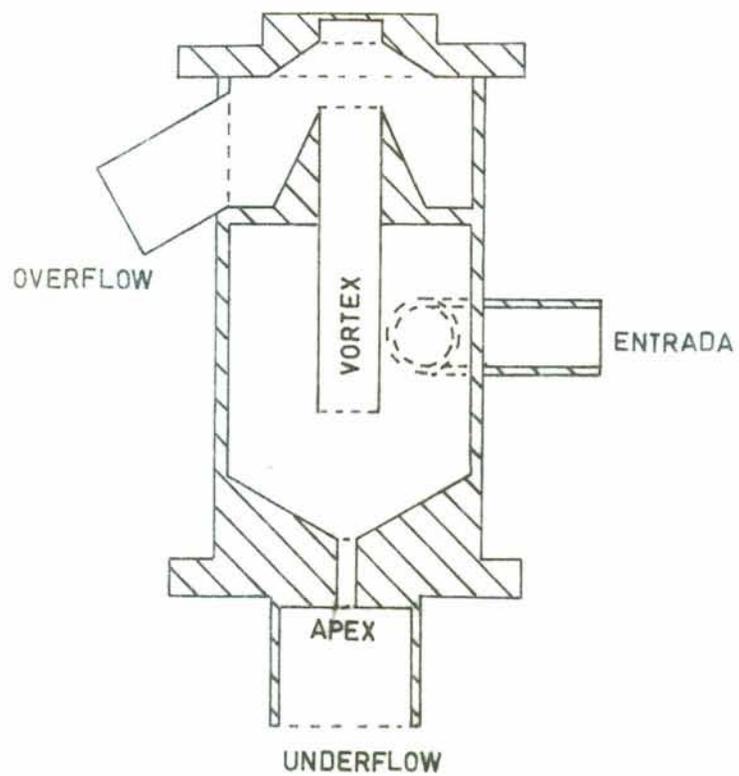
Para o beneficiamento de frações finas, temos basicamente dois tipos diferentes de hidrociclones<sup>37, 38, 39, 40</sup>:

###### 1 - "Water-only cyclones"<sup>41, 42, 43</sup>

Nestes tipos de ciclones, a polpa de alimentação entra tangencialmente e gira ao longo de sua parede em direção ao apex. Devido ao seu formato, ocorre a formação de um meio denso autôgeno, separando assim as partículas por densidade. As mais densas são descarregadas pelo apex e as menos densas pelo vortex (Ver figura 7)<sup>44, 45, 46, 47</sup>.

FIGURA 7

WATER-ONLY CYCLONE



## 2 - "Circulating Bed Concentrator" - (CBC)

Seu princípio trata-se principalmente de dois métodos de separação combinados. A parte inferior consiste de um leito estacionária com alta concentração de sólidos no qual se formam correntes de convergência verticais. Neste leito cria-se uma separação pelas correntes de convergência de forma que as partículas grosseiras ou pesadas se deslocam com preferência para a parede, e são levadas pela corrente radial e chegam ao fundo do plano e após ao ápice central onde são descarregadas. As partículas leves ou finas se concentram normalmente no interior do leito, onde são transportadas para cima e são capturadas pela turbulência secundária onde são levadas até a descarga de overflow. Deste modo o princípio CBC atinge corte de separação bem mais grossos do que os hidrociclones cônicos convencionais<sup>4 8</sup>.

### b - Jigues de leito de feldspato

O jigue de leito de feldspato é basicamente um jigue do tipo Baum que utiliza uma camada de feldspato ou outra rocha com dureza elevada, para proporcionar a separação do carvão de suas impurezas. No movimento de impulsão, o leito se move verticalmente abrindo orifícios e permitindo a passagem de partículas de rejeito. No movimento seguinte, de sucção, o leito fecha impedindo a passagem das partículas menos densas, ocorrendo assim a separação. Possui uma capacidade de 0,8 - 1,2 T/h.pol. de largura (0,03 - 0,04 T/h.mm de largura), dependendo da granulometria e características do carvão a ser lavado. Cada célula é independente, sendo que em cada uma pode-se regular a pulsação do leito sem a interferência das células adjacentes.

Este jigue efetua boa separação para carvões contendo percentagens de "near gravity material" inferiores a 15%. Embora nenhuma deslamagem é requerida (trabalha com granulometria.. - 12,5 mm), uma pouca redução no teor de cinzas é obtida em frações menores de 50 malhas. Exemplo deste jigue de feldspato atualmente utilizado em beneficiamento de carvão é o "McNally fine coal washer"<sup>49</sup>.

### c - Mesas Concentradoras

Mesas concentradoras empregam o princípio do movimento de partículas em um fluido sobre uma série de estrias, as quais são sacudidas rapidamente para efetuar a separação do carvão por tamanho de partícula e peso específico. Essencialmente as mesas consistem de canaletas sobre os quais temos um "deck" coberto de borracha e um mecanismo de vibração. Devido que a estrati

ficação e a separação de partículas não é completa ao longo de uma estria, uma série de estrias são usadas, repetindo-se o ciclo de estratificação de estria para estria, obtendo-se assim produtos cada vez mais puros em direção ao fim da mesa concentradora<sup>50, 51</sup>.

Atualmente, em beneficiamento de carvão, as mesas mais utilizadas são as seguintes<sup>49</sup>:

- SUPERDUTY DIAGONAL-DECK
- CONCENCO 77 DIAGONAL-DECK
- CONCENCO 88 DIAGONAL-DECK

Suas alimentações variam de acordo com a granulometria, mas em geral comportam-se da seguinte maneira<sup>49</sup>:

GRANULOMETRIA (mm)	ALIMENTAÇÃO (Ton/h)
3,2 x 0	7,5
9,5 x 0	10,0
12,5 x 0	15,0

#### 4.2. Processos baseados em fenômenos superficiais

##### a - Flotação

O processo de flotação se fundamenta nas diversas propriedades físico-químicas superficiais dos minerais. Um sistema de flotação consiste basicamente de uma suspensão de vários componentes, através da qual bolhas são introduzidas nesta polpa mineral, permitindo a separação entre os minerais valiosos e sua ganga<sup>54, 55</sup>. Tal separação é possível pelo estabelecimento de condições de superfície, que permitem uma adesão seletiva dos minerais úteis às bolhas de ar<sup>56, 57</sup>. Estas unidades bolha-partícula possuem uma densidade menor do que a água (fase líquida mais empregada) e levitam até a superfície onde ficam flutuando junto a espuma formada pela adição de agentes tensoativos<sup>58</sup> (espumantes). As partículas da ganga, por outro lado, permanecem na suspensão já que são hidrofílicas. Tem-se, portanto, dois produtos finais: um concentrado, rico do componente útil, na espuma, e um rejeito, rico em minerais da ganga, em suspensão.

Normalmente os minerais associados ao carvão são hidrofílicos, necessitando assim de uma alteração de suas características superficiais. Assim, é de prática comum, a adição de reagentes químicos que conferem hidrofobicidade a uma determinada espécie mineral (chamados coletores) e depressores aqueles que reduzem a flotabilidade de outros, aumentando a hidrofobicidade superficial destas partículas e impedindo a adsorção dos coletores (ver Tabela 13).

Um resumo dos principais parâmetros que têm sido estudados na flotação de carvão é descrito na tabela 14. As células mais utilizadas atualmente para flotação de carvão são resumidas na tabela 15<sup>69</sup>.

TABELA 13 - REAGENTES EMPREGADOS NA FLOTAÇÃO DE CARVÕES<sup>59, 60, 61, 62</sup>

	REAGENTES	TIPO	GRUPO FUN- CIONAL	A Ç Ã O
I	Querosene Óleo combustível	Não polar	-	Coletores: adesão seletiva das gotas de óleo nas partículas de carvão.
II	Álcoois alifáticos Piridina, óleo, alcatrão	Ativador superfi- cial	Hidroxila Nitrogenados	Espumantes, também coletores, aumentando a hidrofobicidade. Melhora a eficiência dos coletores do tipo I.
III	NaCl, CaCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaOH, HCl CaO Silicatos e fos- fatos	Inorgâni- co	Sais solú- veis	Ativador (flotação salina) Reguladores de pH Depressor de sulfetos <sup>63, 64</sup> Depressores de ganga
IV	Amido, dextrina, CMC (carboxime- til celulose)	Colóides orgânicos	OH COOH	Depressores de carvão

TABELA 14 - FLOTAÇÃO DE CARVÃO - GENERALIDADES<sup>55, 65, 66, 67, 68, 69</sup>

RANK	Em geral, a flotabilidade dos carvões aumenta com seu aumento no rank (carbonificação), até carvões betuminosos (classificação norte-americana), e de cresce para antracitos. Isto ocorre devido a perda de oxigênio com o aumento do rank, aumentando assim a flotabilidade. Com o aumento ainda maior da carbonificação, a flotabilidade diminui devido a mudança na cristalização da matéria carbonosa. Este comportamento relaciona-se com um aumento da hidrofobicidade superficial das partículas que se determina através de medidas do ângulo de contato na interface sólido/ar/solução.
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	O tamanho máximo em flotação para carvões betuminosos gira em torno de 3-6 malhas e para antracitos 14 - 20 mesh <sup>70</sup> . Nota-se que para partículas maiores, a densidade do conjunto bolha-partícula é maior do que a densidade do meio impedindo a sua levitação. A flotabilidade é proporcional a área superficial e inversamente proporcional a massa da partícula <sup>63</sup> . Para frações muito finas ocorre perda da seletividade de flotação ocorrendo, também, a flotação do material de ganga <sup>71, 72</sup> .
DENSIDADE DE POLPA	Em flotação de carvões, a maior recuperação encontrada ocorre em concentrações em torno de 12% <sup>73</sup> , contudo, na prática, a densidade de polpa varia entre 6 a 25% dependendo do rank, tipo de carvão, e percentagem de cinzas.
TEMPERATURA	A temperatura da polpa tem pouca influência na velocidade de flotação no intervalo de 3 a 50°C <sup>74</sup> . Não está explicado o porquê deste comportamento. Sabe-se, contudo, que a viscosidade dos reagentes, a tensão interfacial e as propriedades dos coletores e espumantes varia com a temperatura.
CONSUMO DE REAGENTES	Com granulometrias menores e com a diminuição no "rank", a quantidade de reagentes (coletores) aumenta por razões de área superficial (maior) e por diminuição do grau de hidrofobicidade <sup>75, 76, 77</sup>

pH	O pH ótimo para flotação varia, em termos gerais, de 6 a 8. Nestes pHs a superfície do carvão, aparentemente, adquire uma carga superficial próxima de zero, tornando a hidrofobicidade da superfície máxima.
GRAU DE OXIDAÇÃO DA SUPERFÍCIE	A flotabilidade diminui com o aumento da oxidação de superfície do carvão, porque este fenômeno diminui sua hidrofobicidade <sup>78</sup> .

TABELA 15 - CÉLULAS UTILIZADAS EM FLOTAÇÃO DE CARVÃO<sup>6 9</sup>

<i>T I P O</i>	<i>CAPACIDADE</i>	<i>P O T Ê N C I A</i>
Wemco	3 - 5 Ton/h	0,75 - 1,10 kw/Ton
Heyl and PATTERSON	2,5 - 15 Ton/h	0,75 - 1,5 hp/Ton
DENVER	5 - 10 Ton/h	1,5 - 2 hp
HUMBOLDT-WEDAG	0,9 Ton/h	1,5 kw

### b - Aglomeração oleosa

O processo de aglomeração oleosa está baseado na adsorção seletiva de um óleo no ente mineral de interesse ou na partícula-ganga do minério, agregando-a sob agitação conveniente da polpa e deixando outras espécies de partículas dispersas na suspensão<sup>3,79</sup>. No beneficiamento de carvões, este óleo, através de interação com as partículas carbonosas, formará aglomerados permanecendo a matéria inorgânica em suspensão<sup>80</sup>. O processo admite uma variante inversa: a aglomeração da matéria inorgânica hidrofílica pela adição de água a uma polpa oleosa do carvão. A matéria carbonosa hidrofóbica permanecerá dispersa na suspensão oleosa, segregadas as partículas inorgânicas hidrofílicas sob a forma de aglomerados.

Em países como Canadá, Austrália e Índia, a aglomeração oleosa de carvões tem sido largamente estudada em escala de laboratório e semi-industrial, competindo, no caso dos carvões australianos, com a flotação em termos de eficiência e viabilidade econômica. A aglomeração oleosa mostra-se atrativa no tratamento de finos pela sua alta seletividade e pelas características do produto final com baixa umidade, alto conteúdo em óleo e forma esférica<sup>3,81</sup>.

No Brasil, a Paulo Abib Eng. S.A. e o CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) têm estudado o processo<sup>82,83</sup>, com resultados promissores para carvões metalúrgicos. Bergmann<sup>3</sup> estudou sistematicamente as características de aglomeração oleosa de finos do carvão de Leão, concluindo que a formação destes aglomerados é função do "rank" e do grau de liberação das partículas.

III - EXPERIMENTAL

### III-EXPERIMENTAL

#### 1 - MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

##### CARVÃO

Todo o carvão utilizado no presente trabalho foi coletado junto à pilha de carregamento da mina de Candiota (da pilha o carvão segue em caminhões fora-de-estrada para a instalação de britagem. A pilha formada era cônica e possuía cerca de 5 m de diâmetro em sua área maior. A coleta foi realizada circularmente à pilha, em 5 linhas imaginárias que uniam a base ao vértice do cone, espaçadas regularmente. Em cada uma destas linhas coletaram-se amostras ( $\pm 4$  kg cada) a 5 alturas diferentes, espaçadas de forma regular<sup>86</sup>. O carvão coletado (cerca de 100 kg) foi devidamente ensacado em sacos de poliuretano, com aproximadamente 20kg de amostra em cada um, e transportado à Porto Alegre.

##### REAGENTES

Para os testes de flotação foram utilizados os seguintes reagentes:

Coletores: óleo diesel, querosene, Walker 405 Century Flotation e oleato de sódio.

Espumantes: óleo de pinho e metil isobutil carbinol (MIBC).

Modificadores:

Depressor: silicato de sódio.

Reguladores de pH: soluções de NaOH e HCl em concentrações de 10% e 30% em peso.

Nos testes de espessamento foram utilizados os seguintes flo

culantes e coagulantes: Magnafloc R 365 (poliacrilamida catiônica de alto peso molecular), amido de mandioca (polissacarídeo aniônico) e sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ ).

#### MEIOS DENSOS

Nos ensaios de lavabilidade utilizaram-se os seguintes líquidos orgânicos: bromofórmio, percloroetileno, benzina e tetracloreto de carbono.

#### EQUIPAMENTOS

Para a cominuição e estudos de granulometria, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- Britador de mandíbulas DENVER ML 60825-5
- Britador de mandíbulas DENVER ML 60500-4
- Britador de rolos DENVER ML 6082-5
- Vibrador elétrico para jogo de peneiras DECO F956A.
- Jogo de peneiras escala TYLER

Os ensaios de lavabilidade para frações grosseiras foram realizados em tanques de aço inox de 2 e 5 l sendo que o material flutuado foi retirado com escumadeiras, também confeccionadas de aço inox. Para as frações finas utilizou-se uma centrífuga WIRÖW KA WE-2 (1977) para auxiliar sua separação.

Os testes de jigagem descontínua realizaram-se em um jigue tipo BAUM, CIMAQ modelo SJ-1015. Para os testes de jigagem contínua utilizou-se o mesmo jigue com as seguintes adaptações: a) uma correia transportadora de velocidade variável para a alimentação do minério; b) um silo para a alimentação constante de material; c) entradas de ar para auxiliar a estratificação do leito de mi-

nério; d) um leito de saídas reguláveis para o rejeito e concentrado; e) caixas de retenção e espessamento dos produtos obtidos como rejeito e concentrado; f) fluxímetros para o controle de água e ar de entrada.

Realizaram-se os estudos de liberação em um microscópio a óleo, de luz refletida, ORTHOPLAN-POL, LEITZ com aumento de 500 x (objetiva 50 x, ocular 10 x) com lâmpada de halogênio.

Os corpos de prova foram preparados com ARALDITE CY 248 e ENDURECEDOR HY 951 a 10% em peso.

Os testes de flotação simples foram realizados em uma célula de flotação tipo DENVER D-12 para 4.000 ml modificada<sup>6,7</sup>, para que o nível de polpa fosse mantido constante (ver figura 9).

O ciclone utilizado nos testes foi um ciclone de fundo chato ("Circulating Bed Concentrator") RWS 1522 (75 mm), produzido pela AKW do Brasil e pertencente ao CIENTEC.

Outros equipamentos auxiliares ao estudo foram:

- Balança SARTORIUS 1104
- Balança OHAUS 119 S
- Medidor digital de pH Hellige 7-60
- Bomba de vácuo PRIMAR M 141
- Forno elétrico ELEKTRO de 3 kw
- Estufas BIOMATIC
- Materiais de vidro, etc.



## 2 - METODOLOGIA

### a - ESTUDOS DE MOABILIDADE E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Inicialmente, foram separados e passados por um britador de mandíbulas (abertura de 27 mm) cerca de 40 kg de carvão "run of mine". Este material foi quarteado até obter-se 6 porções com aproximadamente o mesmo peso (6 kg). Uma destas porções foi novamente quarteada formando-se 4 amostras com cerca de 1,5 kg cada. Cada uma destas amostras foi passada em dois jogos de peneiras (ver anexo 1). O material retido em cada peneira foi pesado e ensacado para uma futura utilização. Uma segunda destas porções iniciais foi passada por um britador de rolos com uma abertura de 18 mm, e logo após quarteada em 4 amostras de 1,5 kg. O procedimento segue tal como descrito acima.

As quatro amostras iniciais restantes foram britadas no mesmo britador de rolos com aberturas de 13, 9, 5 e 1 mm respectivamente, sendo que a amostra cominuída a 9 mm passou antes por este britador a 18 e 13 mm, e a de 5 mm passou antes por 18, 13 e 9 mm, e assim por diante. O procedimento posterior à cominuição segue aquele descrito anteriormente. Um fluxograma descrevendo estas operações encontra-se na figura 10.



## b - ENSAIOS DE LAVABILIDADE

Realizaram-se ensaios de lavabilidade para duas faixas granulométricas. Uma fração grosseira (+28, - 5/16 malhas) e uma fração fina (- 28 mesh).

Na fração grosseira, a norma seguida foi a norma francesa MF 03-016<sup>19</sup>, na qual a norma brasileira está baseada. Para esta faixa granulométrica o peso mínimo recomendado é:

$$P = 1,5 M = 1,5 \times 8 = 12 \text{ kg.}$$

Sendo M o "top size" dado em mm.

O carvão inicialmente pesado (14.400 g), foi colocado em um líquido de densidade 2,28 e separado em duas porções (-2,28 e .. +2,28). O flutuado neste líquido (-2,28), foi colocado em um outro líquido com densidade 2,20, separando-se esta fração em duas novas porções. Repetiu-se esta operação para diversas densidades de líquidos, obtendo-se assim amostras com diversos intervalos de densidade. Variou-se de 0,05 unidades de densidade para valores próximos a densidade de corte e 0,1 ou 0,2 para os extremos. Cada uma destas frações foi separada por filtração, lavada com solvente (benzina) e água, seca a 60° C durante 4 horas, pesada e analisada suas cinzas de acordo com a norma ABNT-MB-15<sup>88</sup>. Este método de análise de cinzas foi empregado durante todo o presente trabalho.

Para os ensaios de lavabilidade de frações finas (-28 malhas) o peso de carvão escolhido foi de aproximadamente 300 g. O procedimento realizado foi o mesmo do que para partículas grosseiras, (com exceção das densidades de corte), porém com o objetivo de acelerar a separação das frações centrifugaram-se as misturas a 3.000 rpm durante 3 min. As frações separadas foram lavadas com

solvente (benzina) e água, secas a 600 C e analisadas para cinzas como citado anteriormente.

#### c - JIGAGEM

O jigue empregado nos testes possui uma caixa de rejeitos de tamanho fixo (1.000 ml), que trabalha por bateladas<sup>8 9</sup>. No caso, mudou-se a quantidade de carvão a ser lavado por teste, variando-se assim o percentual de flutuados e afundados. Com isto tem-se a percentagem de material flutuado em função da alimentação. A granulometria escolhida para a alimentação ficou entre 10 e 3,5 malhas<sup>8 9</sup>. Fez-se, também, análise do teor de cinzas para as frações flutuadas e afundadas com e sem finos.

Com o jigue modificado, realizaram-se diversos testes de jigagem contínua para duas granulometrias diferentes, e em cada uma destas granulometrias variaram-se os fluxos de água e ar, e a altura do corte na descarga do material. Devido a imprecisão na medida da alimentação, esta foi escolhida de tal maneira que o leito de minério ficasse com uma quantidade mais ou menos fixa. A alimentação, de um modo geral, variou entre 30 e 50 kg/h.

#### d - ESTUDOS DE LIBERAÇÃO

O trabalho realizado constou em uma contagem da presença relativa de matéria orgânica e inorgânica para diferentes faixas granulométricas.

Primeiramente separou-se finos naturais de carvão em 7 faixas granulométricas diferentes, e fez-se 4 corpos de prova (seções polidas) para cada faixa granulométrica. Os corpos de prova foram fundidos em "formas de gelo" com dimensões 3 x 2 cm. A se-

quência de lixas utilizadas para o polimento foi a seguinte: lixas 220, 320, 400 e 600, e alumínas 0,5 e 0,1  $\mu\text{m}$ .

Em cada faixa granulométrica fez-se análise de 500 grãos espaçados da seguinte maneira: cada corpo de prova foi dividido em 5 linhas de 25 grãos. A distância entre cada um destes grãos foi de 1 mm e cada linha foi espaçada de 3 mm. Assim pôde-se varrer praticamente todo o corpo de prova.

Analisou-se para cada grão, em quantidades percentuais, o seguinte: presença dos três grupos de macerais<sup>15</sup> (grupo da vitrinita, inertinita e exinita), presença de pirita, presença de "outras" matérias inorgânicas. Neste trabalho definiram-se 2 tipos diferentes de partículas mistas: uma que tem matéria carbonosa entre 20% e 30% e outra com matéria carbonosa entre 5% e 95%. Definiram-se estes 2 tipos de misto devido ao uso que são destinados, ou seja, de acordo com a sua utilização necessita-se maior ou menor liberação. Paralelamente realizaram-se testes de flotação para as mesmas faixas granulométricas. Nenhuma técnica especial foi utilizada na determinação das percentagens de macerais e matéria inorgânica, mas como praticamente todo o trabalho ótico foi realizado somente por uma pessoa, pode-se admitir que, se houve erro, este teve uma mesma tendência. Como neste caso as percentagens relativas (variações de percentagens) são as que mais interessam, pode-se ter uma certa confiabilidade nestes resultados.

#### e - FLOTAÇÃO

Os testes foram realizados na célula de flotação DENVER descrita anteriormente. O conteúdo de sólidos foi fixo em 11% sen-

do que os parâmetros ensaiados foram: pH, concentração e tipo de reagentes, tempo de flotação, tipo de circuito e granulometria.

As vazões de ar utilizadas foram: 4.500 ml/min para os testes de flotação convencional e 2.000 ml/min para os testes de flotação aglomerante (floco-flotação).

#### f - CICLONAGEM

A concentração de polpa usada foi de 12% em peso. Utilizaram-se 5 diâmetros diferentes de ápex, e para cada um destes ápex coletaram-se amostras a 3 tipos diferentes de pressão, ou seja:

Ápex - diâmetro (mm)	Pressão (kg/cm <sup>2</sup> )
2	0,30 - 0,50 - 0,70
6	0,30 - 0,45 - 0,70
8	0,25 - 0,40 - 0,70
12	0,30 - 0,45 - 0,70
14	0,20 - 0,40 - 0,65

As frações obtidas no "underflow" e "overflow" do ciclone foram devidamente pesadas e analisadas para cinzas.

IV - RESULTADOS E  
DISCUSSÕES

## IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos seguindo uma ordem que inclui a caracterização do carvão de Candiota e testes de beneficiamento de finos e grossos.

### 1 - CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE

Com o objetivo de interpretar matematicamente as características de moabilidade de um determinado composto mineral, diversas equações têm sido postuladas<sup>95</sup>. Entretanto, devido a heterogeneidade dos minérios, estas equações carecem de universalidade e mantêm um caráter empírico que na maioria dos casos satisfaz o objetivo prático. No caso específico do carvão, o modelo matemático de Rosin-Rammler<sup>95</sup>, modificado por Bennett<sup>96</sup>, é o que melhor descreve a distribuição granulométrica resultante das etapas de britagem e moagem do carvão. A expressão matemática do modelo de ROSIN - RAMMLER - BENNETT<sup>96</sup> é a seguinte:

$$R = 100 e^{-(d/d')^n}$$

onde R é o peso de material retido na peneira de abertura d, d' a constante absoluta de tamanho e n a constante de distribuição de tamanho.

Esta equação na sua forma logarítmica resulta:

$$\ln R = \ln 100 - (d/d')^n$$

$$\ln \ln R = \ln \ln 100 + n \ln d' - n \ln d$$

ou

$$\ln \ln R = -n \ln d + K$$

sendo K uma constante

Plotando-se  $\ln \ln R$  por  $\ln d$  obtêm-se uma reta onde  $n$  é o coeficiente angular e  $d'$  calcula-se para  $d = d'$  resultando:

$$R = 100 \cdot e^{-1} = 36,79\%$$

onde  $d'$  é o tamanho de peneira que acumula 36,79% do material.

A figura 12 mostra os gráficos de Rosin-Rammler-Bennett ( $\ln \ln R$  versus  $\ln d$ ), para diversas frações resultantes da britagem do carvão de Candiota, a várias aberturas de britagem. A partir destes gráficos determinaram-se os valores de  $n$ ,  $d'$ ,  $d_{50}$  e o passante em 28 malhas e 1 mm em função da abertura de britagem (ver Tabela 16). Nos anexos 2, 3, 4, 5, 6 e 7 encontram-se os pesos acumulados em função da abertura de peneira e abertura de britagem.

A figura 12 mostra desvios da linearidade nas frações finas e grossas, fenômenos que são conhecidos e devem-se, no caso dos finos, ao acúmulo de material inorgânico nestas frações (vide anexos 2, 3, 4, 5, 6, e 7), e nas frações grosseiras pela pouca quantidade de material em relação a amostra original, diminuindo assim a precisão.

Pelos gráficos da figura 12 observa-se que a parte central destes, obedece fielmente a lei de Rosin-Rammler-Bennett, formando uma reta quase que perfeita. Ao fazer-se a regressão linear para os pontos centrais pertencentes as retas  $\ln$  abertura da peneira versus  $\ln \ln$  peso retido acumulado, obtêm-se equações de distribuição granulométrica para cada cominuição, descritas nos anexos 8 e 9. Com as aberturas do britador e seus respectivos coeficientes angular e linear que caracterizam a reta de distribuição granulométrica para uma certa britagem (ver anexo 9), testaram-se e-

FIGURA 12

CARVÃO DE CANDIOTA - GRÁFICOS DE ROSIN-RAMMLER-BENNETT

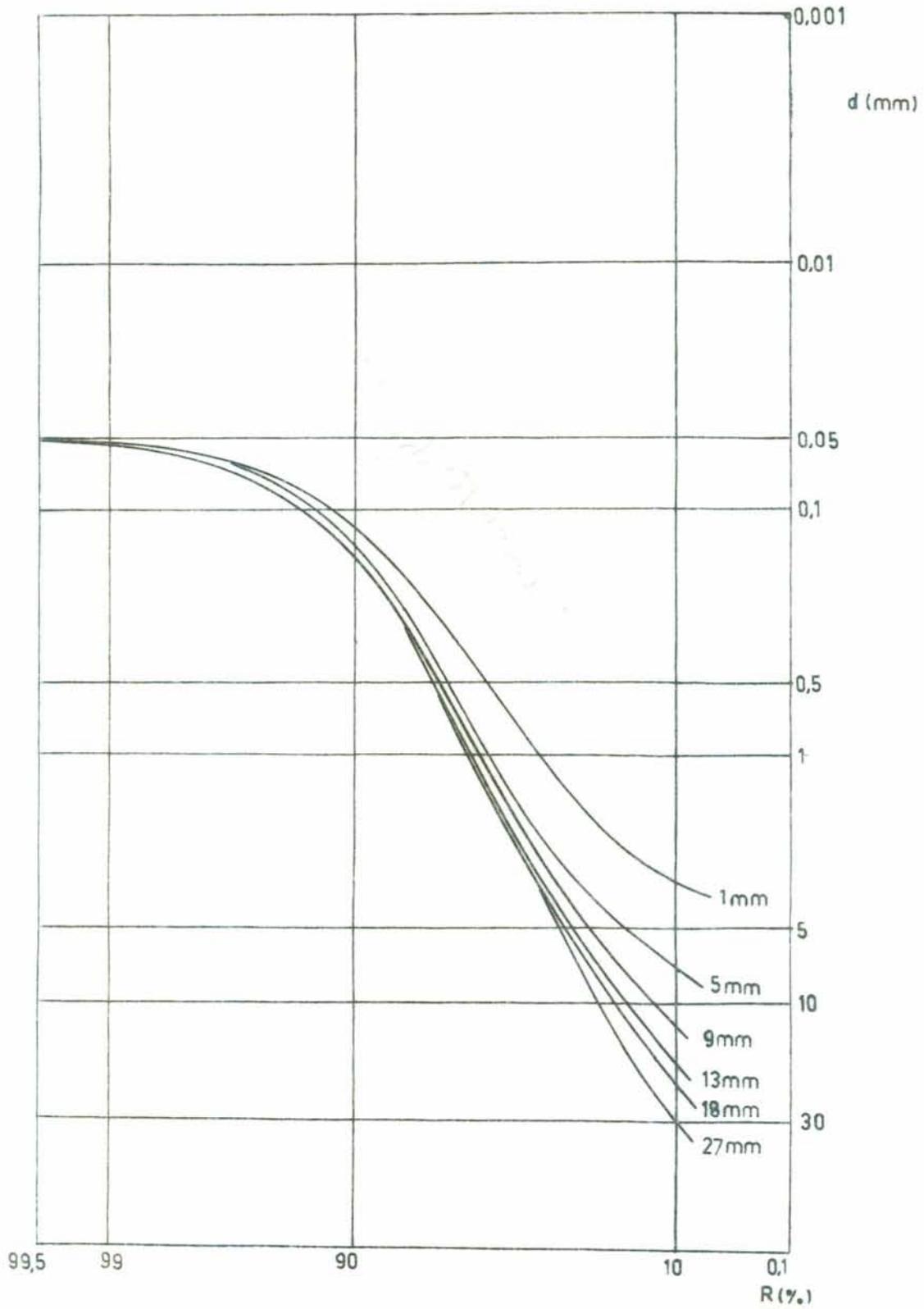


TABELA 16 - CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - CARVÃO DE CANDIOTA - VALORES DE  $n$ ,  $d'$ ,  $d_{50}$  e PASSANTE EM 28 MALHAS E EM 1 MM EM FUNÇÃO DA ABERTURA DE BRITAGEM

ABERTURA (mm)	$n$	$d'$ (mm)	1 mm (%)	-28 malhas (%)	$d_{50}$ (mm)
1	0,7581	2,05	46,0	34,0	1,23
5	0,6827	4,10	33,0	24,0	2,38
9	0,6330	5,10	28,0	23,0	3,10
13	0,6025	5,30	24,0	22,0	3,50
18	0,5363	5,40	22,0	21,0	4,00
27	0,5122	5,70	22,0	21,0	4,50

quações (reta, logarítmica, exponencial e potencial) para o ajuste destes parâmetros<sup>97,98,99</sup>. Os resultados obtidos mostram que para:

a) Abertura do britador versus coeficiente angular da reta para a britagem em pauta (com o coeficiente angular utilizado em  $\bar{m}_0$ ), o melhor resultado foi uma curva potencial do tipo:

$$y = ax^b \quad (x = n), \text{ onde:}$$

$$a = 0,052777387$$

$$b = 0,040997944$$

$$r^2 = 0,884496799$$

b) Abertura do britador versus coeficiente linear da reta para a britagem em pauta, o melhor resultado foi uma curva potencial do tipo  $y = ax^b$  ( $x = \text{coef. linear}$ ), onde:

$$a = 1,398321454$$

$$b = 0,009033784$$

$$r^2 = 0,967270778$$

Como, tendo-se agora a abertura da peneira em função do peso acumulado retido nesta peneira e, a abertura do britador em função da reta de sua distribuição granulométrica, temos consequentemente a abertura de britagem em função do peso retido acumulado e da malha da peneira que acumula este material.

Como exemplo de utilização destes resultados pode-se calcular a quantidade de material que acumula na peneira de 48 mesh (0,295 mm) com uma abertura de britagem de 9 mm.

Para 9 mm de abertura de britagem tem-se:

$$y = - 0,052777387 \cdot 9^{0,040997944} = - 0,057752377$$

Valor este do coeficiente angular da reta que rege a abertura da peneira versus seu peso retido (o valor está com o sinal trocado pois a equação foi ajustada com os módulos do coeficiente angular). Para abertura em relação ao coeficiente linear tem-se:

$$y = 1,398321454 \cdot 9^{0,009033784} = 1,426354386$$

Com estes resultados tem-se:

$$y = - 0,057752377 x + 1,426354586$$

Sendo que  $x = \ln$  abertura da peneira e  $y = \ln \ln$  peso retido acumulado na peneira de abertura  $x$ . Assim, para uma abertura de peneira de 48 mesh (0,295 mm) tem-se:

$$y = - 0,057752377 \cdot \ln 0,25 + 1,426354586 = 1,496857528 \quad e,$$

$$e^{e^y} = 87,15\%$$

O valor encontrado na prática foi de 84,87% o que implica em um erro de 2,69%.

Por outro lado, se quisermos saber que peneira acumula 80% de um carvão britado com uma abertura de 5 mm procederemos assim:

Para 5 mm de abertura do britador tem-se que o coeficiente angular = - 0,056377293 e o coeficiente linear = 1,418800604, logo  $y = ax + b$  ou  $x = (y - b)/a$  e a peneira  $x = 0,352963935$  mm.

Finalmente, para encontrar-se a abertura de britagem que origina 82% de material retido na peneira de 35 mesh (0,417 mm), resolve-se o sistema de equações que segue:

$$y = ax + b \quad \text{ou} \quad 1,446564860 = - 0,182721637 \cdot a + b$$

e

$$y = ax^b \quad \text{sendo} \quad a = 0,052777387 \cdot x^{0,040997944} \quad e$$

$$b = 1,398321454 \cdot x^{0,009033784}$$

A abertura do britador é de 13,66344961 mm.

Nos anexos 10 e 11 encontram-se resultados comparativos entre valores calculados e obtidos experimentalmente para as retas centrais da figura 12. O erro médio encontrado gira em torno de 5%.

Para efeitos de comparação utilizaram-se testes similares com carvão ROM da jazida de Leão I. As curvas para o carvão de Leão são apresentadas na figura 13 e Tabela 17. As características de friabilidade de ambos os carvões são muito diferentes e mostram que o carvão de Candiota apresenta características de moabilidade maior do que o carvão de Leão. Assim, por exemplo, no caso do carvão de Candiota, a quantidade de material menor do que 0,6 mm atinge valores em torno de 20%, quase que independente da abertura do britador. Entretanto, para o carvão de Leão, este valor é obtido somente quando a abertura do britador é de 1 mm.

O coeficiente "n" da equação de Rosin-Rammler-Bennett ou constante de distribuição de tamanho mostra o grau de dispersão das frações resultantes de britagem. Quando este coeficiente é baixo tem-se uma granulometria distribuída ao longo de uma ampla faixa e, de forma inversa, quando ele é alto, tem-se uma faixa granulométrica mais restrita. A figura 14 mostra a variação de "n" com a abertura de britagem para ambos os carvões. Nota-se claramente que o carvão de Leão é menos friável, o que resulta em um menor grau de dispersão granulométrica.

Comparando-se os valores de "n" dos carvões de Leão e Candiota, nota-se que para todas as aberturas do britador em estudo sempre os valores de dispersão para o carvão de Leão foram maiores.

FIGURA 13

CARVÃO DE LEÃO - GRÁFICOS DE ROSIN-RAMMLER-BENNETT

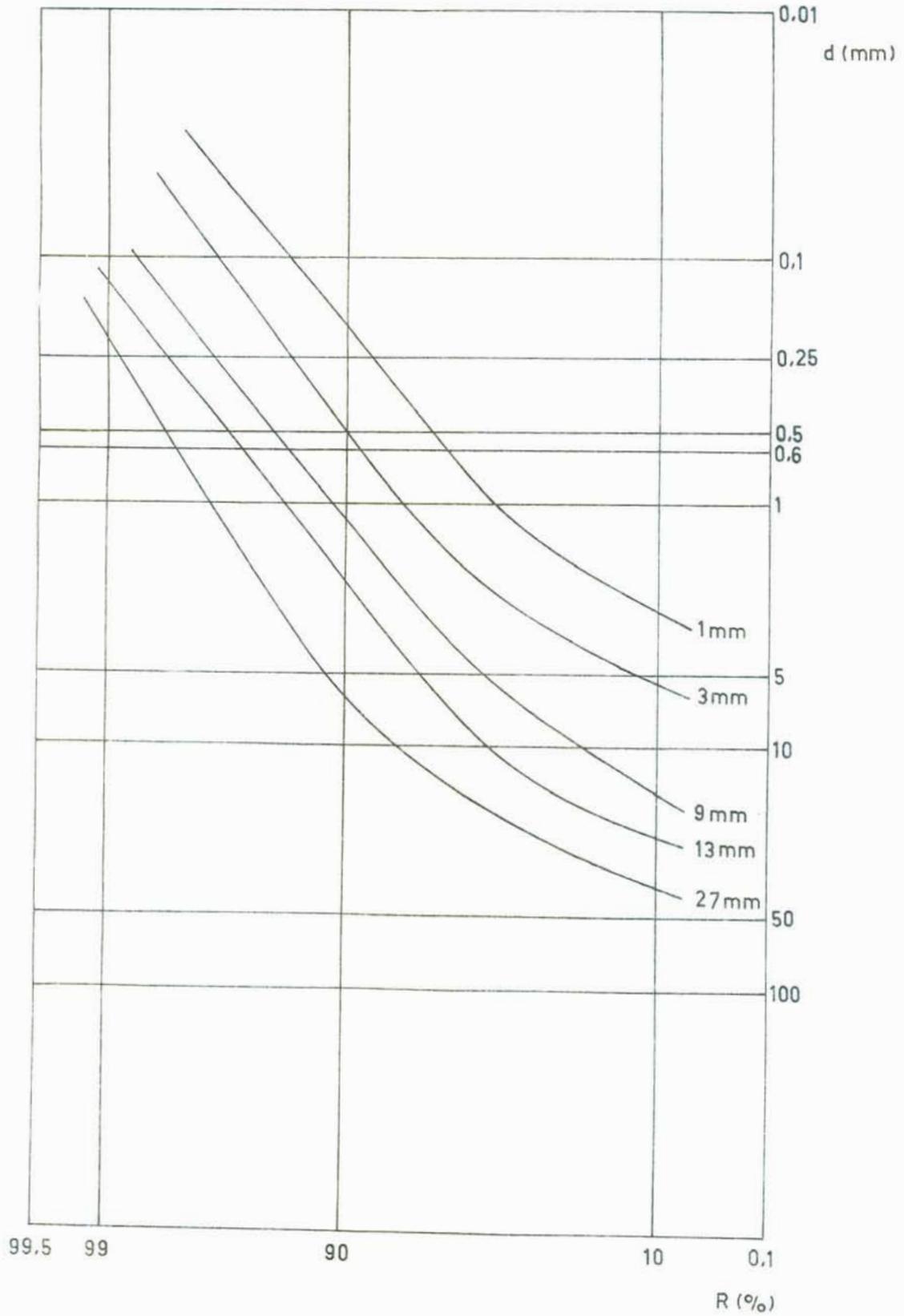
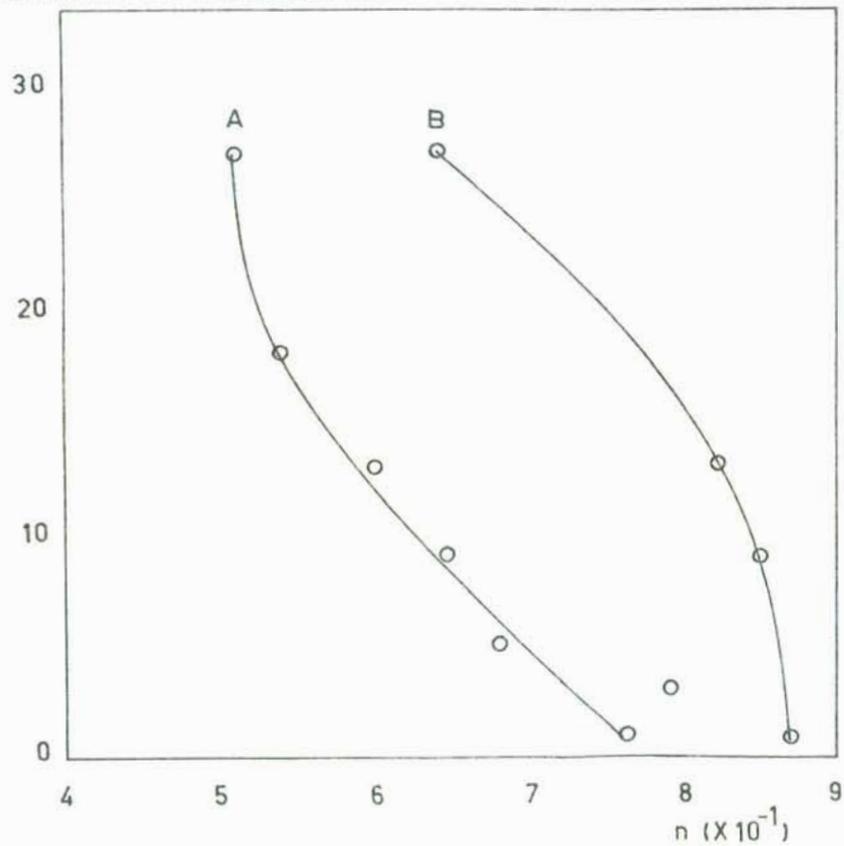


TABELA 17 - CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - CARVÃO DO LEÃO - VALORES DE  $n$ ,  $d'$ ,  $d_{50}$  e PASSANTE EM 28 MALHAS E EM 1 MM EM FUNÇÃO DA ABERTURA DE BRITAGEM

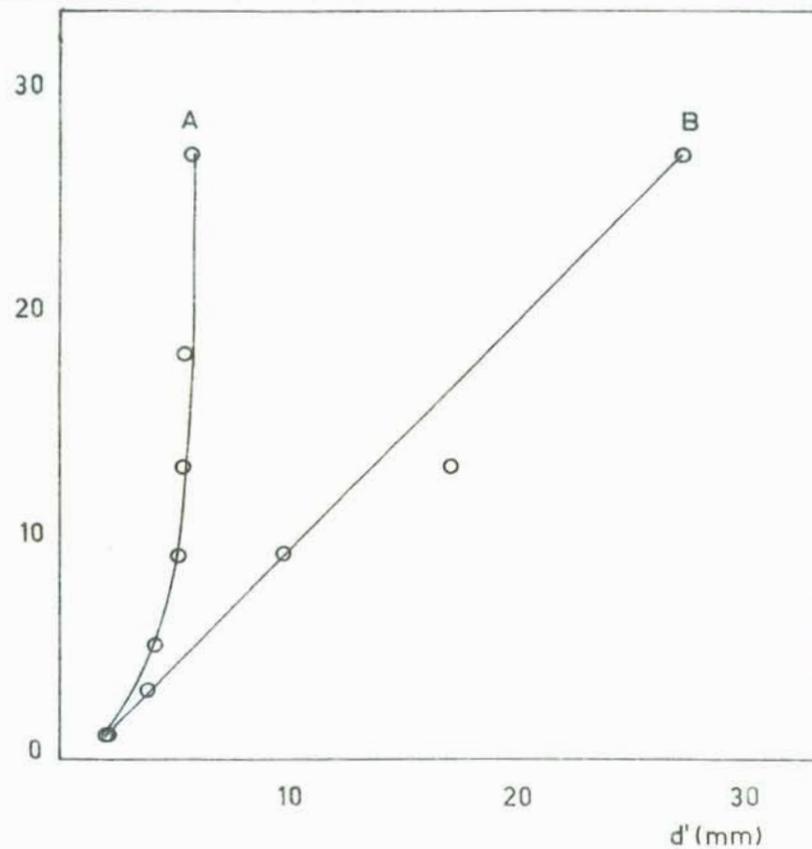
ABERTURA (mm)	$n$	$d'$ (mm)	1 mm (%)	-28 malhas (%)	$d_{50}$ (mm)
1	0,8684	1,70	37	25,2	1,40
3	0,7843	3,80	17	12,5	2,90
9	0,8525	9,80	9,5	6,2	7,40
13	0,8222	17,00	5,8	5,8	12,50
27	0,6408	27,00	2,8	2,0	23,00

FIGURA 14 ABERTURA DE BRITAGEM EM FUNÇÃO DE  $n$  E  $d'$

ABERTURA DE BRITAGEM (mm)



ABERTURA DE BRITAGEM (mm)



A - CANDIOTA

B - LEÃO

A constante absoluta de tamanho  $d'$  é um tamanho médio das partículas de acordo com o modelo de Rosin-Rammler-Bennett. A figura 14 apresenta a relação existente entre a abertura do britador e o tamanho médio  $d'$  para os dois carvões em estudo. Esta figura confirma a análise de friabilidade já feita. Os valores de  $d'$  são quase que uma constante no carvão de Candiota, e, no carvão de Leão, varia com a abertura de britagem (dados completos nas Tabela 16 e 17). A maior friabilidade do carvão de Candiota confirma-se pelo seu HGI (Hardgrove Grindability Index), índice que mede o grau de cominuição de carvões em testes de moagem padronizados<sup>100</sup>. Encontram-se listados abaixo os HGI's de alguns carvões brasileiros e norte-americanos<sup>5,101</sup>:

	HGI
Candiota	104
Recreio	76
Charqueadas	67
Leão	62
Coteau-Glen Harold - USA (Linhito)	63
Adaville - USA (Sub-betuminoso)	47
Buck Mountain - USA (antracito)	35

A friabilidade dos carvões é função de diversos fatores entre os quais destacam-se o grau de carbonificação, a natureza da matéria orgânica que lhe deu origem, a quantidade e o grau de disseminação das cinzas, o ambiente de deposição, etc. Por este motivo a comparação entre friabilidades de diversos carvões torna-se difícil. O carvão de Candiota é um carvão muito friável devido, aparentemente, a grande quantidade de matéria inorgânica presente em forma disseminada na sua gênese, impossibilitando, por maior que fosse a sua exposição as variáveis de maturação (tempo, temperatura e pressão), uma união mais forte entre suas partículas orgânicas.

Pode-se inferir, com a constatação do alto grau de friabilidade do carvão de Candiota, que a formação de finos constitui um sério problema na elaboração de futuras plantas convencionais de beneficiamento. Por exemplo, se uma usina desejasse beneficiar frações graúdas de até 1 mm, britado com a máxima abertura de 27 mm, tem-se que somente 78% da alimentação iria para o circuito dos grossos. No caso de Leão este percentual sobe para 97,2%.

## 2 - ESTUDOS DE LAVABILIDADE

As curvas de lavabilidade para frações grosseiras (+ 28 - 5/16 malhas) são mostradas nos anexos 12 e 13 e na figura 15. A principal característica deste carvão é que na curva dos flutuados a quantidade de matéria de menor densidade (baixos teores de cinzas) é, em comparação com outros carvões, muito baixa. As curvas de lavabilidade para frações finas (- 28 malhas) são encontradas na figura 16 (anexos 14 e 15), e possuem configuração semelhante a dos grosseiros. De fato, quando sobrepondo-se as curvas dos materiais finos e grosseiros, observa-se uma boa concordância das curvas dos flutuados, afundados e elementar.

A quantidade de "Near Gravity Material" - NGM que mostra o grau de dificuldade da lavagem de carvões, é observada nas figuras 15 e 16. As curvas de NGM, para frações grosseiras e finas, atingem valores elevados em densidades intermediárias (devido a inclinação da curva densimétrica), sendo que seu valor decresce para as densidades menores e elevadas. Em densidades menores (baixa percentagem de cinzas no flutuado), tem-se valores de NGM pequenos, porém as recuperações teóricas são menores. Por outro lado, em densidades elevadas, onde tem-se uma recuperação alta e onde o NGM é razoavelmente baixo, tem-se um teor de cinzas elevado. No desejo de obter-se produtos (finos ou grossos) em densidades intermediárias deve escolher-se processos que possuam uma baixa imperfeição (no caso métodos baseados em diferenças de densidade, isto porque a quantidade de NGM nestas densidades é muito grande.

Com o objetivo de ilustrar comparativamente as características de lavabilidade dos carvões do RS, mostramos abaixo alguns valores médios já descritos por outros trabalhos.

FIGURA 15

CURVAS DE LAVABILIDADE - FRAÇÃO GROSSEIRA (+28 - 5/16 MALHAS)

- A - CURVA DENSIMÉTRICA
- B - CURVA DOS FLUTUADOS
- C - CURVA ELEMENTAR
- D - CURVA DOS AFUNDADOS
- E - NEAR GRAVITY MATERIAL

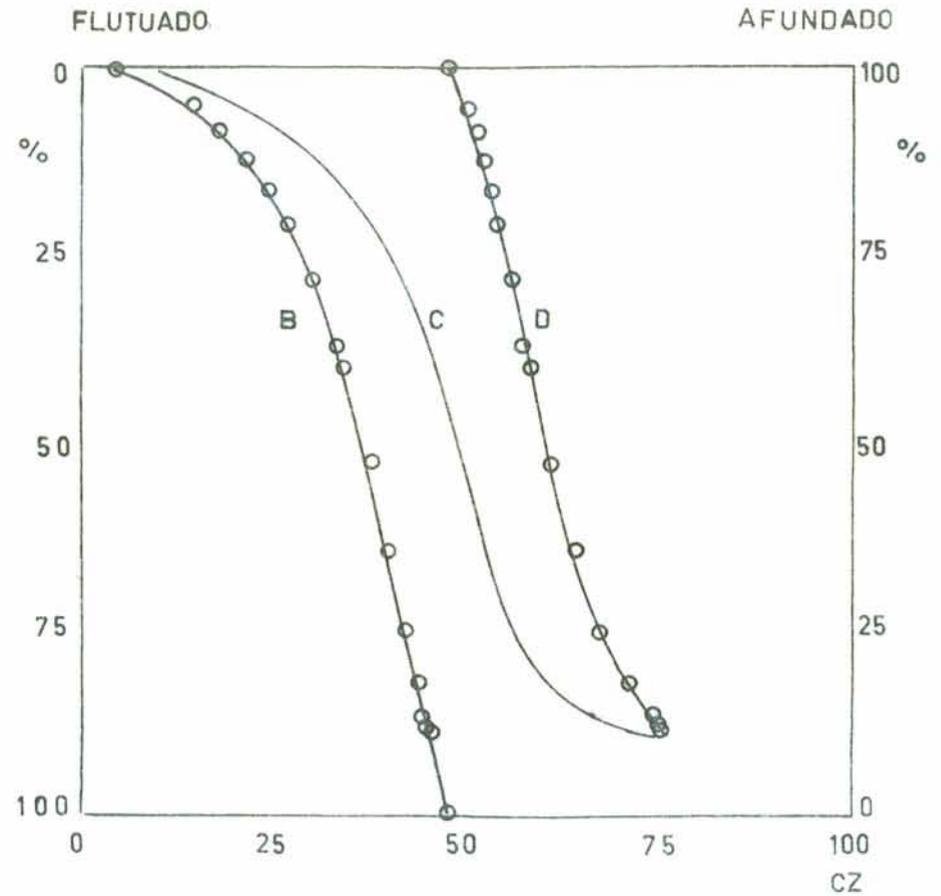
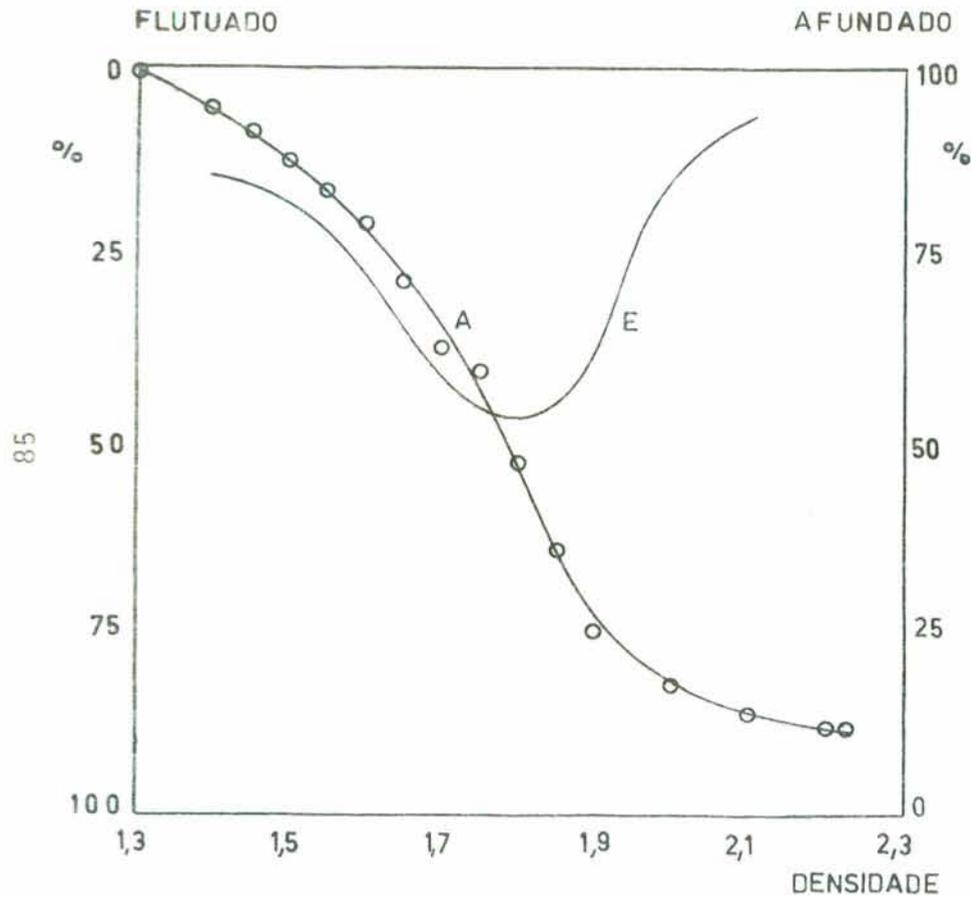
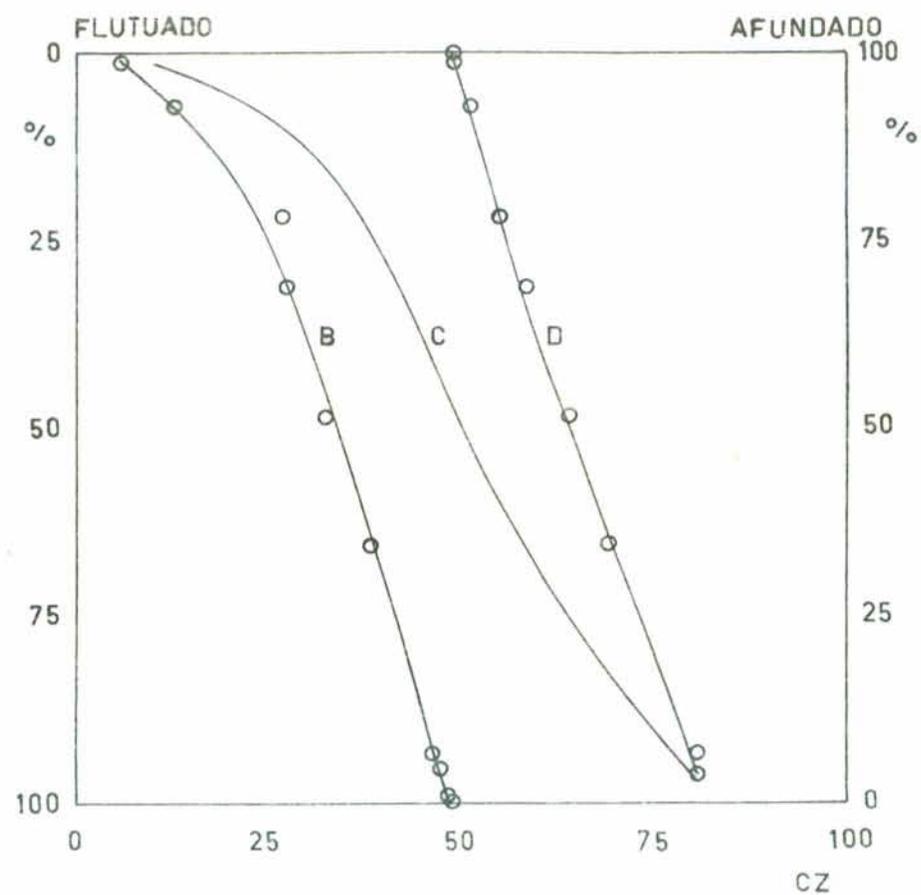
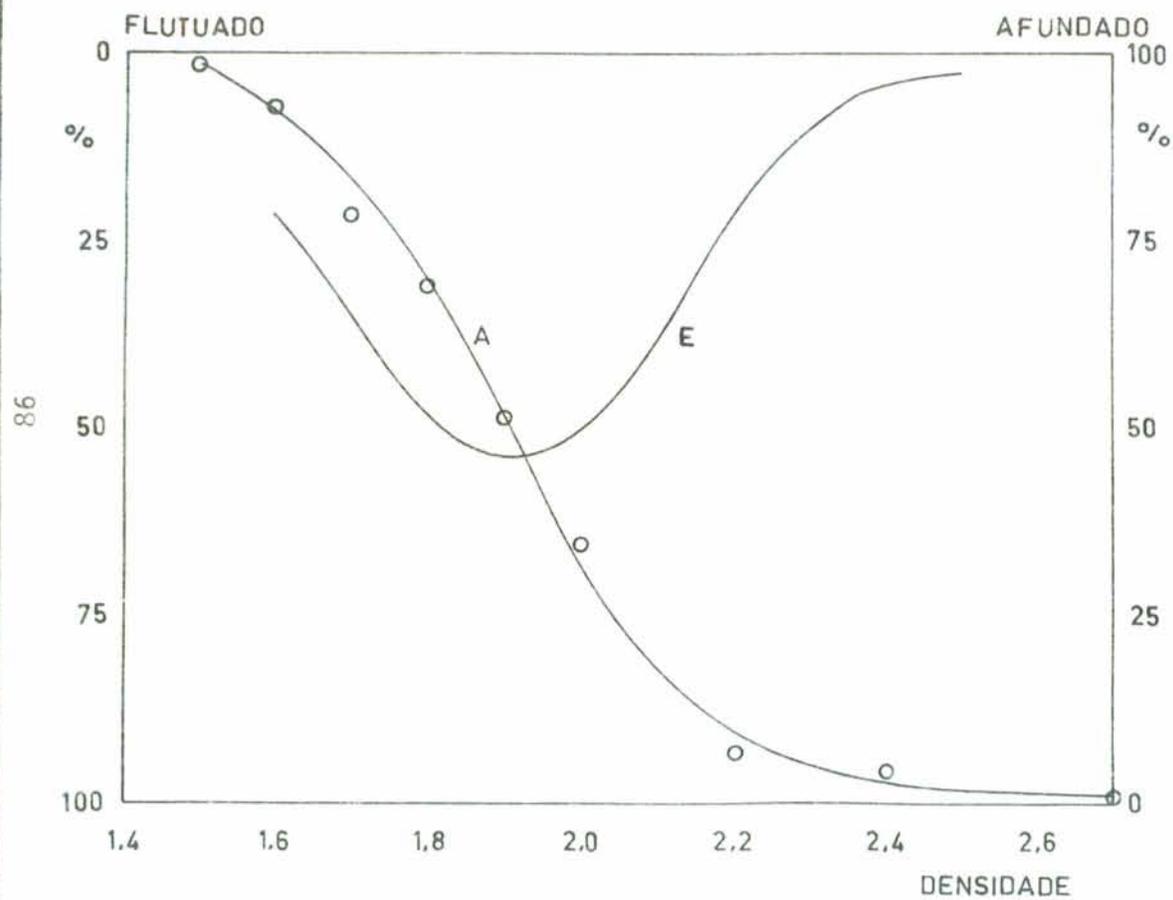


FIGURA 16

CURVAS DE LAVABILIDADE - FRAÇÃO FINA (-28 MALHAS)

- A - CURVA DENSIMÉTRICA
- B - CURVA DOS FLUTUADOS
- C - CURVA ELEMENTAR
- D - CURVA DOS AFUNDADOS
- E - NEAR GRAVITY MATERIAL



CARVÃO	CINZAS (%)	FLUTUADO (%)	NGM* (%)
Candiota**	30	28	35
(5/16" x 28 malhas)	35	44	46
	40	66	47
Charqueadas <sup>5</sup>	30	26	46
(1" x 28 malhas)	35	44	19
	40	59	8
Leão <sup>5</sup>	30	74	10
(1" x 28 malhas)	35	83	13
	40	94	7
Recreio <sup>5</sup>	30	63	6
(1" x 28 malhas)	35	72	9
	40	82	12
Iruí <sup>7</sup>	30	27	42
(1" x 28 malhas)	35	52	43
	40	76	35

\* Calculados neste trabalho

\*\* Resultados deste trabalho

Observa-se que o carvão de Candiota apresenta uma grande quantidade de NGM para "densidades de corte" em 30, 35 e 40% de cinzas e ainda com baixas recuperações. A mesma tabela mostra que o carvão de Leão apresenta as melhores características de lavagem dentro dos carvões do RS.

No caso das frações finas do carvão de Candiota (- 28 malhas), a recuperação teórica a se obter por métodos gravimétricos é de 37% para valores de 30% em cinzas. Neste caso, o valor de NGM é de 53% o que exige uma muito baixa imperfeição no equipamento a

ser utilizado (se for gravimétrico).

### 3 - ESTUDOS DE LIBERAÇÃO

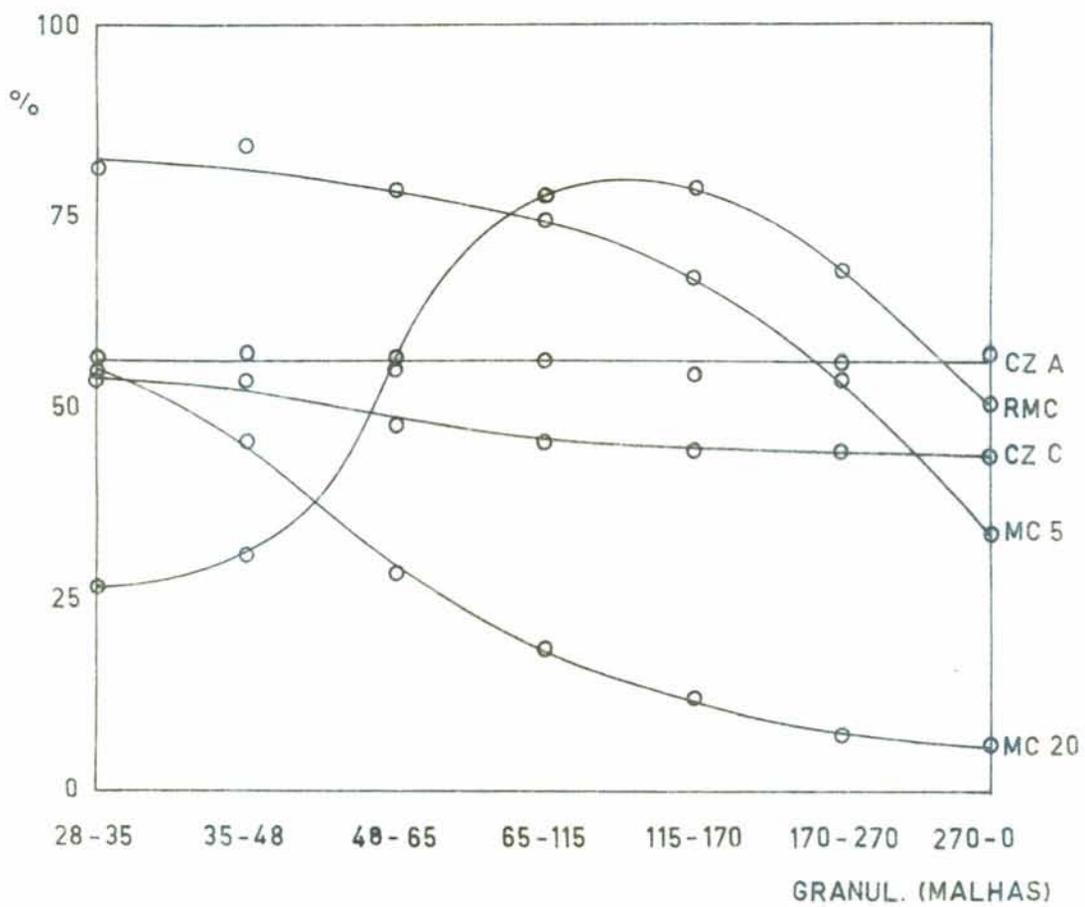
A proporção de matéria orgânica que uma partícula de carvão pode ter varia entre zero e 100%. Esta percentagem e sua facilidade de separar-se ou não da matéria inorgânica está intimamente relacionada com a gênese do carvão. Em beneficiamento de frações finas, um dos maiores problemas é a presença destas unidades chamadas de mistos, ou seja, partículas que possuem parte de sua estrutura de matéria orgânica e parte de matéria inorgânica. No presente trabalho conceitua-se arbitrariamente dois tipos de mistos (ver Tabela 18): a) partículas que possuem matéria carbonosa entre 20% e 80%; b) partículas que possuem matéria carbonosa entre 5% e 95%. A relação percentual destes mistos, feita a partir da contagem da percentagem de macerais por grão, e a presença de pirita, são descritos na Tabela 18 e figura 17. Como forma de ilustrar o significado do grau de liberação, realizaram-se testes de flotação para as mesmas faixas granulométricas. Os resultados destes testes são descritos nos anexos 16 e 17 e figura 17.

No estudo microscópico realizado, nota-se que nas frações mais grosseiras (28 - 65 malhas) encontram-se dois tipos diferentes de partículas mistas (ver anexo 18): 1) partículas mistas, mas com a parte orgânica completamente separada da inorgânica no mesmo grão, assim, com um grau de cominuição maior, teria-se um acréscimo no grau da liberação; 2) partículas com a matéria orgânica e inorgânica intrinsicamente misturadas, com uma malha de liberação muito alta (- 400 malhas)<sup>5</sup>.

Na luz fluorescente, não foram encontrados, em quantidade significativa, macerais do grupo do Exinita misturados na argila,

FIGURA 17

## ESTUDOS DE LIBERAÇÃO



- RMC - RECUPERAÇÃO MATÉRIA CARBONOSA  
 CZ A - CINZAS NA ALIMENTAÇÃO  
 CZ C - CINZAS NO CONCENTRADO  
 MC 5 - MATÉRIA CARBONOSA ENTRE 5 - 95%  
 MC 20 - MATÉRIA CARBONOSA ENTRE 20 - 80%

TABELA 18 - ESTUDOS DE LIBERAÇÃO - CONTAGEM DE PARTÍCULAS

GRANULOMETRIA	MC Até 20%	MC 80% ou +	MC 20-80%	MC Até 5%	MC 95% ou +	MC 5 - 95%	MC > 80% Pirita > 1%	PIRITA 30% ou +
28 - 35	14,4	32,4	53,2	8,4	10,4	81,2	3,2	2,4
35 - 48	27,8	26,6	45,6	9,6	6,0	84,4	2,0	1,8
48 - 65	28,0	43,6	28,4	10,8	10,6	78,6	4,6	0,4
65 - 115	37,4	44,0	18,6	10,4	14,8	74,8	3,4	1,4
115 - 170	44,0	43,2	12,8	18,6	15,2	66,2	2,0	2,8
170 - 270	38,4	54,0	7,6	18,6	27,6	53,8	2,8	0,8
270 - 0	46,8	46,8	6,4	32,4	33,8	33,8	1,0	1,0

MC = Matéria Carbonosa

que poderiam aumentar o teor de matéria orgânica misturada na matéria inorgânica. Observa-se que nas frações finas (- 270 malhas) ocorre uma quantidade grande de macerais do grupo da INERTINITA, completamente liberados. Nas partículas em que a matéria orgânica está intimamente misturada com a matéria inorgânica, geralmente os macerais encontrados são do grupo da INERTINITA e EXINITA. Observa-se a presença de dois tipos de pirita, uma que está praticamente liberada, e outra que está presente em quase todos os grãos com percentagens inferiores a 1% (ver anexo 18). Observa-se uma leve diminuição da percentagem de pirita com o decréscimo do tamanho provavelmente devido a sua dureza, que dificulta a sua cominuição.

Nos testes de flotação realizados simultaneamente ao trabalho microscópico observa-se que o decréscimo dos mistos está relacionado com o aumento da eficiência na flotação (maior recuperação em peso e em matéria orgânica e menor percentagem de cinzas no concentrado), sendo que a recuperação de matéria orgânica passa por um máximo nas frações 65 - 170 malhas (ver figura 17). Como o teor de cinzas na alimentação não varia de um modo substancial (ver anexo 17), acredita-se que a eficiência de flotação diminui nas frações muito finas, devido provavelmente ao recobrimento das partículas por lamas ("slime coating") ou pelo arraste mecânico de material inorgânica ao concentrado de flotação. O teor de cinzas no concentrado não variou muito ao longo do teste, permanecendo quase que constante, mesmo para frações finas, confirmando, de um modo geral, a presença constante de mistos.

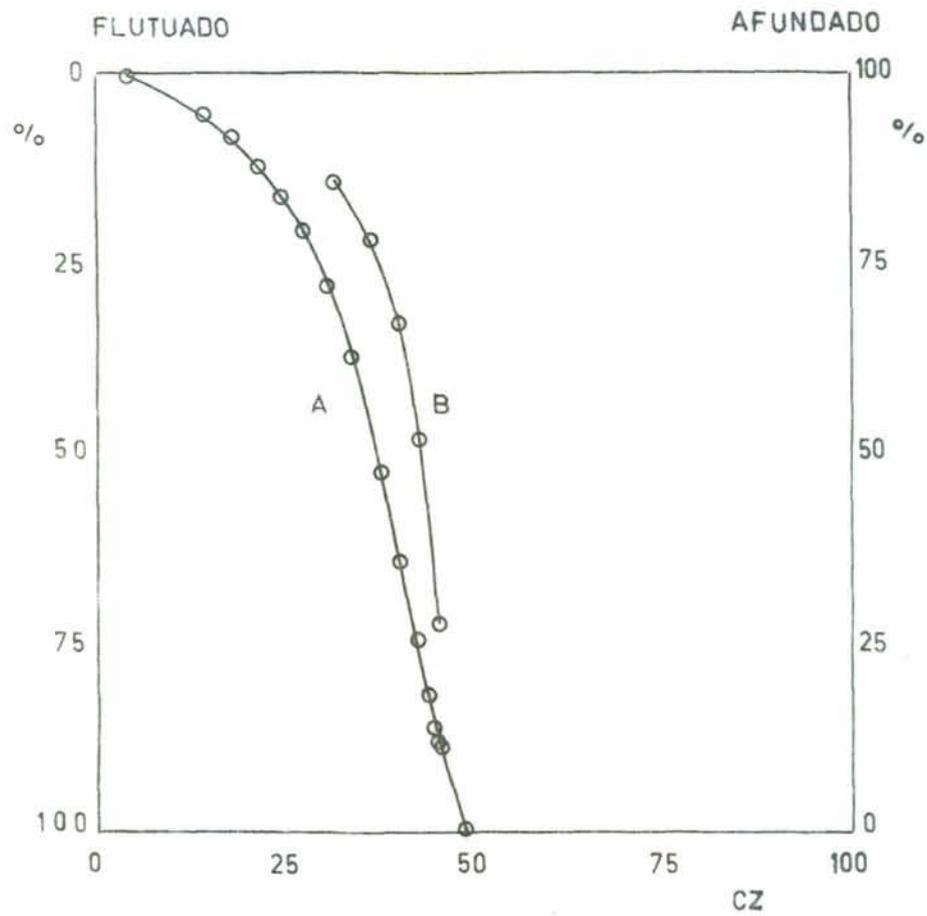
#### 4 - ESTUDOS DE JIGAGEM

No anexo 19 descrevem-se detalhadamente os resultados obtidos nos testes de jigagem realizados por bateladas, e na figura 18 são apresentados graficamente os valores dos flutuados. A curva dos flutuados obtida no teste de lavabilidade do carvão bruto foi plotada conjuntamente como uma medida de comparação. Com o objetivo de medir tanto as características de lavabilidade como a eficiência do jigue empregado, calcularam-se os valores de eficiência segundo o modelo de FRASER e YANCEY<sup>21</sup>. Os valores obtidos (detalhados na Tabela 19) mostram que a eficiência do beneficiamento das frações +10 e -3,5 malhas é razoável para altas recuperações em massa (recuperação em massa de 73,2%, teor de cinzas no concentrado de 45,5% e eficiência no processo de 83%), porém ela cai bruscamente para quantidades pequenas de massa no concentrado (recuperação em massa de 14%, teor de cinzas no concentrado de 31,5% e eficiência no processo de 46,67%). Pode-se concluir com este estudo, que a eficiência deste jigue em particular é alta para grandes recuperações em massa, e cai com a diminuição desta recuperação.

FIGURA 18

JIGAGEM - CURVA DOS FLUTUADOS DOS TESTES POR BATELADAS

GRANULOMETRIA +10 -3,5 MALHAS



A - CURVA DOS FLUTUADOS - TESTE DE FLUTUA-AFUNDA

B - CURVA DOS FLUTUADOS - TESTE DE JIGAGEM

TABELA 19 - CURVA DOS FLUTUADOS DOS TESTES POR BATELADAS (+10 -3,5 MALHAS)

CURVA DOS FLUTUADOS		CURVA DOS FLUTUADOS DE JIGAGEM		EFICIÊNCIA FRASER E YANCEY (% rec. carvão lavado) $\frac{(\% \text{ carvão rec. teórico a/mesmo teor cinzas do carvão lavado})}{\% \text{ carvão rec. teórico a/mesmo teor cinzas do carvão lavado}} \times 100$
% CINZAS	REC.MASSA	% CINZAS	REC.MASSA	
31,5	30,0	31,5	14,0	46,67
34,0	37,4	34,0	13,2	43,66
36,0	45,0	36,0	21,8	48,44
38,0	54,0	38,0	26,5	49,07
40,0	64,2	40,0	33,0	51,40
42,0	72,6	42,0	41,6	57,30
44,0	81,4	44,0	58,2	71,50
45,5	88,2	45,5	73,2	83,00

Os resultados dos testes de jigagem contínua realizados para duas granulometrias diferentes, são encontrados nas Tabelas 20 e 21. O principal objetivo deste experimento era a redução substancial do teor de cinzas, o que não foi conseguido. As modificações introduzidas no jigue não conseguiram alcançar os objetivos de funcionamento, basicamente, porque não foi possível conseguir um bom movimento pulsátil do leito. Estudos na otimização deste problema encontram-se em fase de iniciação.

Estudos de beneficiamento para frações grosseiras de Candiotá têm sido realizados pela empresa Paulo Abib Andery S/A<sup>102</sup> e pela Aços Finos Piratini<sup>103, 104, 105</sup>. A primeira realizou estudos teóricos de lavagem através de programas de computação, encontrando resultados próximos as curvas de lavabilidade. A Aços Finos Piratini realizou estudo prático de lavagem por intermédio de ciclones de meio denso<sup>104</sup>. O resultado obtido, resumido abaixo, mostra que ocorre uma baixa recuperação em relação as curvas de lavabilidade (eficiência de Fraser Yancey de ... 53,23%), resultados estes devido, fundamentalmente, a grande quantidade de NGM presente nesta fração (cerca de 38% - ver figura 15). Este tipo de operação gera uma importante fração de finos que irá influenciar na performance da lavagem dos ciclones de meio denso.

	CINZAS	RECUPERAÇÃO EM MASSA (%)	RECUPERAÇÃO TEÓRICA NAS CURVAS DE LAVABILIDADE EM MASSA (%)
NOBRE	39,4	32,5	61,0
INTERMEDIÁRIO	55,8	39,4	{39,0
REJEITO	78,4	11,9	
PERDAS	-	16,2	-

TABELA 20 - RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES DE JIGAGEM CONTÍNUA

GRANULOMETRIA = 10 MALHAS  $\approx$  1/4"

ALIMENTAÇÃO = 30 - 50 kg/h COM TEORES POR VOLTA DE 50% EM CINZAS

TESTE	ÁGUA (l/min)	AR (l/min)	ALTURA DO CORTE (mm)	CINZAS NO CONC. (%)	CINZAS NO REJ. (%)
1	15,14	7,32	7,0	43,58	42,75
2	15,14	9,78	7,0	41,26	42,97
3	15,14	9,78	6,0	44,80	46,12
4	15,14	7,82	6,0	44,14	44,45
5	15,14	5,87	6,0	45,24	44,40
6	15,14	9,73	5,0	45,24	44,24
7	15,14	7,32	5,0	45,92	45,12
8	15,14	5,87	5,0	44,37	43,20
9	15,14	3,91	7,1	42,37	43,11
10	15,14	3,91	3,0	40,69	42,93
11	15,14	3,91	7,5	46,34	43,51
12	15,14	5,87	7,1	41,71	42,71
13	15,14	5,87	7,5	41,31	43,42
14	15,14	5,87	8,0	40,00	43,96
15	15,14	3,91	8,0	42,17	45,09
16	15,14	7,32	8,0	41,56	47,77
17	15,14	9,78	8,0	41,10	41,75
18	7,57	5,37	8,0	41,60	44,30
19	11,36	5,87	8,0	40,03	46,36

TABELA 21 - RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES DE JIGAGEM CONTÍNUA

GRANULOMETRIA: 28 malhas POR 7 malhas.

ALIMENTAÇÃO: 30 - 50 Kg/h COM TEORES POR VOLTA DE 50% DE CINZAS

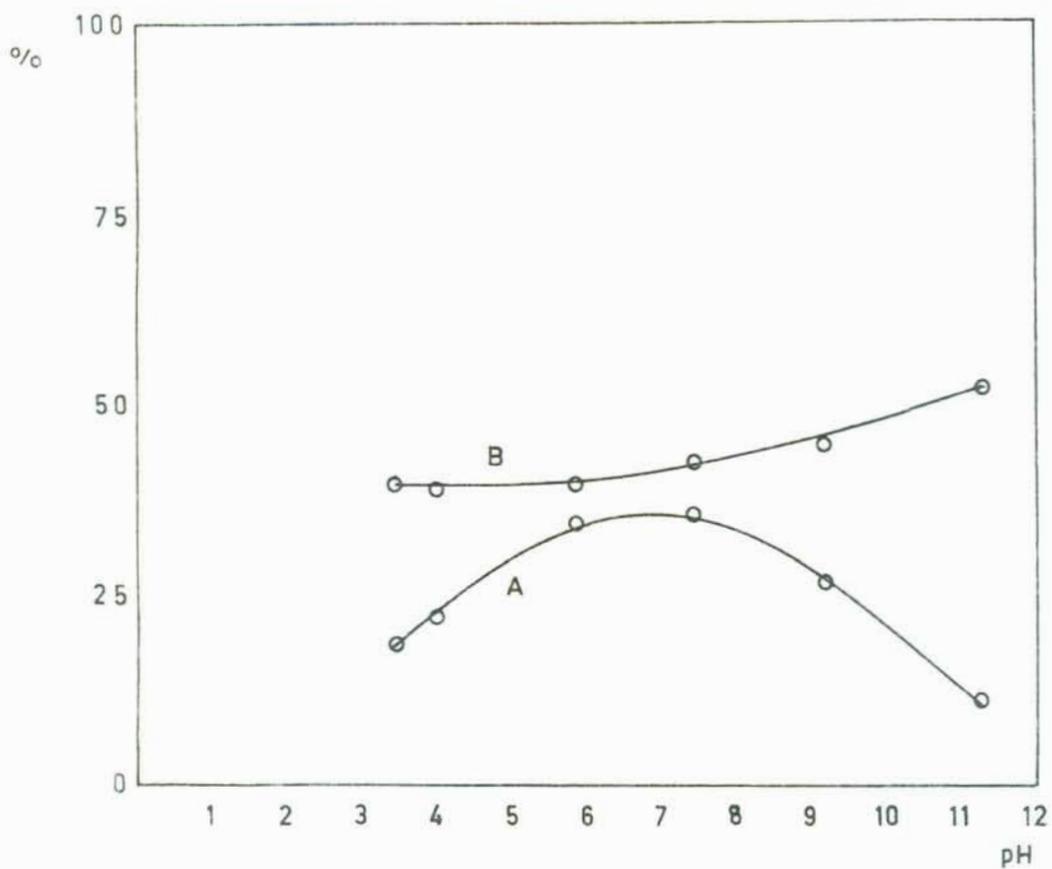
TESTE	ÁGUA (l/min)	AR (l/min)	ALTURA DO CORTE (mm)	CINZAS NO CONC. (%)	CINZAS NO REJ. (%)
1	15,14	3,91	4,0	47,72	52,83
2	15,14	5,87	4,0	50,43	49,72
3	15,14	7,82	4,0	49,93	50,21
4	15,14	3,91	5,0	47,53	52,94
5	15,14	5,87	5,0	50,00	50,35
6	15,14	7,82	5,0	50,94	51,46
7	11,36	5,87	4,0	47,94	50,47
8	7,57	5,87	4,0	50,12	49,30
9	15,14	3,91	6,0	49,27	52,65
10	15,14	5,37	6,0	49,02	52,45
11	15,14	7,82	6,0	51,16	51,70

## 5 - BENEFICIAMENTO DE FRAÇÕES FINAS POR FLOTAÇÃO

Resultados preliminares permitiram estabelecer alguns fatores que determinam os melhores parâmetros de flotação das frações menores do que 28 malhas do carvão de Candiota, a saber: pH 7 (figura 19 e anexo 20), a escolha do óleo de pinho como agente espumante e uma concentração de 900 g/ton (figura 20 e anexo 21) e uma concentração do reagente Walker de 1.000 g/ton (figura 21 e anexo 22). A adição de silicato de sódio no sistema não apresentou vantagens quanto a seletividade do processo (figura 22 e anexo 23). O tempo de flotação de 3 minutos foi escolhido na base dos resultados apresentados na figura 23 e anexo 23. Os valores obtidos para a recuperação da matéria carbonosa são considerados muito baixos em relação a valores normais de flotação de carvões. Este fato tem relação com o grau de liberação desta fração - 28 malhas fazendo com que a flotação dos mistos origine, invariavelmente, altos teores de cinzas no concentrado. Um fator que apoia esta análise é o fato de que o silicato de sódio, depressor da ganga silicosa, não melhorou a separação. Além do problema de mistos acredita-se que o teor de cinzas no concentrado manteve-se alto, devido a presença de ultra-finos que prejudicam a flotação através do fenômeno de recobrimento por lamelas das partículas maiores ("slime coating"), e devido ao arraste destas partículas finas (com teores de cinzas maiores) para o concentrado de flotação. Estes argumentos já foram citados anteriormente no estudo de liberação.

FIGURA 19

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO pH



A - REC. MAT. CARBONOSA

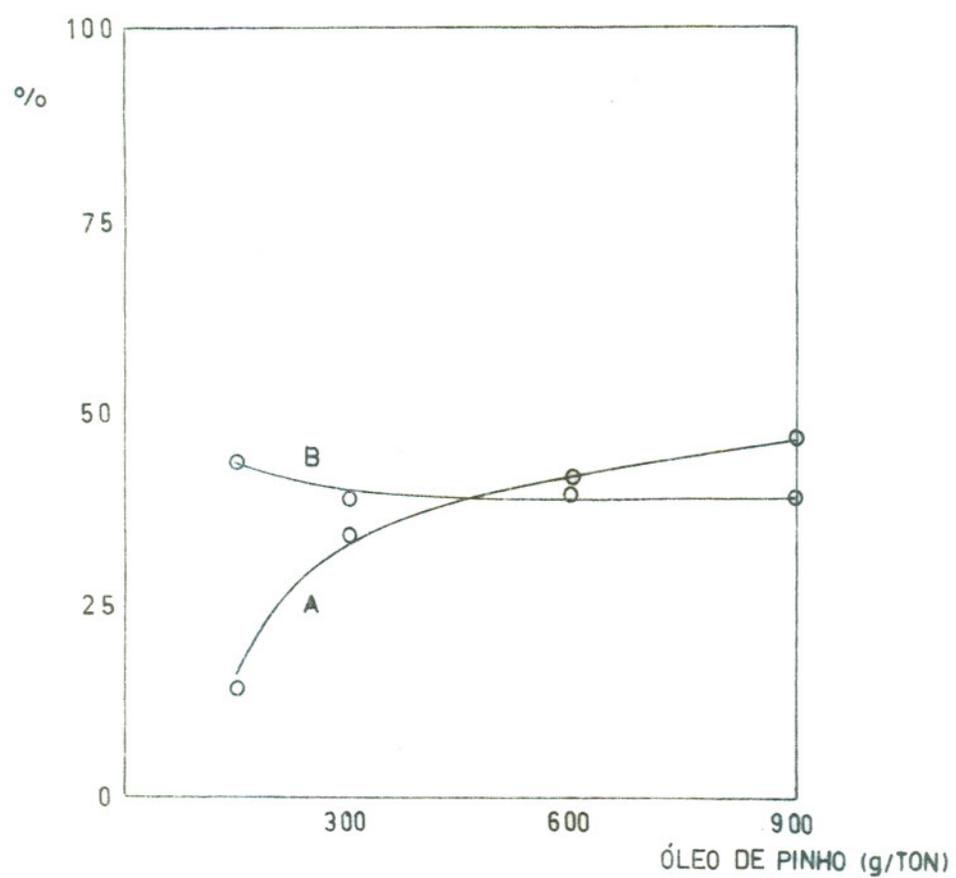
B - CINZAS NO CONC.

SILICATO DE SÓDIO = 800 g/TON

ÓLEO DE PINHO = 1.200 g/TON

FIGURA 20

FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DE PINHO



A - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

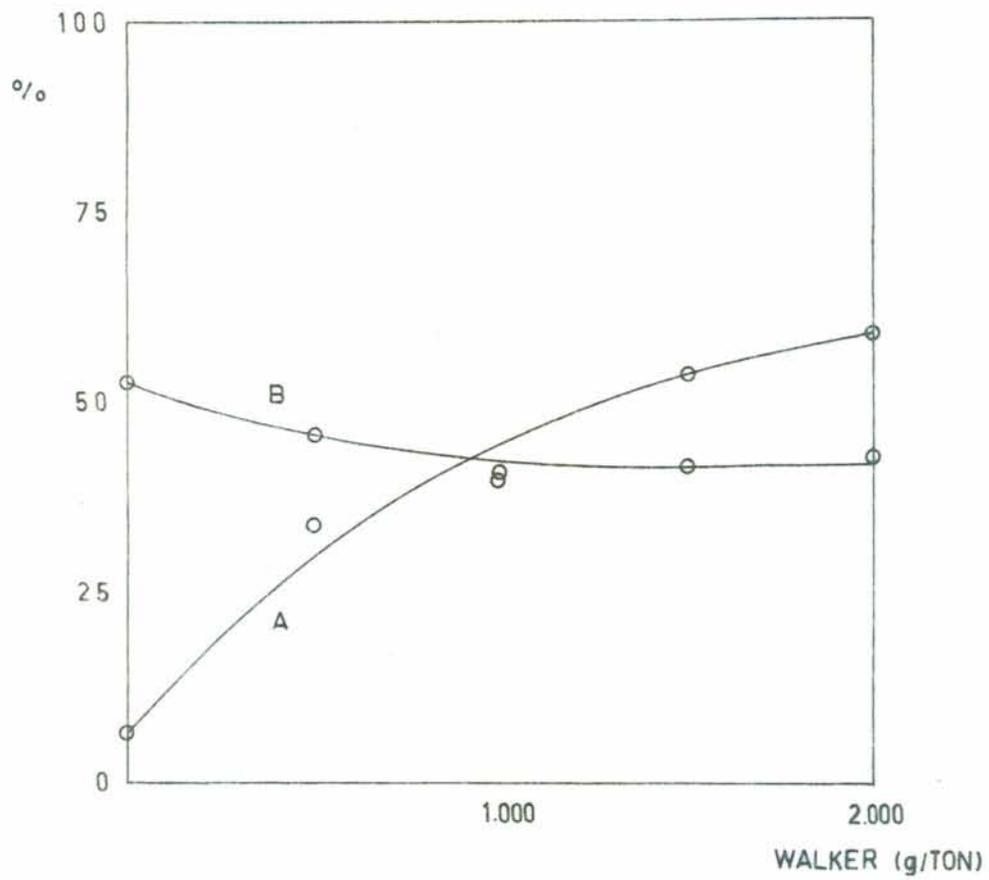
SILICATO DE SÓDIO = 800 g/TON

WALKER = 1.000 g/TON

pH = 7

FIGURA 21

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO WALKER



A - REC. MAT. CARBONOSA

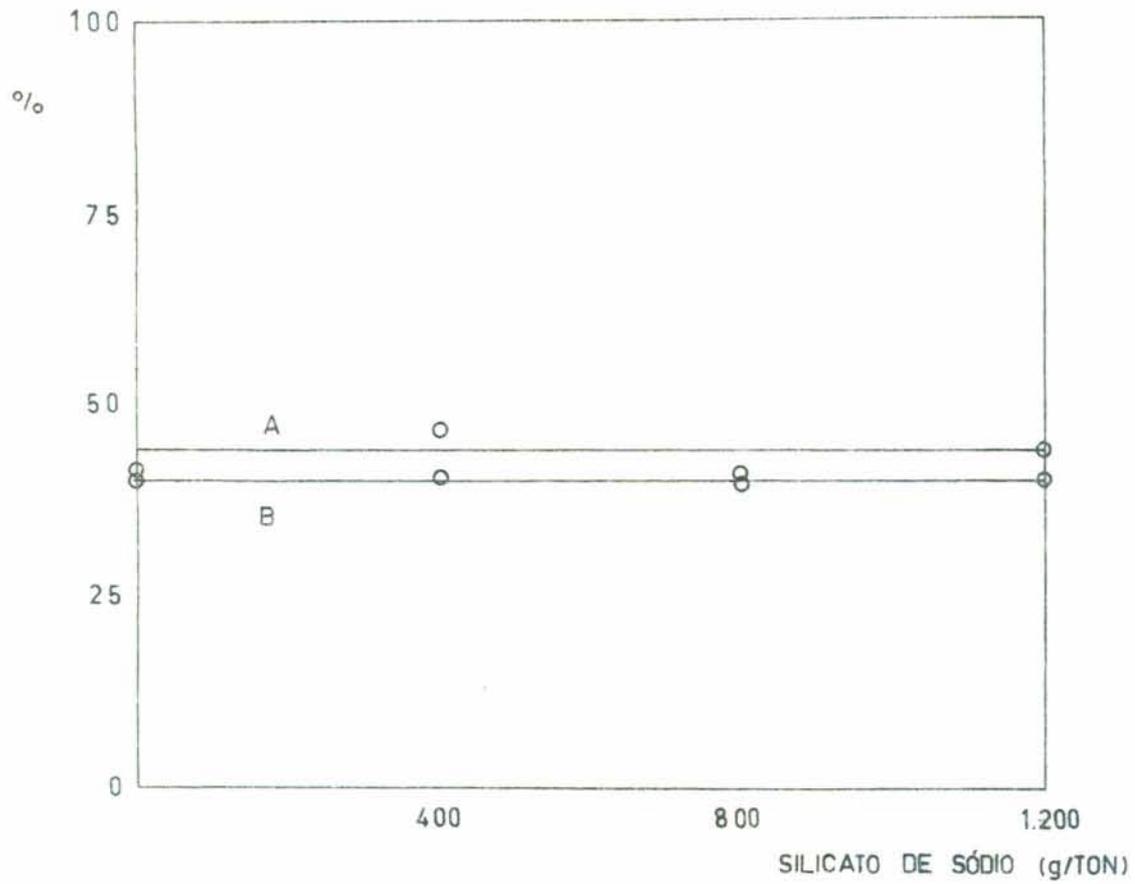
B - CINZAS NO CONC.

ÓLEO DE PINHO = 600 g/TON

pH = 7

FIGURA 22

FLOTAÇÃO - EFEITO DO SILICATO DE SÓDIO



A - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

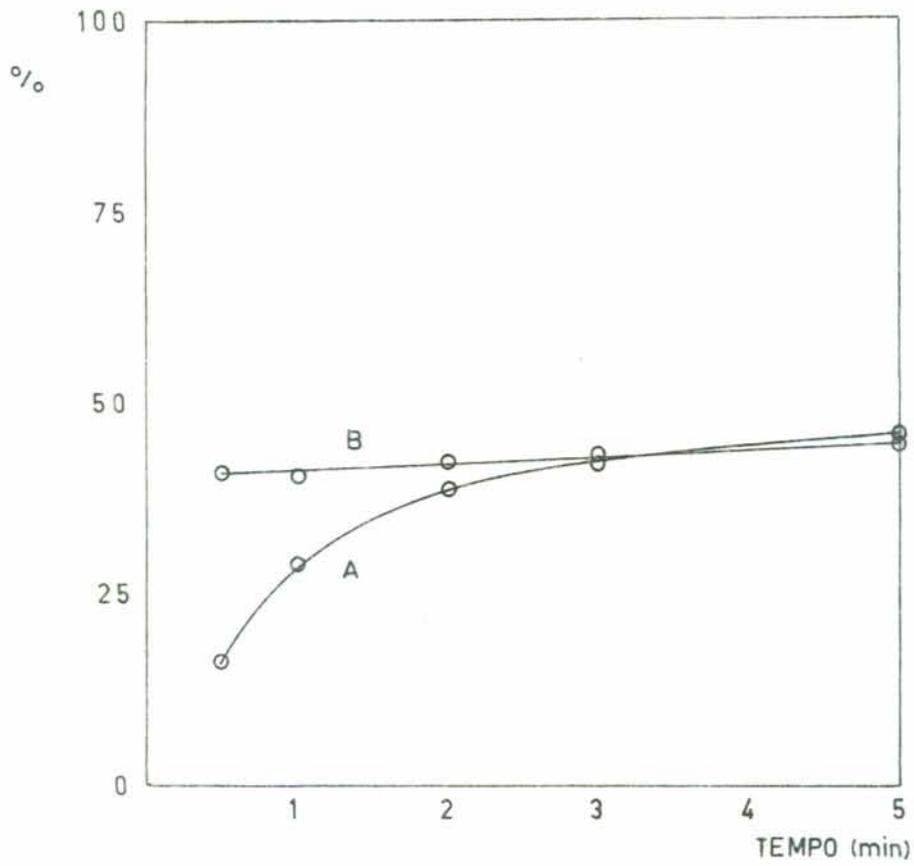
WALKER = 1.000 g/TON

ÓLEO DE PINHO = 600 g/TON

pH = 7

FIGURA 23

FLOTAÇÃO - EFEITO DO TEMPO



A - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

WALKER = 1.000 g/TON

ÓLEO DE PINHO = 600 g/TON

pH = 7

Tentativas da otimização do processo de flotação utilizando variações do circuito e variações no tempo de flotação são descritas nas figuras 24, 25 e 26 e anexos 25 e 26. Foi realizado, paralelamente, um estudo granulométrico das frações (concentrados e rejeito) obtidas neste circuito (ver anexos 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33). Com a otimização do processo, os melhores resultados obtidos foram: recuperação da matéria carbonosa inicial de 58,10% (C2 + C3) e teores de cinzas de 37,56% e ... 44,66% (C2 e C3 - ver figura 24). Quando o concentrado C3 da figura 24 é colocado novamente no circuito, junto a C1, teremos uma recuperação da matéria carbonosa em C2 de 52,12% com um teor de cinzas de 37,86% (recalculado). Comparando-se os valores obtidos na flotação com a curva de lavabilidade de finos (ver figura 16), observa-se que a recuperação na flotação é menor (recuperação da matéria carbonosa nas curvas de lavabilidade para 37,36% de cinzas é de 77,58% contra 52,12% dos testes de flotação).

O estudo de flotação conjuntamente com o estudo granulométrico dos produtos (concentrado e rejeito), evidenciam uma flotação preferencial na fração -48 +170 malhas (ver anexos 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33). Isto deve-se, principalmente, ao fato do acúmulo de cinzas nas frações ultrafinas, dificultando a sua flotação.

FIGURA 24 FLOTAÇÃO - CIRCUITO PROPOSTO

106

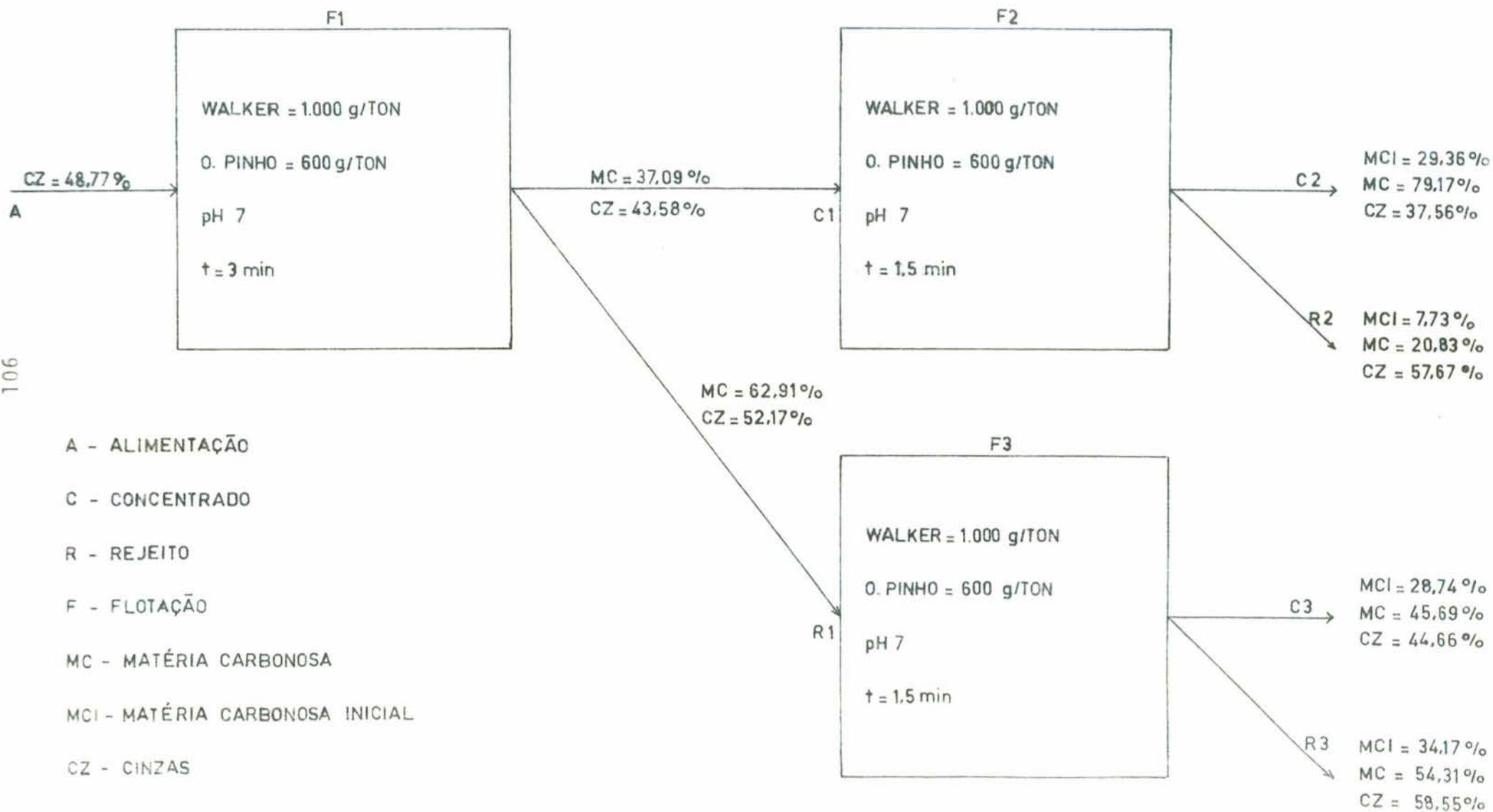
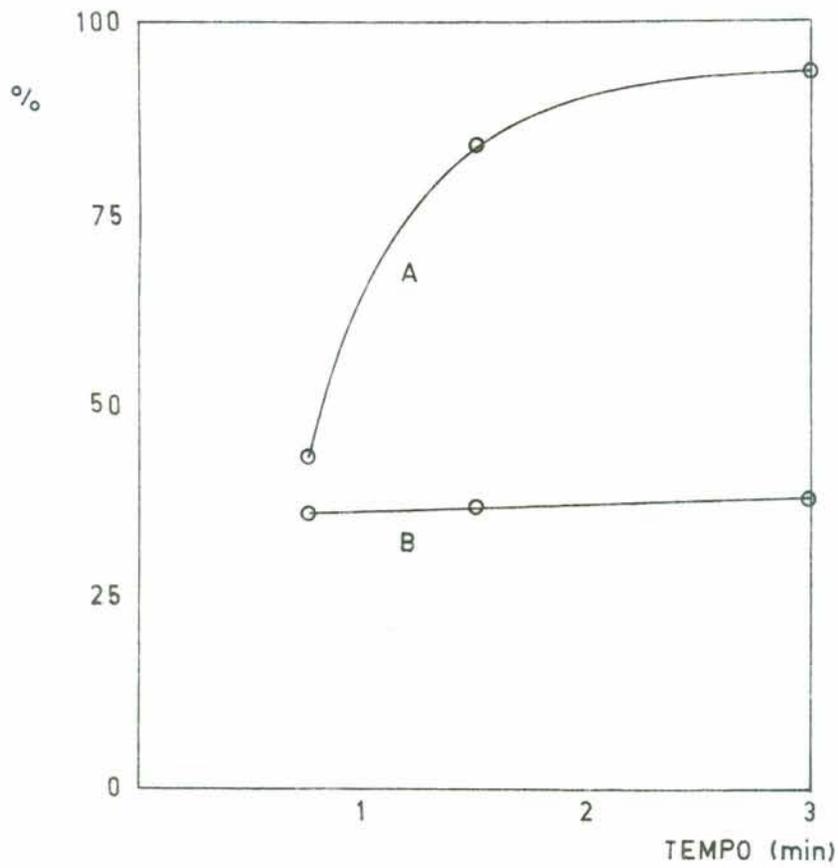


FIGURA 25

FLOTAÇÃO - CÉLULA F2 - EFEITO DO TEMPO



A - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

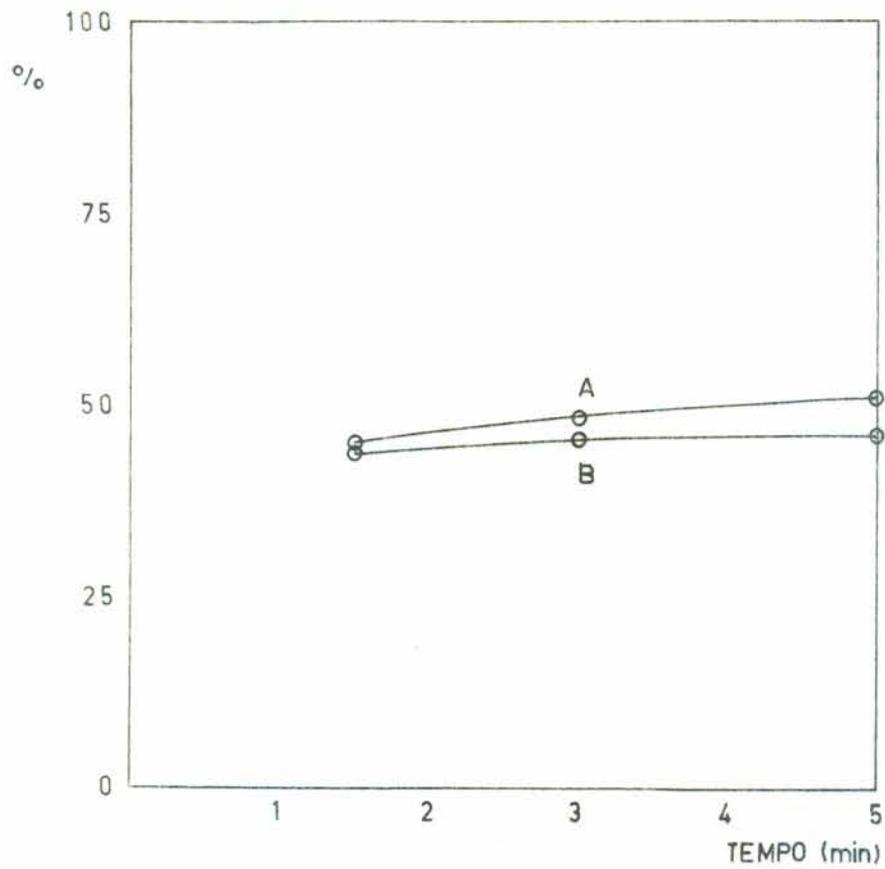
WALKER = 1.000 g/TON

ÓLEO DE PINHO = 600 g/TON

pH = 7

FIGURA 26

FLOTAÇÃO - CÉLULA F3 - EFEITO DO TEMPO



A - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

WALKER = 1.000 g/TON

ÓLEO DE PINHO = 600 g/TON

pH = 7

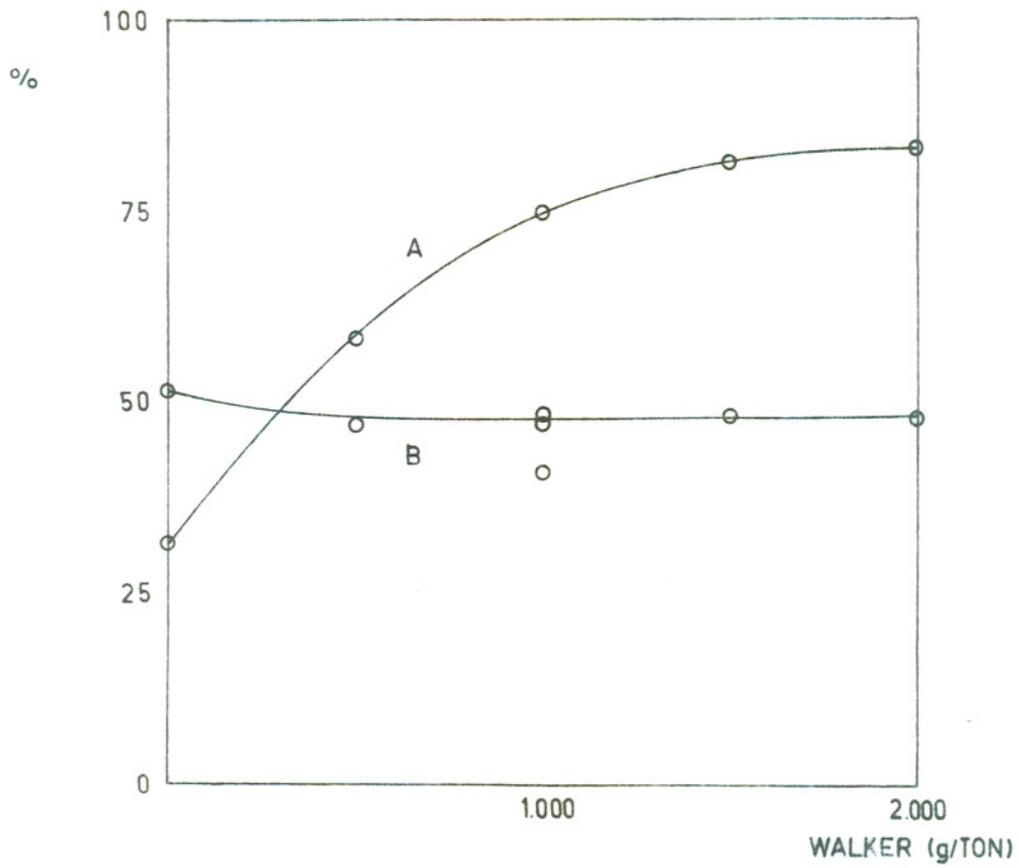
Para frações menores do que 200 malhas, foram realizados estudos de floco-flotação. Este processo baseia-se na aglomeração seletiva das frações carbonosas pelo óleo diesel seguido de uma flotação destes aglomerados. Nos anexos 34, 35, 36, 37, 38 e 39 verifica-se a influência do óleo diesel para diversas combinações de reagentes. A concentração foi fixa em 32.000 g/Ton e os reagentes escolhidos foram: Walker, silicato de sódio e MIBC. O efeito da variação da concentração de Walker é descrita no anexo 40 e figura 27. Observando-se os anexos 41 e 42 e a figura 28, nota-se a ineficiência do silicato de sódio nos testes. Um estudo cinético do processo é observado no anexo 43 e figura 29, onde, nota-se que o teor de cinzas no concentrado é elevado mesmo para pequenos tempos de flotação indicando uma provável flotação dos mistos e uma flotação de material silicoso por simples arraste mecânico.

Experimentos de flotação de partículas menores do que 400 malhas mostram uma tendência similar (ver tabela 22), evidenciando um arraste mecânico das partículas silicosas.

A Paulo Abib Andery S/A realizou estudos de flotação<sup>1 0 2</sup> com finos naturais de Candiota com frações menores do que 35 malhas, obtendo também resultados desfavoráveis. O melhor teste realizado conseguiu uma redução de 45,27% de cinzas para 44,43% de cinzas com granulometria de alimentação de -35 + 200 malhas. Estudos de flotação aglomerante com óleo diesel e óleo baiano em granulometrias de 87% - 400 malhas mostram resultados não satisfatórios, obtendo-se no melhor teste, um teor de cinzas no concentrado de 37,25% (alimentação de 62,31%), com recuperação em peso de 15,4%. Estes resultados mostram a sensibilidade deste processo a presença de mistos na alimentação.

FIGURA 27

FLOCO-FLOTAÇÃO EFEITO DO WALKER



A - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

ÓLEO DIESEL = 32.000 g/TON

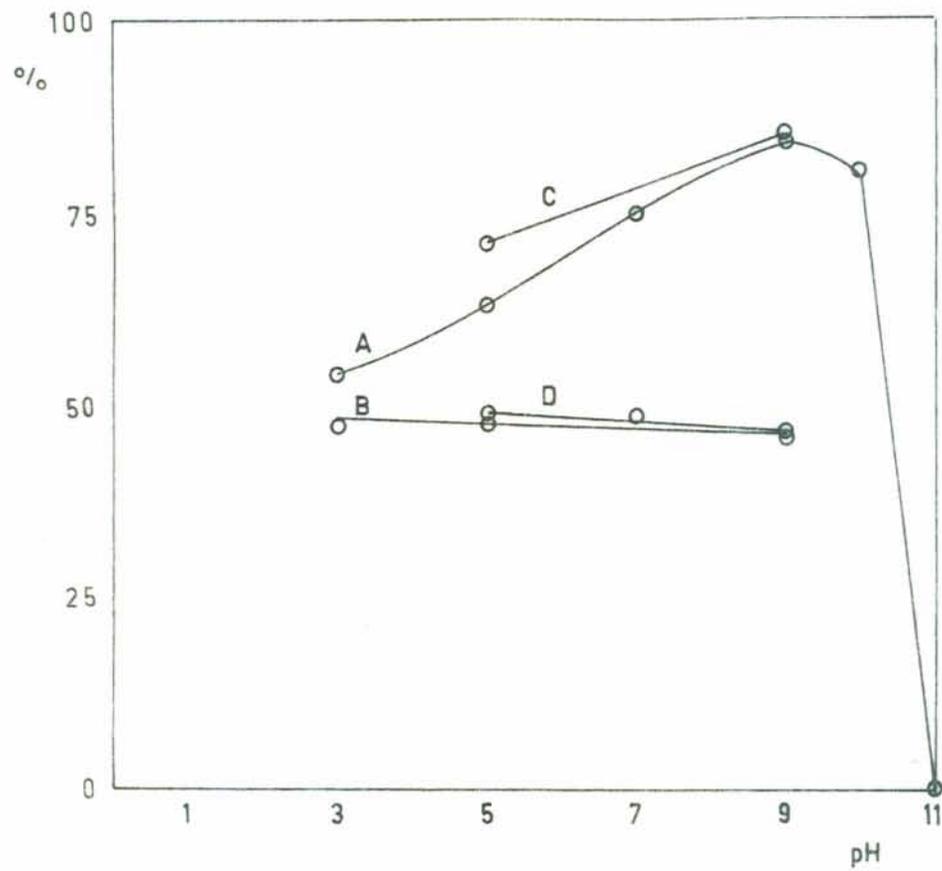
SILICATO DE SÓDIO = 800 g/TON

ÓLEO DE PINHO = 600 g/TON

pH = 9

FIGURA 28

FLOCO-FLOTAÇÃO EFEITO DO pH



A - REC. MAT. CARBONOSA

C - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

D - CINZAS NO CONC.

SILICATO DE SÓDIO = 800 g/TON

SILICATO DE SÓDIO = ZERO

ÓLEO DIESEL = 32.000 g/TON

ÓLEO DIESEL = 32.000 g/TON

WALKER = 1.000 g/TON

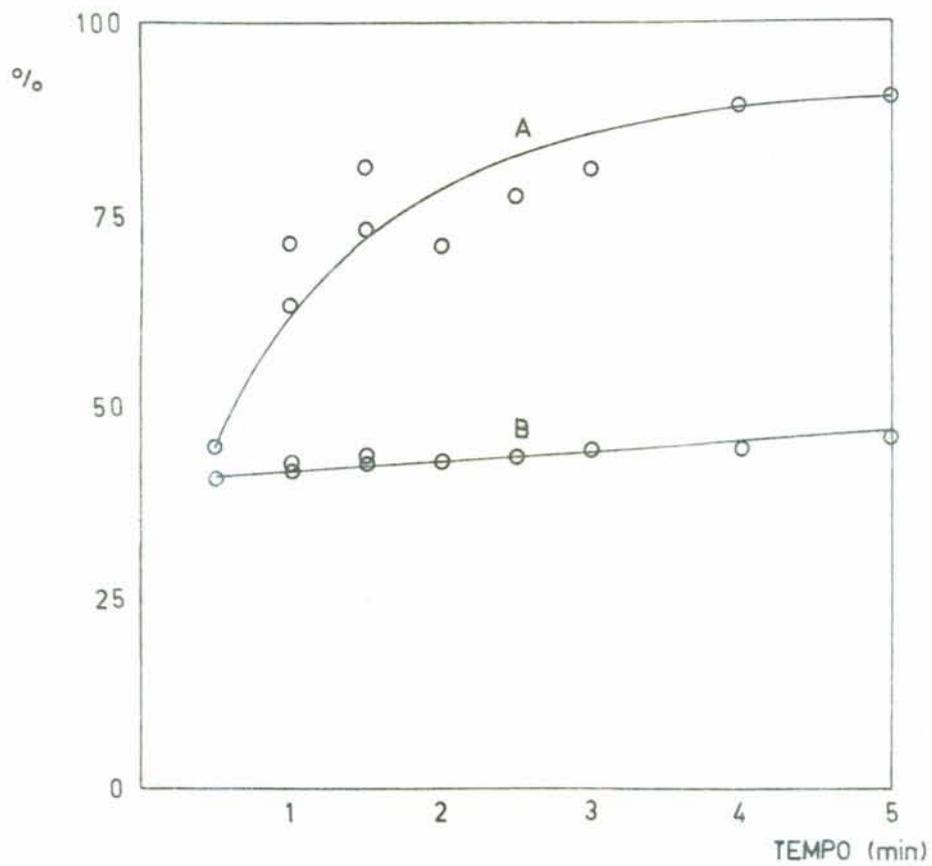
WALKER = 1.000 g/TON

MIBC = 1.200 g/TON

MIBC = 1.200 g/TON

FIGURA 29

FLOCO-FLOTAÇÃO EFEITO DO TEMPO



A - REC. MAT. CARBONOSA

B - CINZAS NO CONC.

ÓLEO DIESEL = 32.000 g/TON

WALKER = 1.000 g/TON

MIBC = 1.200 g/TON

pH = 9

TABELA 22 - FLOTAÇÕES REALIZADAS COM PARTÍCULAS --400 MALHAS

	TESTE 1	TESTE 2
Alimentação (recalculada)	58,38%	57,97%
Cinzas no concentrado	57,76%	55,26%
Cinzas no rejeito	53,84%	61,37%
Rec. Matéria carbonosa	43,32%	59,31%
- Reagentes e Condições		
Walker	1000 g/Ton	1000 g/Ton
Óleo de pinho	600 g/Ton	900 g/Ton
pH	7	7
Sólidos	11%	11%

*6 - BENEFICIAMENTO DE FINOS POR CICLONAGEM*

Os resultados obtidos para as condições experimentais descritas anteriormente são apresentadas na tabela 23. Na figura 30 descreve-se a variação da recuperação de matéria carbonosa e o teor de cinzas no underflow para diversas pressões e diâmetros de apex. Esta figura mostra que a melhor pressão registrada foi a de  $0,4 \text{ kg/cm}^2$  onde obtiveram-se os teores de cinzas mais baixos com as maiores recuperações de matéria carbonosa. Observa-se, também, que com os apex de 2 e 6 mm foram obtidos menores valores de recuperação de matéria carbonosa quando comparados com os outros 3 apex estudados. Na figura 31, mostra-se a variação da recuperação de sólidos em massa no "underflow" para vários valores de pressões de entrada. Confirma-se nesta figura a baixa performance dos apex 2 e 6 mm. Na figura 32 é mostrada a variação da vazão em função da pressão para diversos valores de diâmetros de apex. O melhor resultado, obtido no teste 14 da Tabela 23 foi de 56,20% de recuperação de matéria carbonosa com um teor de cinzas de 37,59%. Quando comparado com a curva de lavabilidade, observa-se que para este teor de cinzas a recuperação teórica é de 63% em massa ou 77,58% de recuperação de matéria carbonosa com um "NGM" de 52%. Comparando-se este resultado com o melhor teste do circuito de flotação (C1 + C2 - 52,12% de recuperação de matéria carbonosa com 37,96% de cinzas), observa-se uma melhor performance da ciclonagem.

Nos anexos 44, 45 e 46 e figura 33 encontram-se testes granulométricos para a alimentação e para os dois melhores testes de ciclonagem realizados (underflow dos testes 8 e 14). Os va-

TABELA 23 - CICLONAGEM - TESTES REALIZADOS

TESTE	ÁPEX (mm)	PRESSÃO (kg/cm <sup>2</sup> )	U N D E R F L O W				O V E R F L O W			
			VAZÃO (ml/seg)	PESO SÓLIDOS POR TEMPO (g/seg)	REC. MAT. CARBONOSA (%)	CINZAS (%)	VAZÃO (ml/seg)	PESO SÓLIDOS POR TEMPO (g/seg)	REC. MAT. CARBONOSA (%)	CINZAS (%)
1	2	0,30	8,33	3,64	6,56	39,22	636,11	53,42	93,44	46,04
2	2	0,50	7,86	2,86	3,39	36,39	1.116,07	97,93	96,11	48,99
3	2	0,70	11,11	4,89	3,49	38,61	2.041,67	169,67	96,51	51,14
4	6	0,30	66,07	13,36	45,67	36,36	275,00	20,68	54,33	51,09
5	6	0,45	19,44	9,83	9,46	41,80	1.322,22	107,53	90,54	49,06
6	6	0,70	70,83	38,58	26,46	38,34	1.854,17	132,58	73,54	50,14
7	8	0,25	133,46	17,40	80,22	45,43	65,38	4,79	19,78	51,09
8	8	0,40	84,09	39,55	48,56	36,14	1.022,73	59,64	51,44	55,15
9	8	0,70	119,00	60,31	44,36	33,65	2.700,00	94,06	55,64	50,66
10	12	0,30	234,21	33,95	71,12	43,78	215,79	15,95	28,88	51,40
11	12	0,45	133,10	70,00	51,29	38,28	1.280,95	86,43	48,71	52,53
12	12	0,70	161,90	98,24	40,99	42,12	2.142,86	159,57	59,01	48,70
13	14	0,20	270,59	33,15	92,24	46,21	50,00	3,00	7,76	50,02
14	14	0,40	137,50	63,17	56,20	37,59	1.037,50	63,71	43,80	51,78
15	14	0,65	130,56	68,44	42,21	41,34	1.633,33	109,56	57,79	49,82

FIGURA 30

CICLONAGEM - UNDERFLOW

APEX A = 2 mm

B = 6 mm

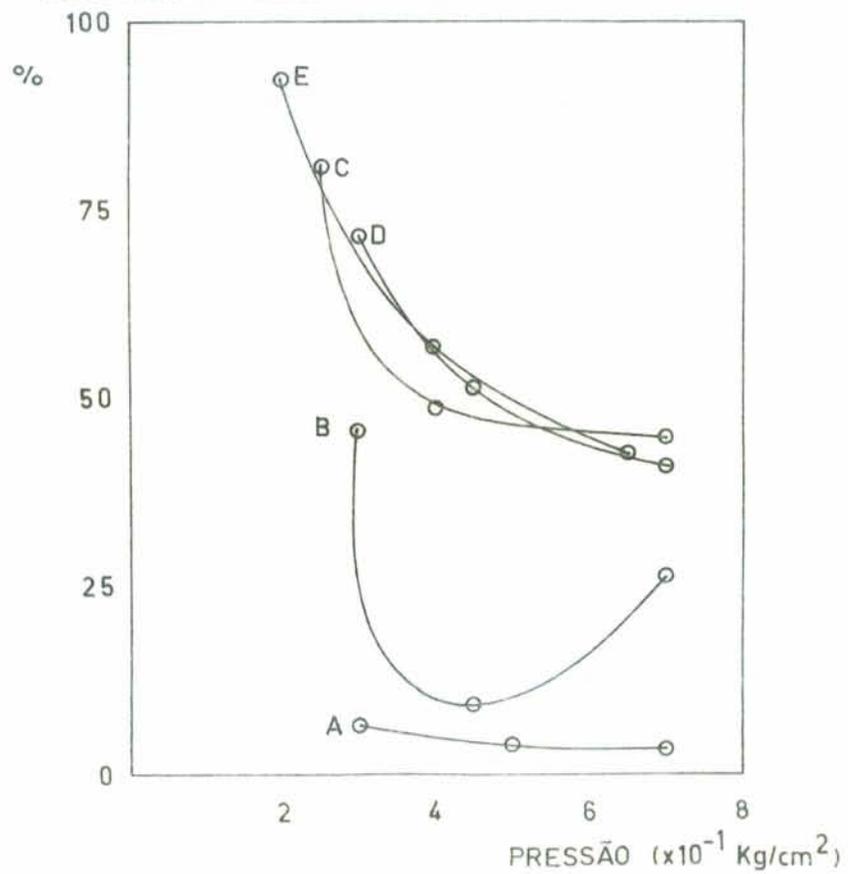
C = 8 mm

D = 12 mm

E = 14 mm

116

REC. MAT. CARBONOSA



CINZAS

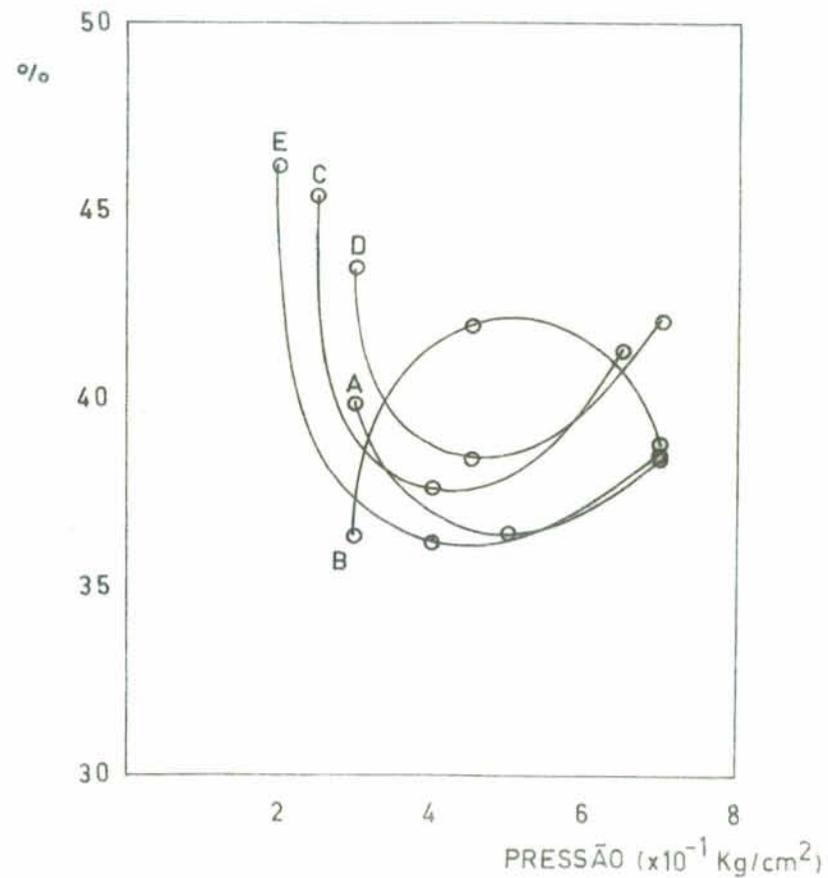
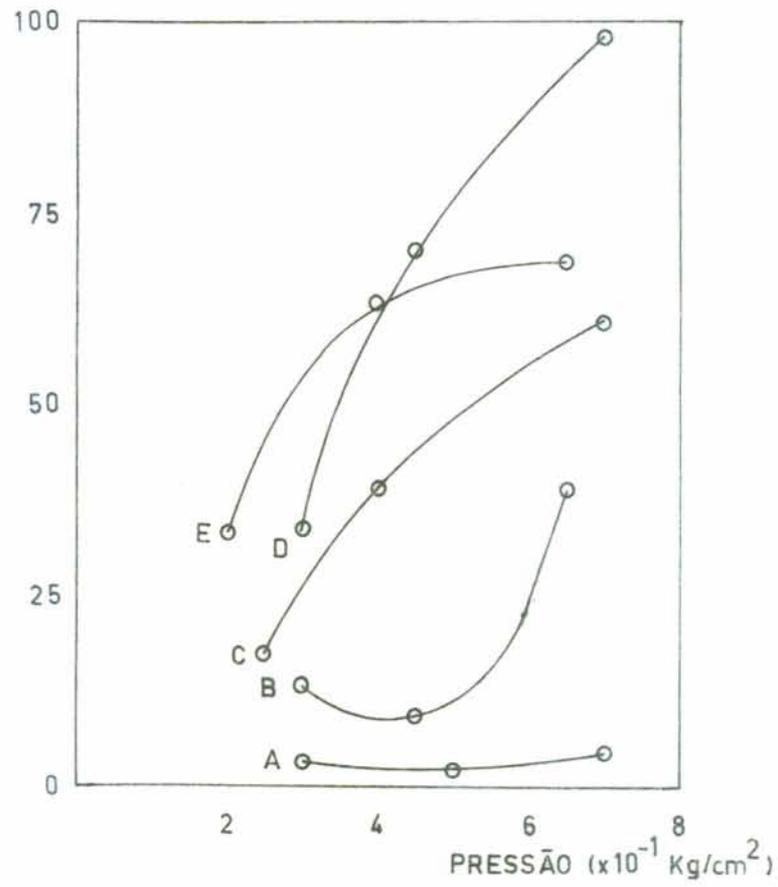


FIGURA 31

CICLONAGEM - UNDERFLOW

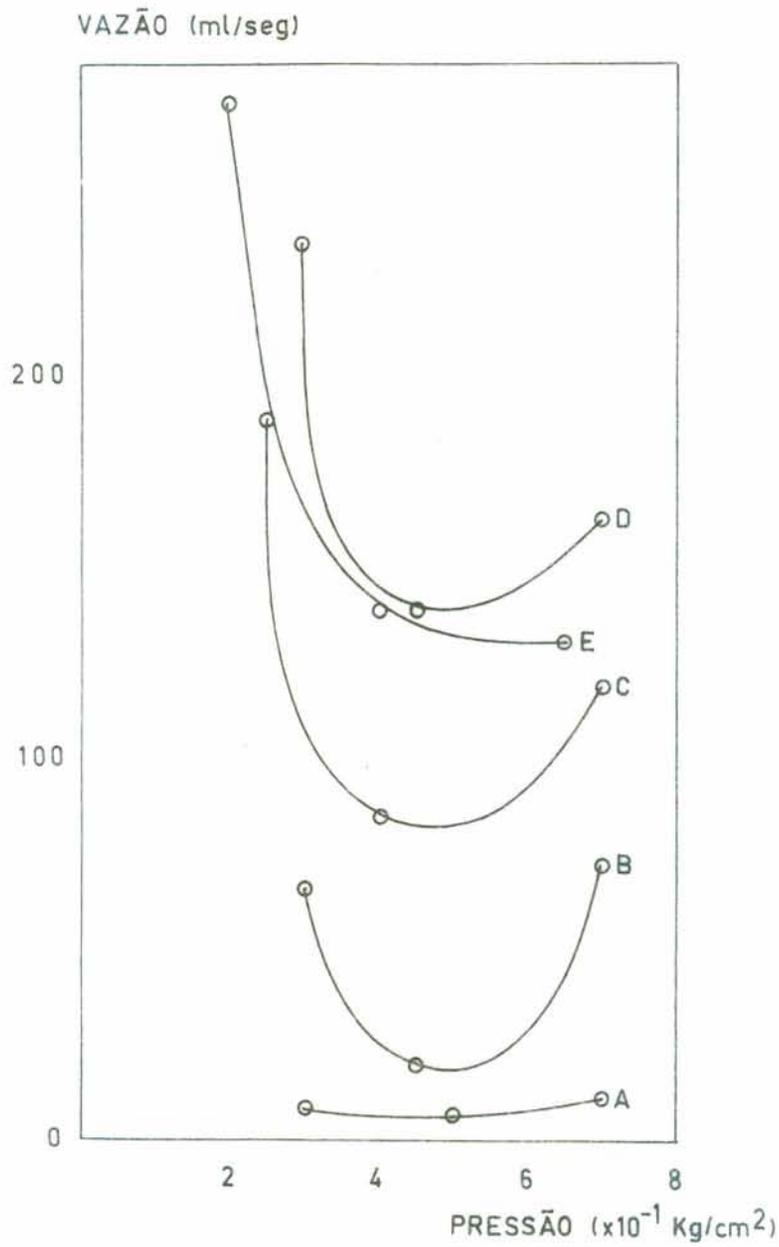
PESO DE SÓLIDOS NO UNDERFLOW  
POR TEMPO (g/seg)



APEX A = 2 mm  
 B = 6 mm  
 C = 8 mm  
 D = 12 mm  
 E = 14 mm

FIGURA 32

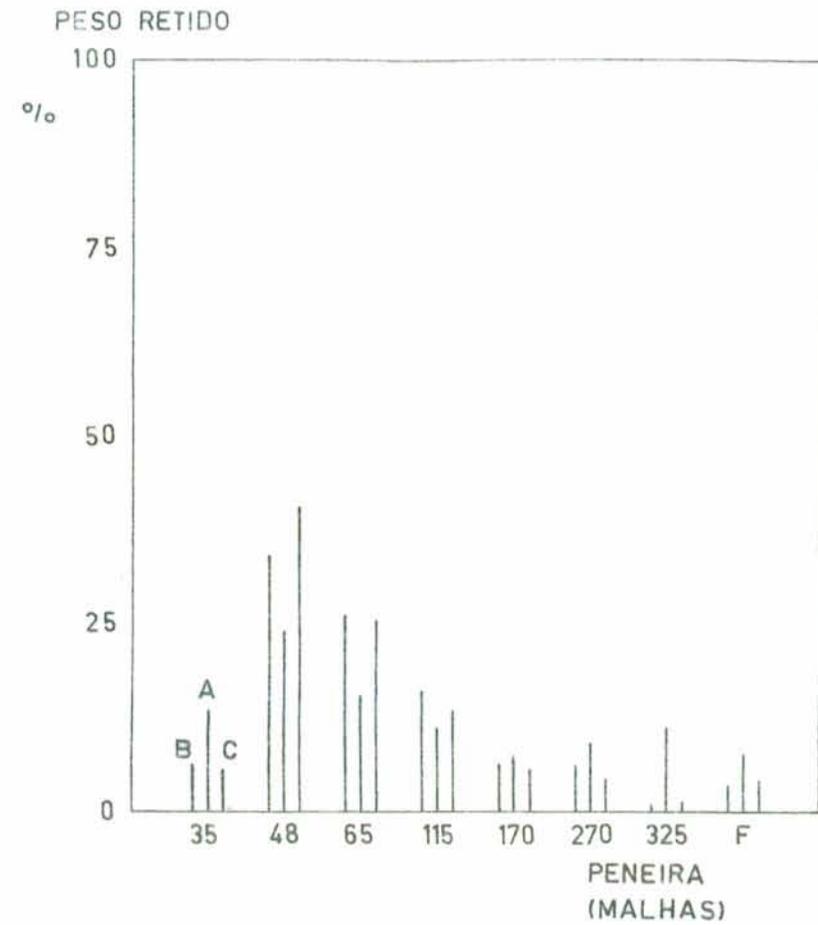
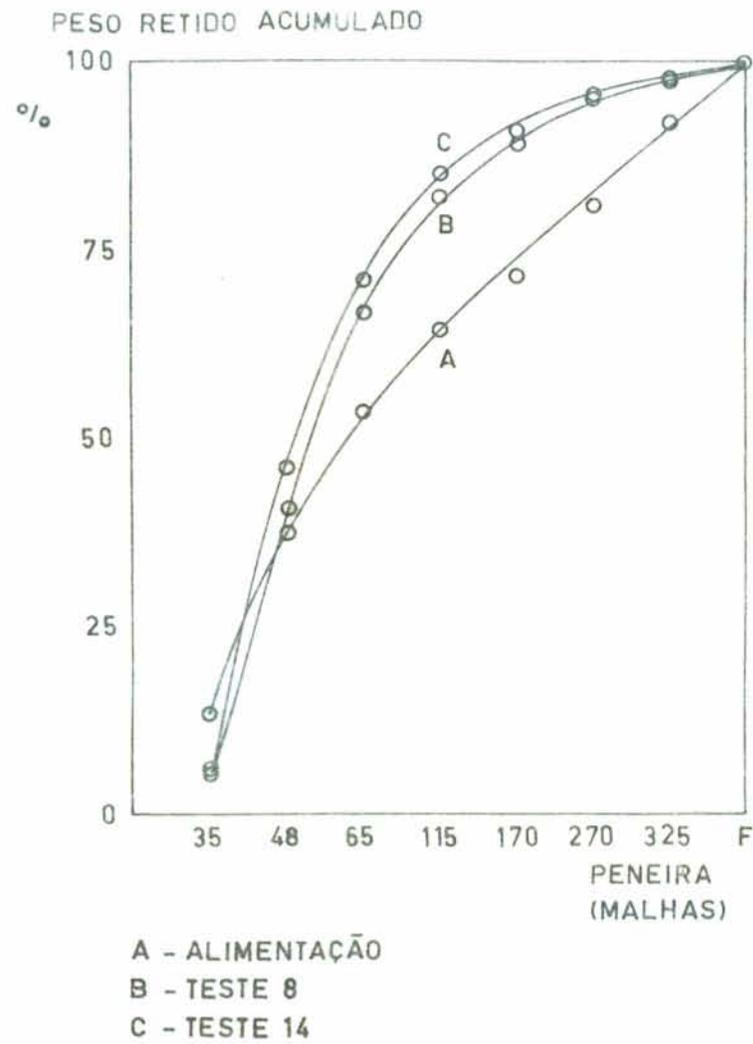
CICLONAGEM - UNDERFLOW



APEX A = 2 mm  
 B = 6 mm  
 C = 8 mm  
 D = 12 mm  
 E = 14 mm

FIGURA 33

## CICLONAGEM - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA



lores dos teores de cinzas da alimentação para estas mesmas faixas granulométricas encontram-se listados abaixo:

GRANULOMETRIA (MALHAS)	TEOR DE CINZAS (%)
28 - 35	51,53
35 - 48	50,69
48 - 65	51,12
65 - 115	48,29
115 - 170	49,97
170 - 270	51,25
270 - 325	53,96
- 325	57,63

Os testes de cinzas permanecem quase que constantes até a fração 270 malhas aumentando o seu teor para as frações menores. Como observado na figura 33, nota-se que o ciclone utilizado realiza uma concentração da matéria carbonosa no "underflow", com uma fração preferencial entre 48 e 115 malhas. Isto implica que ele realiza uma simples separação granulométrica. A concentração de matéria carbonosa no "overflow" pode estar mascarada pela ciclonagem das frações ultrafinas argilosas (naturais ou geradas mecanicamente) que são arrastadas pelo vortex primário. De um modo geral, a ciclonagem de finos de carvão com teores de cinzas crescentes com a diminuição da granulometria, será menos eficiente devido a este fenômeno. O teor de cinzas da faixa granulométrica da alimentação, que deu o melhor resultado é de 48,29% - (65 - 115 malhas). Como o teor de cinzas do produto do "underflow" é menor do que este valor teórico, uma possibilidade é que possa ter havido uma liberação parcial das cinzas devido ao tra

balno mecânico no hidrocilone. Esta hipótese é sustentada pelo estudo microscópico realizado, onde encontram-se partículas mistas com a parte orgânica completamente liberada da parte inorgânica (material argiloso) no mesmo grão. Ocorrendo um trabalho mecânico do ciclone sobre estas partículas, a parte inorgânica (mais frágil) tenderia a separar-se e, sendo esta mais fina, fluiria para o overflow, diminuindo assim o teor de cinzas no underflow (concentrado).

V - CONCLUSÕES E  
SUGESTÕES

## V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos, são possíveis as seguintes conclusões:

1 - As características de moabilidade do carvão de Candiotá são tais que o definem como bastante friável, com uma geração de finos de cominuição muito alta quando comparada com outros carvões (Leão por exemplo). A quantidade de material menor do que 0,59 mm, como produto de britagem de carvão ROM, atinge valores superiores a 20%, independentemente da abertura do britador. Isto implica que qualquer unidade de beneficiamento futuro deverá contar com um mínimo de 20% de massa passando para o circuito de finos.

2 - O grau de disseminação da matéria orgânica na matriz carbonosa é muito alto, fazendo com que para frações menores do que 270 malhas, a quantidade de partículas mistas de finidas como tendo matéria carbonosa entre 5 e 95%, alcance valores ao redor de 34% do total. Uma liberação completa, portanto, ocorrerá em frações muito pequenas. Este fato significa que o material da alimentação em uma unidade de beneficiamento será tal que as partículas serão em sua maioria mistas. Esta proporção de mistos aumenta com o aumento da granulometria, porém não muito significativamente como será analisado na conclusão que segue.

3 - A proporção de matéria inorgânica não varia significativamente com a granulometria, como ocorre em outros carvões sul-brasileiros. Este fato resulta das características de dis

seminação entre as respectivas matérias orgânica e inorgânica. A alta percentagem dos mistos encontrada no carvão de Candiota não varia significativamente, pelo menos até 115 malhas (frações menores representam uma quantidade menor do que 10% em peso).

4 - As características da distribuição densimétrica definem o carvão de Candiota como muito difícil de beneficiar, devido ao número alto de partículas mistas que fazem com que a proporção de material acumulado nas frações nobres seja muito baixa. As curvas de lavabilidade de finos (28 x 0 malhas) e grossos (5/16 x 28 malhas) são muito similares, fato que resulta da comprovação da conclusão 3 (pequena diferença entre as curvas densimétricas devem-se ao pequeno aumento na liberação das partículas nas frações menores). A forma das curvas de lavabilidade faz com que o material "near gravity" seja muito alto, fator indicativo da grande dificuldade do beneficiamento gravimétrico convencional.

5 - Os testes de jigagem são comprovatórios das conclusões anteriores no sentido de que o beneficiamento do carvão de Candiota é uma operação onerosa. O melhor resultado da jigagem descontínua (eficiência de FRASE e YANCEY de 83%) foi obtido na região de valores altos de recuperação em massa, porém com altos teores de cinzas no concentrado (73,2% de recuperação de massa e 45,5% de cinzas para uma alimentação em torno de 50% de cinzas). O material "near gravity" atingiu 39%.

6 - Tanto a flotação convencional como a flotação aglomerante (flocos-flotação), mostraram serem processos muito sensí-

veis a proporção de partículas mistas, onde a recuperação da matéria carbonosa não constitui problema, porém, a redução do teor de cinzas é, de um modo geral, muito pobre. A melhor performance de flotação convencional foi uma redução do teor de cinzas de 48,77% para 37,86% com uma recuperação de matéria carbonosa de 52,12%. O teor de cinzas encontrado de 37,86% não pôde ser diminuído devido a presença de mistos, ao arraste de ultra finos para o concentrado de flotação, e pelo recobrimento das partículas por lamas ("slime coating"). A flotação de partículas liberadas (-400 malhas) e floco-flotação não obtiveram resultados satisfatórios devido aos fatores citados acima.

7 - A ciclonagem das frações finas foi mais eficiente do que a flotação, obtendo-se, no melhor teste de recuperação da matéria carbonosa de 56,20% com um teor de 37,59%.

#### Sugestões:

Com base nos resultados e conclusões deste trabalho e, se o objetivo é conseguir beneficiar o carvão de Candiota até frações nobres (teores de cinzas menores do que 20%), sugere-se um estudo de métodos não convencionais de beneficiamento para frações cominuídas até a liberação.

VI - BIBLIOGRAFIA

## VI - BIBLIOGRAFIA

1. SCHNEIDER, A.W., "*Contribuição ao estudo dos principais recursos minerais do Rio Grande do Sul*", Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, RS (1978).
2. ABREU, S.F., "*Recursos minerais do Brasil*", Ed. Edgard Blücher Ltda. (1973).
3. BERGMANN, C.P., "*Beneficiamento de finos de carvão por aglomeração oleosa*", Tese de Mestrado, UFRGS, Escola de Engenharia (1982).
4. LEISTER, H., "*Características de lavabilidade de carvões do Rio Grande do Sul*", Engenharia, Mineração e Metalurgia, 243 (1965).
5. "*Carvões minerais no Brasil - características de carvões brutos do RS*"; CIENTEC, Centro de Informações sobre o Carvão, 1980.
6. LEUSIN, J.C., "*Companhia riograndese de mineração - expansão na capacidade de beneficiamento de carvão mineral*", VIII Encontro de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, UFRGS, Departamento de Minas e Metalurgia, (1981).
7. LEUSIN, J.C., "*Lavabilidade do carvão da mina do Iruí*", em "I Encontro do Emisfério Sul sobre Tecnologia Mineral", (1982).
8. MILIOLI, V.A., BRANDALISE, R.A., "*Beneficiamento do carvão de Santa Catarina no lavador de Capivari S/A*", em "VIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia", UFRGS, (1981).
9. SOUZA, T.J., BECKER, E.D., LEISTER, H., "*Evolução do desempenho e estado atual da unidade de beneficiamento de car-*

- vão da Aços Finos Piratini*", em "VIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia", UFRGS, (1981).
10. LEUSIN, J.C., DUARTE, C.F., *"Modificações na planta de beneficiamento da mina do Leão I"*, em "VIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia", UFRGS (1981).
  11. DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL, *"Sumário mineral 1982"*, Ministério das Minas e Energia (1982).
  12. DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL, *"Informativo anual da indústria carbonífera"*, Ministério das Minas e Energia (1982).
  13. PAIM, P.S.G., *"Geologia do carvão"*, trabalho não publicado (1981).
  14. LEINZ, V., AMARAL, S.E., *"Geologia geral"*, Companhia Editora Nacional (1975).
  15. STACH, E., MACKOWSKY, M., TEICHMÜLLER, M., TAYLOR, G.H., CHANDRA, D., TEICHMÜLLER, R., *"Stach's textbook of coal petrology"*, Gebrüder Borntraeger, Berlin (1975).
  16. PIATNICKI, S., *"Beneficiamento de carvões"*, trabalho não publicado (1981).
  17. MOTTA, J.P., *"Economia mineira nacional"*, Ed. McGraw-Hill do Brasil (1977).
  18. CORRIVEAU, M.P., SCHAPIRO, N., *"Projecting data from samples"*, in "Coal Preparation - 4th Edition", Leonard, J.W. (editor), Aime, New York, Cap.4, p.4-1 até 4-56 (1979).
  19. NORMA FRANCESA MF 03-016, *"Combustibles solides classement densimétrique et courbes de lavabilité"*, (1953).

20. O'BRIEN, E.J., *"Coal and its physical preparation"*, Society of Mining Engineers of Aime (1976).
21. PENG, F.F., WALTERS, A.D., GEER, M.R., LEONARD, J.W., *"Evaluation and prediction of optimum cleaning results"*, in *"Coal Preparation - 4th Edition"*, Leonard, J.W. (editor), Aime, New York, Cap.13, p.13-1 até 18-101 (1979).
22. TEIXEIRA, A., *"Curso de tratamento de minérios"*, Edições Engenharia (1973).
23. TAGGART, A.F., *"Handbook of mineral dressing"*, John Wiley and Sons (1945).
24. GAUDIN, A.M., *"Principles of mineral dressing"*, Mc-Graw-Hill Book Company (1936).
25. LOVELL, H.L., *"Hydraulic separation jigs"*, in *"Coal Preparation - 4th Edition"*, Leonard, J.W. (Editor), Aime, New York, Cap. 9, part 2, p.9-37 até 9-108, (1979).
26. HORSFALL, D.W., *"Coal preparation for plant operators"*; The South African Coal Processing Society Education, (1980).
27. ZIMMERMAN, R.E., *"Batac Jig - a new improved Baum type jig for cleaning coarse and fine sizes of coal"*, Mining Congress Journal, pp.43-49, American Mining Congress, Washington, D.C. (1974).
28. HOBERG, H., WALENZIK, D., *"Performance of jigs for desulfurization of fine coal sizes"*, Institute of mineral dressing, coking and briquetting, Technical University Aachen (1981).
29. MIOLI, V.A., *"Processo de beneficiamento de carvão em jigue e em meio denso"*, Aços Finos Piratini, trabalho não

publicado.

30. EMERICK, J.C. *"Greenwich Collieries"*, Pennsylvania Mines Corp., Private Communication, (1970).
31. DEURBROUCK, A.W., HUDY, J., *"Performance characteristics of coal-washing equipment: dense-medium cyclones"*, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, (1972).
32. BRADLEY, D., *"The hydrocyclone"*, Pergamon Press Ltda (1965).
33. SKOLNIK, E., *"Heavy medium cleaning of - 28 mesh coal"*, Mining Engineering (1980).
34. HUDY, J., *"Performance characteristics of coal-washing equipment: dense-medium coarse coal vessels"*, United States Department of the Interior, Bureau of Mines (1968).
35. PALOWITCH, E.R., DEURBROUCK, A.W., *"Dense medium separation"*, in *"Coal Preparation - 4th Edition"*, Leonard, J. W. (editor), AIME, New York, Cap.9, part 1, p.9-3 até 9-36, (1979).
36. O'BRIEN, E., *"Fine coal cleaning in the 28 x 0 fraction - a technical overview"*, Mining Engineering (1980).
37. DEURBROUCK, A.W., *"Performance characteristics of coal-washing equipment: Hydrocyclones"*, Bureau of Mines, Report of Investigations 7891, (1974).
38. MATONEY, J.P., *"The washing cyclone, an efficient tool for coal preparation"*, Heyl and Patterson, Inc.
39. WEYHER, I., LOVELL, H.L., *"The response of parameter variation in the hydrocyclone processing"*, Society of Mining Engineers of AIME, (1966).

40. COLLINS, J.W., *"The hydrocyclone - a most useful preparation tool"*, Coal Mining and Processing (1970).
41. O'BRIEN, E.J., *"Water-only cyclones: their functions and performance"*, Coal Age, (1976).
42. HOCHSCHEID, R., *"The evolving role of Water-only cyclones in fine coal cleaning"*, Society of Mining Engineers of AIME, (1981).
43. WEUHER, L.H.E., LOVELL, H.L., *"Hydrocyclone washing of fine coal"*, Society of Mining Engineers of AIME, (1969).
44. DRAEGER, E.A., COLLINS, J.W., *"Efficient use of Water-only cyclones"*, Mining Engineers, (1980).
45. TRAWINSKY, H., *"Theory, applications, and practical operation of hydrocyclones"*, Engineering and Mining Journal, (1976).
46. FORMAN, W.E., LUCAS, J.R., *"Current status of hydrocyclone technology"*, Department of Mining Engineering, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia, (1972).
47. TARJAN, G., *"Upgrading of fine coal slimes by in-series-connected hydrocycloes"*, Acta.Tech. Acad. Sci. Hung. 50(1-4), 377-82, (1965), Eng.
48. TRAWINSKI, H., EISEINLOHR, V., *"A Tecnologia dos hidrociclonas e seu recente desenvolvimento - aplicações práticas"*,
49. DEURBROUCK, A.W., PALOWITCH, E.R., *"Wet concentration of fine coal - hydraulic concentration"*, in "Coal Preparation - 4th Edition", Leonard, J.W. (editor), AIME, New York, Cap. 10, pp.10-40 até 10-74, (1979).
50. DEURBROUCK, A.W., PALOWITCH, E.R. *"Performance characteristics of coal-washing equipment: concentrating tables"*, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, (1963).

51. TIERNON, C.H., *"Concentrating tabels for fine coal cleaning"*, Mining Engineering, (1980).
52. SOKASKI, M., GEER, M.R., McMORRIS, W.L., *"Wet concentration of fine ocal - dense medium separation"*, in "Coal Preparation - 4th Edition", Leonard, J.W. (editor), AIME, New York, Cap. 10, pp.10-1 até 10-39, (1979).
53. CHAVES, A.P., POSSA, M.V., *"Beneficiamento do carvão de Candiota em Dynawhirpool"*, I Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral, Gráfica e Editora NBS Ltda., (1982).
54. TEIXEIRA, E.C., *"Beneficiamento de carvões sul brasileiros - flotação por espuma"*, Dissertação de Mestrado - UFRGS, (1979).
55. WODTKE, R.M.P., *"Beneficiamento de finos de carvão de Leão por flotação"*, Tese de Mestrado, UFRGS, Escola de Engenharia, (Abril de 1981).
56. PILLA, L., *"Físico-Química"*, Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, (1979).
57. ADAMSON, A.W., *"Physical chemistry of surfaces"*, John Wiley and Sons, Inc., (1976).
58. SHAW, D.J., *"Introdução à química dos colóides e de superfície"*, Editora da Universidade de São Paulo, (1975).
59. FUERSTENAU, D.W., LASKOWSKI, J., *"Investigation of the interfacial porperties of coal and their role in coal beneficiation"*, University of California, Department de Materials Science and Mineral Engineering, (1982).
60. MILLER, J.D., LASKOWSKI, J.S., CHANG, S.S., *"Dextrin adsorption by oxidized coal"*, University of Utah, Department of Metallurgý and Metallurgical Engineer, (1982).

61. ROSENBAUM, J.M., FUERSTENAU, D.W., LASKOWSKI, J., *"Effect of surface functional groups on the flotation of coal"*, University of California, Department of Materials Science and Mineral Engineering, (1982).
62. HORNSBY, D.T., LEJA, J., *"Flotation-washability characteristics of fine coals: Parte I - The concept of critical surface tension of floatability, Parte II - Experimental determinations using aqueous methanol solutions, Part III - Effect of weathering, petrographic composition and rank on floatability"*, University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Process Engineering, (1981).
63. MILLER, F.G., *"Reduction of sulfur in minus 28 mesh bituminous coal"*, AIME, Vol. 229, pp.7-14, (1964).
64. PLOUF, T.M., *"Froth flotation techniques reduce sulfur and ash"*, Mining Engineering, (1980).
65. WODTKE, R.P., TEIXEIRA, E.C., SAAVEDRA, J.S., RUBIO, J., *"Flotação de finos de carvão de Leão"*, Revista Metalurgia da ABM, 1980.
66. BUSTAMANTE, H., WARREN, L.J., *"Relation between the relative density of composite coaly grains and their flotation recovery"*, CSIRO Divison of Mineral Chemistry, (1982).
67. APLAN, F.F., *"Coal Flotation"*, in "Flotation", Fuerstenau, M.C. (editor), AIME, New York, Vol. 2, Cap. 45, p.1235-1264, (1976).
68. BROWN, D.J., *"Coal Flotation"*, in "Froth Flotation", Fuerstenau, D.W. (editor), AIME, New York, Cap.20, p.518-538, (1962).

69. ZIMMERMAN, R.E., "*Froth flotation*", in "Coal Preparation - 4th Edition", Leonard, J.W. (editor), AIME, New York, Cap. 10, p.10-75 atē 10-104, (1979).
70. SUN. S.C., ZIMMERMAN, R.E., "*The mechanism of coarse coal and mineral froth flotations*", AIME, Vol.187, 1950, pp. 616-622.
71. FIRTH, B.A., SWANSON, A.R., NICOL, S.K., "*The influence of feed size distribution on the staged flotation of poorly floating coals*", The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1978.
72. FUERSTENAU, D.W., "*Fine particle flotation*", in "Fine particle processing", Somasundaran, P. (editor), AIME, (1980).
73. J.T.CRAWFORD, AIME, 1935, Contribuição 86.
74. BURDON, R.G., "*Some factors influencing the rate of flotation of coal*", Proceedings, 4th International Coal Preparation Congress, Paper D-6, Harrogate, Great Britain, 1962, pp.273-285.
75. LEJA, J., HORNSBY, D., "*Selective flotation and its surface chemical characteristics*", University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Processing, (1979).
76. LEJA, J., HORNSBY, D., "*Critical surface tension and the selective separation of inherently hydrophobic solids*", University of British Columbia, Department of Mining and Mineral Processing, (1980).
77. NIMERICK, K.H., SOWDEN, S.K., CARDER, J.M., "*Froth conditioning - A proven approach to increase fine coal recovery*", The Coal Conference and Expo VI, Louisville, (1981).
78. NIMERICK, K.H., SCOTT, B.E., "*New Method of oxidized coal*

- flotation*", American Mining Congress Coal Show, Chicago, Illinois, (1980).
79. MEHROTRA, V.P., SASTRY, K.V.S., *"Oil agglomeration offers technical and economical advantages"*, Mining Engineering (1980).
80. VOYVTSKY, S., *"Colloid chemistry"*, Mir Publishers, (1975).
81. CAPES, C.E., *"Agglomeration"*, in "Coal Preparation - 4th Edition", Leonard, J.W. (editor), AIME, New York, Cap.10, pp.10-105 até 10-116, (1979).
82. PAULO ABIB ANDERY S.A., *"Tratamento de finos de carvão de Leão por flotação aglomerante"*, FINEP, (1977).
83. PAULO ABIB ANDERY S.A., *"Tratamento de finos de carvão de Candiota por flotação aglomerante"*, FINEP, (1977).
84. WAKEMAN, R.J., MEHROTRA, V.P., SASTRY, K.V.S., *"Mechanical dewatering of fine coal and refuse slurries"*, Bulk Solius Handling, Volume 1, Número 2, (Maio 1981).
85. LUCAS, J.R., MANEVAL, D.R., FOREMAN, W.E., *"Plant waste and environmental considerations"*, "Coal Preparation - 4th Edition", Leonard, J.W. (editor), AIME, New York, Cap.17, p.17-1 até 17-73, (1979).
86. VERNON, E., HUFFMAN, S., HUFFMAN, C., *"Guidelines for sample collecting and analytical methods used in the U.S. geological survey for determining chemical composition of coal"*, United States Department of the Interior, Geological Survey, (1975).
87. ROBERTS, T., FIRTH, B.A., NICOL, S.K., *"A modified laboratory cell for the flotation of coal"*, Elsevier Scientific Publishing Company, (1982).

88. ABNT - MB - 15, "*Análise imediata de carvão*", A.B.N.T., 48, 7, p.31-41 (1960).
89. "*Separador Jig Modelo SJ-1015 - Manual de Instruções para instalação, operação e manutenção*", CIMAQ S.A. (1981).
90. BORTOLUZZI, I.P., TEIXEIRA, E.C., SAAVEDRA, J.S., RUBIO, J., "*Tratamento de efluentes de lavadores de carvão*", XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, (1981).
91. SANDY, E.J., MATONEY, J.P., "*Mechanical dewatering*", in "*Coal Preparation - 4th Edition*", Leonard, J.W. (editor), AIME, (1979).
92. KOS, P., "*Review of sedimentation and thickening*", in "*Fine Particles Processing*", Somasundaran, P., (editor), AIME, New York, Cap.30, p.1594-1618, (1980).
93. SUNDSTROM, D.W., KLEI, H.E., "*Wastewater treatment*", Prentice-Hall, Inc., (1979).
94. PEARSE, M.J., "*Factors affecting the laboratory sizing of thickeners*", in "*Fine Particles Processing*", Somasundaran, P. (editor), AIME, New York, Cap.81, p.1619-1642, (1980).
95. LYNCH, A.J., "*Mineral crushing and grinding circuits*", Elsevier Scientific Publishing Company, (1977).
96. SHOTTS, R.Q., "*Screening*", in "*Coal Preparation - Terceira Edição*", Leonard, W.J. (editor), AIME, (1968).
97. SANTOS, J.A.R., "*Mini-calculadores eletrônicas*", Ed. Edgard Blücher Ltda., (1977).
98. CHRISTMANN, R.V., "*Estatística aplicada*", Ed. Edgard Blücher Ltda., (1978).

99. KREYSZIG, E., *"Matemática superior"*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., (1980).
100. ANON., *"Grindability of coal by the hardgrove - machine method"*, ASTM Standard D-409, American Society for Testing and Materials.
101. AUSTIN, L.G., McCLUNG, J.D., *"Size reduction of coal"*, in *"Coal Preparation - 4th Edition"*, Leonard, J.W. (editor), AIME, New York, Cap.7, pp.7-1 até 7-34, (1979).
102. PAULO ABIB ANDEREY S.A., *"Estudo sobre os carvões do Sul do país"*, 6 volumes, (1978).
103. AÇOS FINOS PIRATINI, *"Estudo de amostragem e beneficiamento de carvões do R.G.S."*, FINEP, (1975).
104. AÇOS FINOS PIRATINI, *"Testes com carvão de Candiota da C.R.M."*, (1978).
105. NÓVOA, R.V., *"Laboratório de Capivari - Estudo de lavabilidade - carvão de Candiota"*, Aços Finos Piratini, (1969).

VII - A N E X O S

## ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA -  
 JOGOS DE PENEIRAS (ESCALA TYLER) - MALHAS

Abertura Britador (mm)	1	5	9	13	18	27
Primeiro Jogo	5	5/16"	1/2"	5/8"	3/4"	1"
	6	3,5	3/8"	1/2"	1/2"	1/2"
	7	4	5/16"	5/16"	5/16"	5/16"
	8	5	4	4	4	4
	10	6	6	6	6	6
	12	8	8	8	8	8
	16	12	12	12	12	12
	20	20	20	20	20	20
Segundo Jogo						
	28	28	28	28	28	28
	35	35	35	35	35	35
	48	48	48	48	48	48
	65	65	65	65	65	65
	115	115	115	115	115	115
	170	170	170	170	170	170
	270	270	270	270	270	270
	325	325	325	325	325	325
	F	F	F	F	F	F

## ANEXO 2

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Peneira</i>		<i>Peso Retiro Acumulado</i>	<i>Cz - b.s.</i>
<i>Malhas</i>	<i>mm</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
5	3,962	4,05	
6	3,327	11,61	
7	2,794	19,07	
8	2,362	25,61	
10	1,651	32,87	53,3
12	1,397	44,13	
16	0,991	54,99	
20	0,833	59,72	
28	0,589	65,03	52,3
35	0,417	72,68	
48	0,295	78,17	
65	0,208	82,99	
115	0,124	87,57	
170	0,088	93,24	
270	0,053	98,68	56,5
325	0,043	99,97	
F		100	

Abertura britador = 1 mm

## ANEXO 3

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Peneira</i>		<i>Peso Retido Acumulado</i>	<i>Cz - b.s.</i>
<i>Malhas</i>	<i>mm</i>	<i>( % )</i>	<i>( % )</i>
5/16"	7,925	6,00	54,3
3,5	5,613	18,13	52,3
4	4,699	24,88	
5	3,962	32,15	
6	3,327	41,17	
8	2,362	49,61	
12	1,397	60,87	53,5
20	0,833	70,32	
28	0,589	74,03	
35	0,417	78,97	56,5
48	0,295	83,29	
65	0,208	86,88	
115	0,124	90,28	
170	0,088	93,70	
270	0,053	97,76	
325	0,043	99,89	59,7
F		100	

Abertura britador = 5 mm

## ANEXO 4

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Peneira</i>		<i>Peso Retido Acumulado</i>	<i>Cz - b.s.</i>
<i>Malhas</i>	<i>mm</i>	<i>( % )</i>	<i>(%)</i>
1/2"	12,700	3,50	
3/8"	9,423	19,21	
5/16"	7,925	25,23	
4	4,699	40,41	
6	3,327	50,35	
8	2,362	56,73	
12	1,397	65,62	
20	0,833	73,49	54,9
28	0,589	76,70	
35	0,417	81,32	
48	0,295	84,87	
65	0,208	88,06	53,6
115	0,124	91,31	
170	0,083	95,31	
270	0,053	99,13	
325	0,043	99,99	
F		100	

Abertura britador = 9 mm

## ANEXO 5

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Peneira</i>		<i>Peso Retido Acumulado</i>	<i>Cz - b.s.</i>
<i>Malhas</i>	<i>mm</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
5/8"	16,000	10,11	
1/2"	12,700	18,94	
5/16"	7,925	33,55	
4	4,699	44,29	53,7
6	3,327	53,37	
3	2,362	58,88	
12	1,397	66,89	
20	0,833	74,13	55,2
23	0,589	77,13	53,9
35	0,417	81,52	
48	0,295	84,91	
65	0,208	88,05	
115	0,124	91,33	
170	0,083	94,79	
270	0,053	98,48	
325	0,043	99,90	
F		100	

Abertura britador = 13 mm

## ANEXO 6

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Peneira</i>		<i>Peso Retido Acumulado</i>	<i>Cz - b.s.</i>
<i>Malhas</i>	<i>mm</i>	<i>( % )</i>	<i>( % )</i>
3/4"	19,050	12,98	
1/2"	12,700	26,22	
5/16"	7,925	36,68	
4	4,699	45,84	
6	3,327	53,60	
8	2,362	58,20	
12	1,397	66,59	
20	0,833	73,18	
28	0,589	76,66	
35	0,417	80,66	59,1
48	0,295	84,36	
65	0,208	87,83	55,1
115	0,124	90,46	
170	0,088	93,17	
270	0,053	96,80	56,5
325	0,043	99,91	
F		100	

Abertura britador = 18 mm

## ANEXO 7

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Peneira</i>		<i>Peso Retido Acumulado</i>	<i>Cz - b.s.</i>
<i>Malhas</i>	<i>mm</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
1"	25,400	14,16	52,3
1/2"	12,700	32,27	
5/16"	7,925	40,55	
4	4,699	43,72	
6	3,327	55,60	
8	2,362	60,27	52,5
12	1,397	67,44	
20	0,833	74,03	
28	0,589	77,07	
35	0,417	80,00	
48	0,295	84,23	
60	0,246	85,14	
115	0,124	89,98	
170	0,088	92,65	
270	0,053	96,90	
325	0,043	98,99	57,5
F		100	

Abertura britador = 27 mm

## ANEXO 8

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - PONTOS PERTINENTES A RETA CENTRAL

ABERTURA BRITADOR

PONTOS PERTINENTES A RETA CENTRAL

(mm)

ESCALA TYLER - MALHAS

1	12 - 16 - 20 - 28 - 35 - 48 - 65 - 116
5	6 - 8 - 12 - 20 - 28 - 35 - 48 - 65 - 115
9	4 - 6 - 8 - 12 - 20 - 28 - 35 - 48 - 65
13	5/16" - 4 - 6 - 8 - 12 - 20 - 28 - 35 - 48 - 65
18	5/16" - 4 - 6 - 8 - 12 - 20 - 28 - 35 - 48 - 65
27	1/2" - 5/16" - 4 - 6 - 8 - 12 - 29 - 28 - 35 - 48

## ANEXO 9

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - PARÂMETROS DA REGRESSÃO LINEAR

<i>Abertura Britador (mm)</i>	<i>Parâmetro "a" Coef. Angular</i>	<i>Parâmetro "b" Coef. Angular</i>	<i>Coefficiente Determinação (r<sup>2</sup>)</i>
1	- 0,053063644	1,399132202	0,955748329
5	- 0,056039766	1,414403366	0,908002934
9	- 0,056302592	1,430405784	0,921011580
13	- 0,060318786	1,431026770	0,900656916
18	- 0,059339559	1,436184773	0,937102212
27	- 0,060348005	1,439332517	0,928185004

## ANEXO 10

CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS AJUSTES DE EQUAÇÕES PARA OS GRÁFICOS DE ROSIN-RAMMLER-BENNETT

Abertura Britador: 1 mm

Parâmetros da regressão linear (ln abertura da peneira versus ln ln peso retido acumulado):

$$y = ax + b$$

$$a = - 0,053063644$$

$$b = 1,399132202$$

Parâmetros obtidos pela curva potencial (abertura britador versus coeficientes lineares e angulares):

$$y = ax^b$$

$$a = - 0,052777387 \quad \text{Erro} = 0,539\%$$

$$b = 1,398321454 \quad \text{Erro} = 0,058\%$$

Abertura Britador: 5 mm

Parâmetros da regressão linear (ln abertura da peneiras versus ln ln peso retido acumulado):

$$y = ax + b$$

$$a = - 0,056039766$$

$$b = 1,414403366$$

Parâmetros obtidos pela curva potencial (abertura britador versus coeficientes lineares e angulares):

$$y = ax^b$$

$$a = - 0,056377293 \quad \text{Erro} = 0,602\%$$

$$b = 1,41880604 \quad \text{Erro} = 0,311\%$$

Abertura Britador: 9 mm

Parâmetros da regressão linear (ln abertura da peneira versus ln ln peso retido acumulado):

$$y = ax + b$$

$$a = - 0,056302592$$

$$b = 1,430405784$$

Parâmetros obtidos pela curva potencial (abertura britador versus coeficientes lineares e angulares):

$$y = ax^b$$

$$a = - 0,057752377 \quad \text{Erro} = 2,575\%$$

$$b = 1,426354386 \quad \text{Erro} = 0,283\%$$

Abertura Britador: 13 mm

Parâmetros da regressão linear (ln abertura da peneira versus ln ln peso retido acumulado):

$$y = ax + b$$

$$a = - 0,060318786$$

$$b = 1,431026770$$

Parâmetros obtidos pela curva potencial (abertura britador versus coeficientes lineares e angulares):

$$y = ax^b$$

$$a = - 0,058629646 \quad \text{Erro} = 2,800\%$$

$$b = 1,431100536 \quad \text{Erro} = 0,005\%$$

Abertura Britador: 18 mm

Parâmetros da regressão linear (ln abertura da peneira versus ln ln peso retido acumulado):

$$y = ax + b$$

$$a = - 0,059339559$$

$$b = 1,436184773$$

Parâmetros obtidos pela curva potencial (abertura britador versus coeficientes lineares e angulares):

$$y = ax^b$$

$$a = - 0,059417103 \quad \text{Erro} = 0,131\%$$

$$b = 1,435313870 \quad \text{Erro} = 0,061\%$$

Abertura Britador: 27 mm

Parâmetros da regressão linear (ln abertura da peneira versus ln ln peso retido acumulado):

$$y = ax + b$$

$$a = - 0,060348005$$

$$b = 1,439332517$$

Parâmetros obtidos pela curva potencial (abertura britador versus coeficientes lineares e angulares):

$$y = ax^b$$

$$a = - 0,060413063 \quad \text{Erro} = 0,108\%$$

$$b = 1,440580899 \quad \text{Erro} = 0,087\%$$

## ANEXO 11

## CARACTERÍSTICAS DE MOABILIDADE - AJUSTES DE EQUAÇÃO - ERROS ENCONTRADOS

<i>Abertura Britador (mm)</i>	<i>Abertura Peneira Malhas mm</i>	<i>Peso Retido Acumulado Real (%)</i>	<i>Peso Retido Acumulado Calculado (%)</i>	<i>Erro (%)</i>	
1	16	1,000	54,99	57,31	4,21
1	28	0,589	65,03	64,27	1,17
1	48	0,295	78,17	75,03	4,02
1	115	0,124	87,57	91,83	4,86
5	8	2,362	49,61	51,25	3,30
5	20	0,833	70,32	65,04	7,51
5	35	0,417	78,97	76,79	2,76
5	65	0,208	86,88	91,34	5,14
9	6	3,327	50,35	48,63	3,41
9	12	1,397	65,62	59,38	9,52
9	28	0,589	76,70	73,17	4,61
9	48	0,295	84,87	87,15	2,69
13	4	4,699	44,29	45,63	3,02
13	8	2,362	58,88	53,29	9,32
13	20	0,833	74,13	68,60	7,45
13	35	0,417	81,52	81,73	0,26
13	65	0,208	88,05	98,17	11,49
18	4	4,699	45,84	46,15	0,68
18	8	2,362	58,20	54,15	6,95
18	20	0,833	73,18	69,88	4,51
18	35	0,417	80,66	83,52	3,54
27	5/16"	7,938	40,55	41,53	2,41
27	6	3,327	55,60	50,77	8,68
27	12	1,397	67,44	62,72	7,00
27	28	0,589	77,07	78,29	1,58
27	48	0,295	84,23	94,29	11,90

Erro Médio = 5,08%

Erro Padrão = 3,23%

## ANEXO 12

## CURVAS DE LAVABILIDADE - FRAÇÃO GROSSEIRA - (+ 28 MALHAS - 5/16")

Densidade	Massa (g)	Massa (%)	Cinzas (%)	M.C.	FLUTUADO			AFUNDADO		
					$\Sigma M \downarrow$	$\Sigma M.C \downarrow$	$\Sigma M.C / \Sigma M$	$\Sigma M \uparrow$	$\Sigma M.C \uparrow$	$\Sigma M.C / \Sigma M$
- 1,3	29,4	0,21	4,3	0,90	0,21	0,9	4,29	100	4887,8	48,88
1,3-1,4	703,5	4,94	15,0	74,10	5,15	75,0	14,56	99,79	4886,9	48,97
1,4-1,45	503,1	3,53	23,2	81,90	8,68	156,9	18,08	94,86	4812,8	50,74
1,45-1,50	547,6	3,84	29,5	113,28	12,52	270,2	21,58	91,33	4730,9	51,80
1,50-1,55	566,3	3,97	34,2	135,77	16,49	405,9	24,62	87,49	4617,6	52,78
1,55-1,60	643,3	4,51	36,4	164,16	21,00	570,1	27,15	83,52	4481,8	53,66
1,60-1,65	1055,8	7,41	40,1	297,14	28,41	867,3	30,53	79,01	4317,7	54,65
1,65-1,70	1273,8	8,94	44,6	398,72	37,35	1265,9	33,89	71,60	4020,5	56,15
1,70-1,75	400,0	2,81	45,8	128,70	40,16	1394,7	34,73	62,66	3621,8	57,80
1,75-1,80	1826,3	12,81	48,3	618,72	52,97	2013,4	38,01	59,85	3493,1	58,36
1,80-1,85	1701,8	11,94	52,0	620,88	64,91	2634,3	40,58	47,04	2874,4	61,11
1,85-1,90	1454,8	10,21	55,9	570,74	75,12	3205,0	42,67	35,10	2253,5	64,20
1,90-2,0	1025,0	7,19	58,6	421,33	82,31	3626,3	44,06	24,89	1682,8	67,61
2,0 - 2,1	507,8	4,26	61,5	261,99	86,57	3888,3	44,92	17,70	1261,5	71,27
2,1 - 2,2	224,1	1,57	68,3	107,23	88,14	3995,6	45,33	13,44	999,5	74,36
2,2 - 2,28	98,7	0,69	73,0	50,37	88,83	4045,9	45,55	11,87	892,2	75,17
+ 2,28	1593,0	11,18	75,3	841,85	100	4887,8	48,88	11,18	841,8	75,30
Total	14.254,3	100								

## ANEXO 13

ENSAIOS DE LAVABILIDADE - CURVA DE "NEAR GRAVITY MATERIAL"  
 PARA FRAÇÕES GROSSEIRAS

DENSIDADE (UPE)	MATERIAL COM $\pm 0,1$ UPE - ( $\pm 0,1$ ) (%)	NEAR GRAVITY MATERIAL ( $\pm 0,1$ )/RECUPERADO EM 2,00 UPE (%)
1,4	12,5	15,50
1,5	14,6	17,70
1,6	21,2	25,70
1,7	31,4	38,06
1,8	40,2	48,73
1,9	30,0	36,36
2,0	10,8	13,09
2,1	6,4	7,76

RECUPERADO EM 2,00 UPE = 0,825

UPE = UNIDADES DE PESO ESPECÍFICO

## ANEXO 14

## CURVAS DE LAVABILIDADE - FRAÇÃO FINA (- 28 MALHAS)

Fração	Massa (g)	Cz (%)	Massa (%)	M.C.	$\Sigma M \downarrow$	$\Sigma M.C \downarrow$	$\Sigma M.C / \Sigma M$	$\Sigma M \uparrow$	$\Sigma M.C \uparrow$	$\Sigma M.C / \Sigma M$
- 1,50	3,87	5,93	1,22	7,21	1,22	7,21	5,93	100,00	4911,60	49,12
1,50-1,60	18,29	14,37	5,76	82,71	6,97	89,92	12,90	98,78	4904,39	49,65
1,60-1,70	46,72	33,63	14,70	494,43	21,67	584,35	26,96	93,03	4821,68	51,83
1,70-1,80	29,80	28,45	9,38	266,75	31,05	851,10	27,41	78,33	4327,25	55,25
1,80-1,90	54,59	42,51	17,18	730,14	48,23	1581,24	32,79	68,95	4060,50	58,89
1,90-2,00	54,37	53,92	17,11	922,45	65,33	2503,70	38,33	51,77	3330,36	64,32
2,00-2,20	89,12	66,77	28,04	1872,43	93,38	4376,13	46,87	34,67	2407,91	69,46
2,20-2,40	7,05	81,67	2,22	181,05	15,59	4557,17	47,67	6,62	535,47	80,85
2,40-2,70	11,10	84,89	3,49	296,46	98,09	4853,63	48,98	4,41	354,43	80,93
+ 2,70	2,91	63,40	0,91	57,97	100,00	4911,60	49,12	0,91	57,97	63,40
	317,81									

## ANEXO 15

ENSAIOS DE LAVABILIDADE - CURVA DE "NEAR GRAVITY MATERIAL"  
PARA FRAÇÕES FINAS

DENSIDADE	MATERIAL COM	NEAR GRAVITY MATERIAL
(UPE)	$\pm 0,1$ UPE - ( $\pm 0,1$ )	( $\pm 0,1$ )/RECUPERADO EM 2,00 UPE
	(%)	(%)
1,6	14,6	22,29
1,7	22,8	34,81
1,8	31,2	47,63
1,9	35,6	54,35
2,0	33,2	50,69
2,1	25,4	38,78
2,2	13,2	20,15
2,3	6,2	9,47
2,4	2,6	3,97
2,5	1,8	2,75

RECUPERADO EM 2,00 UPE = 0,655

UPE = UNIDADES DE PESO ESPECÍFICO

## ANEXO 16

## ESTUDOS DE LIBERAÇÃO - TESTES PRELIMINARES DE FLOTAÇÃO

Óleo de Pinho (g/Ton)	Walker (g/Ton)	Silicato de Na (g/Ton)	Óleo Diesel (g/Ton)	MIBC (g/Ton)	Queros. (g/Ton)	Oleato de Na (molar)	pH	Granul.	Rec.Mat. Carb. (%)	Cz. no Conc. (%)	Recup. Peso (%)
600							4	-28+200	23,19	46,0	18,65
1.000							4	-28+200	24,74	44,8	21,65
600			600				7	-28+200	21,24	50,3	18,31
400			600				7	-28+200	19,07	47,8	16,60
1.200				150			7	-28+200	29,66	46,9	26,49
1.000			800				7	-28+200	17,33	46,5	15,02
600					1.000		7	-28+200	-----	-----	28,75
600							7	-28+200	-----	-----	16,25
600	1.000						7	-28+200	44,95	50,3	45,05
300	1.000	800					7	-28+200	-----	-----	8,57
600						10 <sup>-4</sup>	5	-28+200	-----	-----	-----
600		800	1.000				7	-28	28,91	42,6	25,62
600		800			1.000		7	-28	26,20	41,7	25,34
600	1.000	800					7	-28	40,38	40,0	36,41

## ANEXO 17

## ESTUDOS DE LIBERAÇÃO - TESTES DE FLOTAÇÃO PARA DIVERSAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS

<i>Granulometria (malhas)</i>	<i>Recuperação Peso (%)</i>	<i>Recuperação Mat. Carb. (%)</i>	<i>Cz. no conc. (%)</i>	<i>Cinzas Alim. (%)</i>
28 - 35	23,20	26,71	53,8	56,2
35 - 48	26,52	30,62	53,4	57,0
48 - 65	45,58	54,56	47,1	55,2
65 - 115	66,74	78,03	45,3	55,7
115 - 170	66,33	78,63	44,5	54,2
170 - 270	55,79	68,03	44,7	55,9
270 - 0	38,23	50,55	43,5	57,2

ÓLEO DE PINHO = 600 g/Ton

WALKER = 1.000 g/Ton

SILICATO DE SÓDIO = 800 g/Ton

pH = 7

11% DE SÓLIDOS

TEMPO DE COLETA DE MATERIAL = 3 min

## ANEXO 18

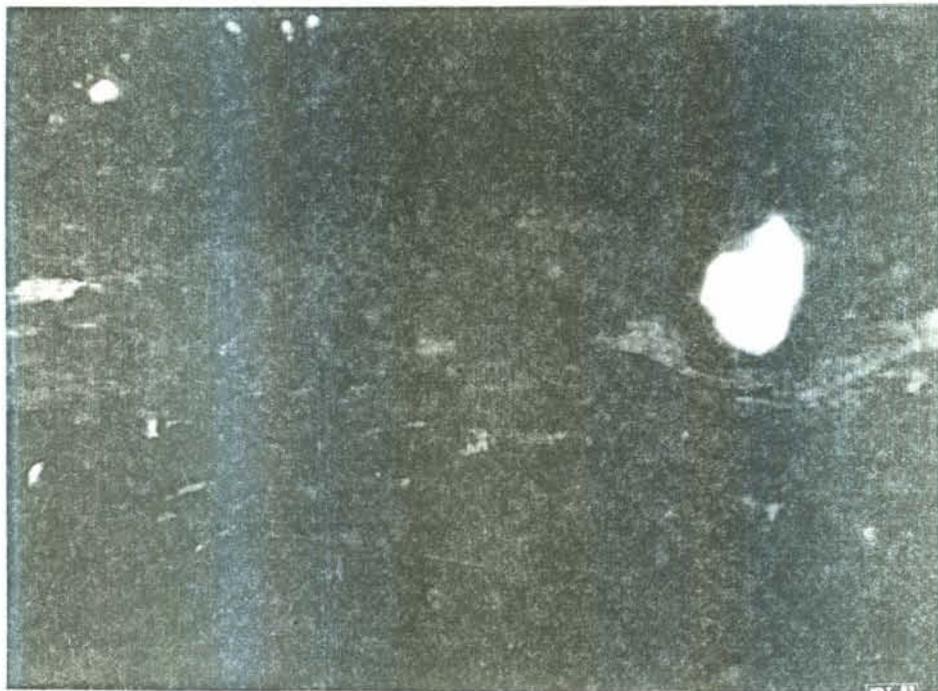
## ESTUDOS DE LIBERAÇÃO - FOTOS



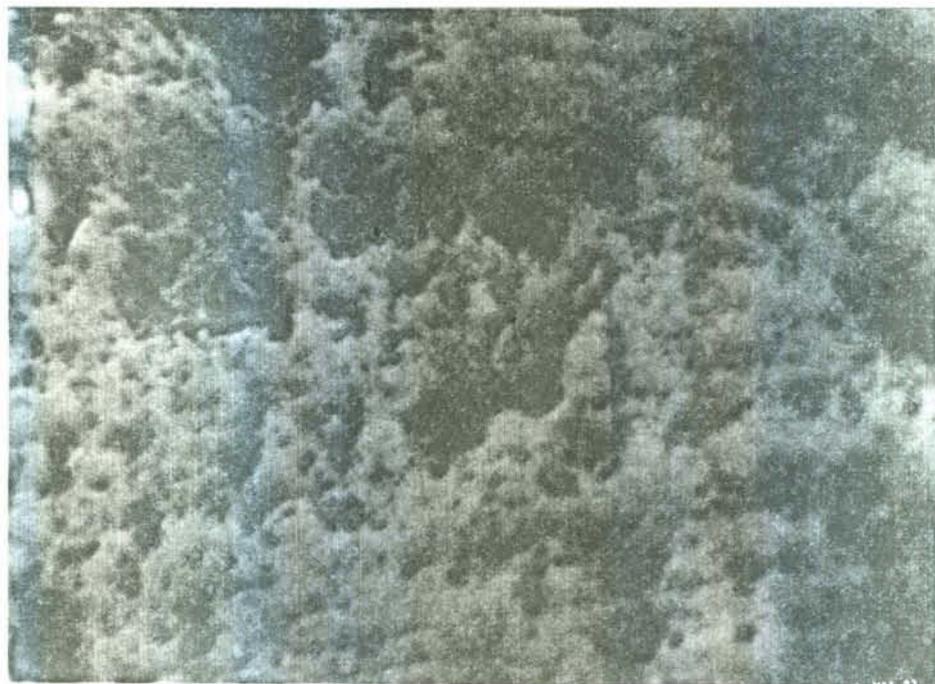
*Granulometria 35 - 48*  
*Matéria Carbonosa Pura*



*Granulometria 35 - 48*  
*Matéria Inorgânica Pura*



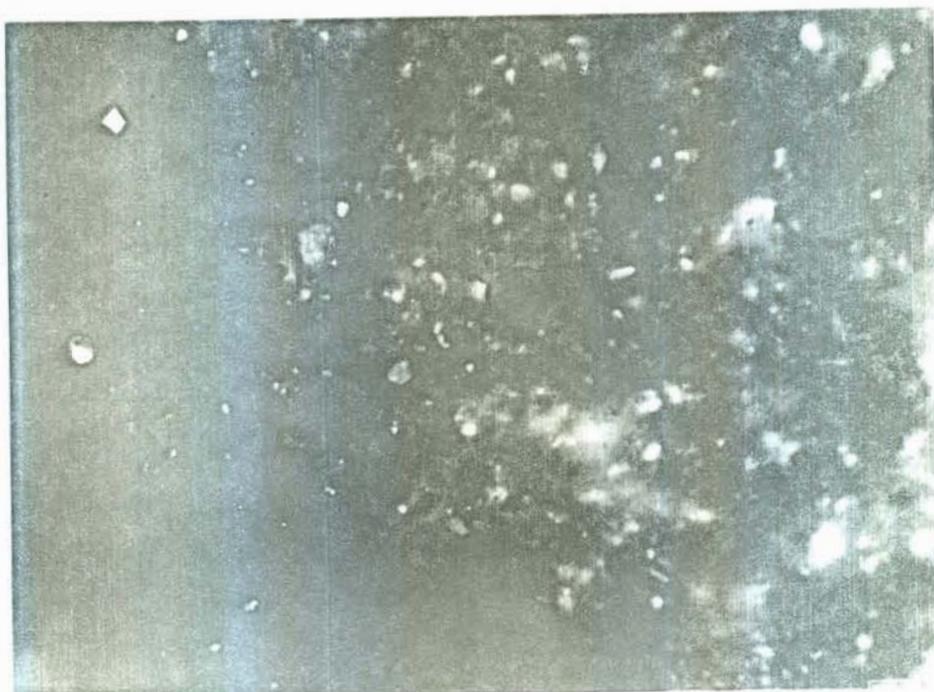
*Granulometria 35 - 48*  
*Matéria Carbonosa com mais de 80%*  
*Pirita com mais de 1%*



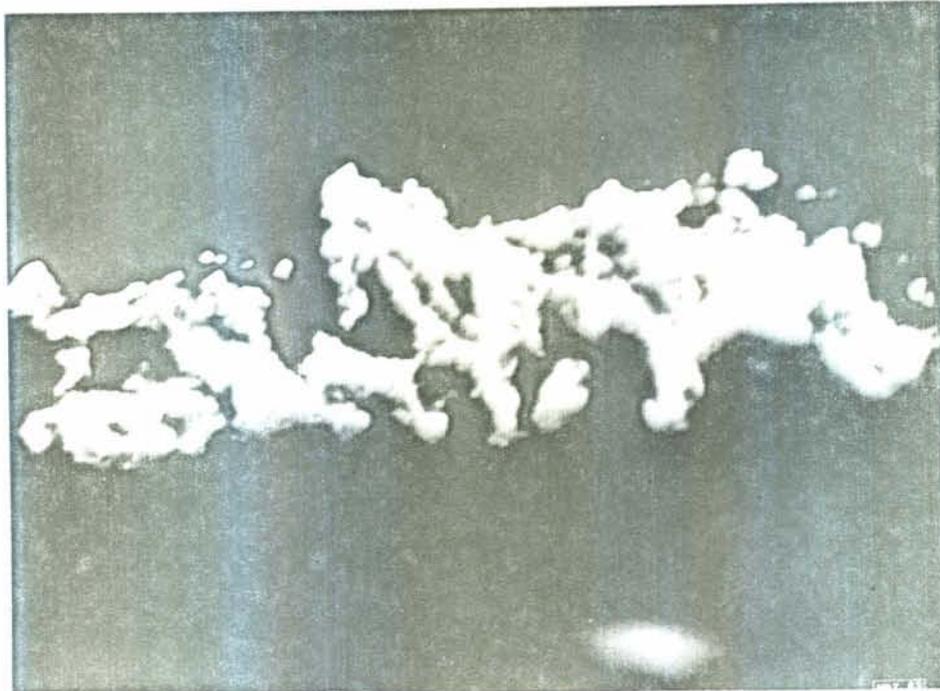
*Granulometria 35 - 48*  
*Pirita com mais de 30%*



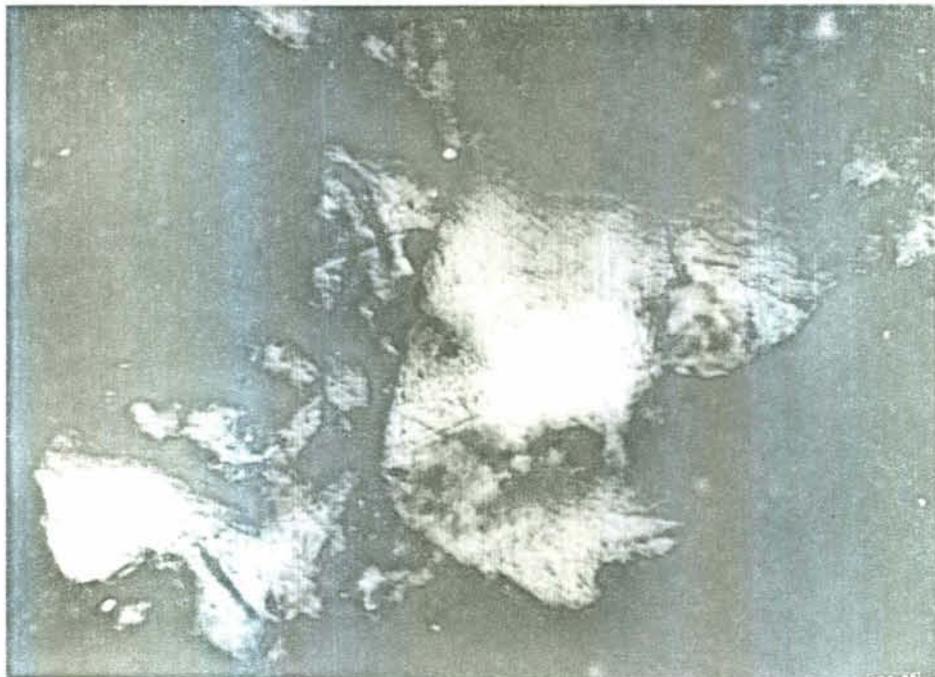
*Granulometria 35 - 48*  
*Matéria Carbonosa entre 20 e 80%*



*Granulometria 35 - 48*  
*Matéria Carbonosa com até 20%*



*Granulometria 65 - 115*  
*Pirita com mais de 30%*



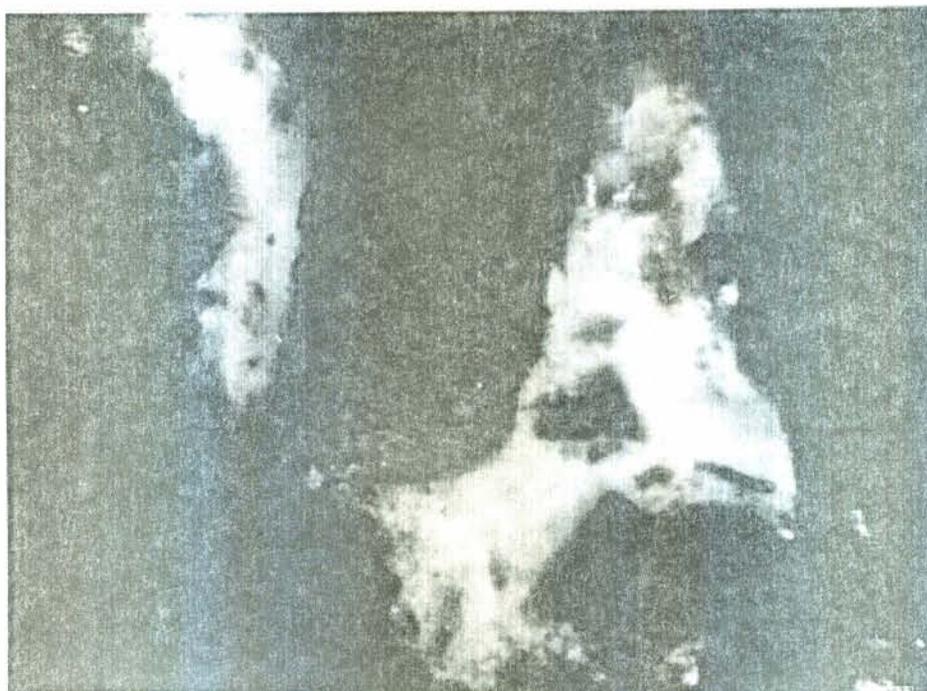
*Granulometria 65 - 115*  
*Matéria Carbonosa com mais de 80%*



*Granulometria 270 - 0*  
*Vista geral com grãos liberados*



*Granulometria 270 - 0*  
*Vista geral com grãos não liberados*



*Granulometria 65 - 115*  
*Matéria Carbonosa entre 20 e 80%*



*Granulometria 65 - 115*  
*Matéria Carbonosa até 20%*

## ANEXO 19

## JIGAGEM - RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES POR BATELADAS

(+ 10 - 3,5 MALHAS)

<i>% Flutuado</i>	<i>% Afundado</i>	<i>% Cz flutuado</i> <i>S/Finos</i>	<i>% Cz afundado</i> <i>S/Finos</i>
14,60	85,40	31,73	47,99
22,08	77,92	36,32	47,92
33,66	66,34	39,95	49,74
48,53	51,47	43,03	52,97
73,18	26,82	45,50	56,31

## ANEXO 20

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO pH

<i>pH</i>	<i>Rec.Mat.Carb.</i> (%)	<i>Cinzas no Conc.</i> (%)	<i>Alimentação - Cinzas</i> (%)
3,47	18,50	39,87	47,18
3,98	22,06	38,69	47,14
5,86	34,12	39,53	47,71
7,42	35,40	42,18	47,97
9,19	26,28	44,56	47,77
11,26	10,98	52,08	46,99

## ANEXO 21

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DE PINHO

<i>Óleo de Pinho</i> (g/Ton)	<i>Rec.Mat.Carb.</i> (%)	<i>Cinzas no Cone.</i> (%)	<i>Alim.-Cinzas</i> (%)
150	13,53	43,29	42,63
300	33,59	38,68	45,65
600	40,38	40,01	45,91
900	46,15	38,78	45,70

## ANEXO 22

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO WALKER

<i>Walker</i>	<i>Rec. Mat. Carb.</i>	<i>Cinzas no Con.</i>	<i>Alimentação - Cz.</i>
<i>(g/Ton)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
0	7,19	52,56	46,90
500	34,19	45,49	46,42
1.000	41,14	40,98	45,27
1.500	53,77	41,88	48,23
2.000	59,01	42,79	49,17

## ANEXO 23

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO SILICATO DE SÓDIO

<i>Silicato de Sódio(g/Ton)</i>	<i>Rec.Mat.Carb. (%)</i>	<i>Cinzas no Con. (%)</i>	<i>Aliment.-Cinzas (%)</i>
0	41,14	40,98	45,27
400	46,27	40,56	47,58
800	40,38	40,01	45,91
1.200	43,96	40,18	45,01

## ANEXO 24

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO TEMPO - CÉLULA F1

<i>Tempo</i> <i>(min)</i>	<i>Rec. Mat. Carb.</i> <i>(%)</i>	<i>Cinzas no Concentrado</i> <i>(%)</i>
0,5	16,19	40,64
1,0	28,80	40,82
2,0	38,85	42,00
3,0	42,37	43,18
5,0	45,16	44,50

Cinzas na alimentação = 48,77%

## ANEXO 35

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO TEMPO - CÉLULA F2

<i>Tempo</i> <i>(min)</i>	<i>Rec.Mat.Carb.</i> <i>(%)</i>	<i>Cinzas no Conc.</i> <i>(%)</i>	<i>Rec.Mat.Carb.</i> <i>Inicial (%)</i>
0,5	43,13	35,34	16,26
1,5	84,20	36,38	31,23
3,0	93,46	37,62	34,66

Cinzas na Alimentação = 43,58%

## ANEXO 26

## FLOTAÇÃO - EFEITO DO TEMPO - CÉLULA F3

<i>Tempo</i> <i>(min)</i>	<i>Rec.Mat.Carb.</i> <i>(%)</i>	<i>Cinzas no Cone.</i> <i>(%)</i>	<i>Rec.Mat.Carb.Inicial</i> <i>(%)</i>
1,5	44,64	44,66	25,19
3,0	48,28	45,92	27,24
5,0	50,73	46,10	28,62

Cinzas na Alimentação = 52,17%

## ANEXO 27

## FLOTAÇÃO - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Alimentação</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneira (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	31,80	31,80
48	13,20	45,00
65	15,41	60,41
115	8,95	69,36
170	5,29	74,65
F	25,35	100,00

## ANEXO 28

## FLOTAÇÃO - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Circuito - C1</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneira (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	0,50	0,50
48	1,16	1,66
65	9,97	11,63
115	17,77	29,40
170	11,71	41,11
F	58,89	100,00

## ANEXO 29

## FLOTAÇÃO - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Circuito - R1</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneira (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	30,52	30,52
48	16,72	47,24
65	13,15	60,39
115	4,51	64,90
170	3,49	68,39
F	31,61	100,00

## ANEXO 30

## FLOTAÇÃO - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Circuito - C2</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneira (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	0,06	0,06
43	0,44	0,50
65	12,30	13,30
115	17,11	30,41
170	16,43	46,84
F	53,16	100,00

## ANEXO 31

## FLOTAÇÃO - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Circuito - R2</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneira (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	0,76	0,76
48	0,89	1,65
65	3,16	4,81
115	5,95	10,76
170	7,59	18,35
F	81,65	100,00

## ANEXO 32

## FLOTAÇÃO - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Circuito - C3</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneira (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	5,92	5,92
48	20,11	26,03
65	31,03	57,06
115	9,27	66,33
170	4,73	71,11
F	28,89	100,00

## ANEXO 33

## FLOTAÇÃO - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Circuito - R3</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneira (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	44,04	44,04
48	12,07	56,11
65	5,64	61,75
115	1,23	63,03
170	1,22	64,25
F	35,75	100,00

ANEXO 34

FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DIESEL

Diesel (g/Ton)	0	1.000	2.000	3.000	4.000	8.000	16.000	8.000	16.000	32.000	45.000	64.000
Óleo de pinho (g/Ton)	600	600	600	600	600	600	600	900	900	900	900	900
Walker (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Silicato de Na (g/Ton)	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	300	800
Recuperação Peso (%)	25,35	24,01	27,51	31,78	45,58	26,61	12,63	52,22	54,09	57,29	59,76	64,75
Cinzas no Conc. (%)	47,19	45,57	48,19	43,18	44,20	45,16	50,33	43,13	43,93	44,03	45,92	44,75
Cinzas no Rej. (%)	53,80	53,69	54,42	56,86	56,56	54,37	52,48	61,28	63,06	65,11	63,74	67,86
Rec.Mat.Carb. (%)	27,96	27,08	30,21	38,03	51,33	30,36	13,13	61,61	64,13	68,27	68,89	75,94

## ANEXO 35

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DIESEL

Diesel (g/Ton)	8.000	32.000	32.000	32.000	64.000	64.000
Óleo de Pinho /g/Ton)	900	900	900	900	900	900
Walker (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Recuperação Peso (%)	53,90	45,58	42,15	39,64	52,33	40,53
Cinzas no Conc. (%)	46,81	45,52	46,90	45,99	46,51	46,38
Cinzas no Rej. (%)	63,20	64,75	63,42	62,81	65,48	61,95
Rec.Mat.Carb. (%)	66,17	56,41	51,40	43,82	62,99	49,04

## ANEXO 36

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DIESEL

Diesel (g/Ton)	4.000	8.000	16.000	32.000	64.000
Walker (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
MIBC (g/Ton)	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Silicato de Na(g/Ton)	800	800	800	800	800
Recuperação Peso (%)	33,17	29,58	39,70	36,82	48,25
Cinzas no Conc. (%)	46,03	47,08	45,83	47,29	45,87
Cinzas no Rej. (%)	56,52	54,44	55,29	55,44	54,69
Rec.Mat.Carb. (%)	38,12	32,79	44,38	40,81	52,70

## ANEXO 37

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DIESEL

Diesel (g/Ton)	4.000	3.000	16.000	32.000	64.000
Óleo de Pinho (g/Ton)	900	900	900	900	900
MIBC (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Silicato de Na (g/Ton)	800	800	800	800	800
Recuperação Peso (%)	24,55	38,00	41,35	45,32	42,56
Cinzas no Conc. (%)	49,25	47,62	47,70	47,04	48,06
Cinzas no Rej. (%)	51,96	52,27	53,14	53,70	59,51
Rec. Mat. Carb. (%)	25,30	40,21	44,04	48,73	48,73

## ANEXO 39

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DIESEL

Diesel (g/Ton)	4.000	32.000	64.000
Silicificado de Na (g/Ton)	800	800	800
MIBC (g/Ton)	1.200	1.200	1.200
Recuperação Peso (%)	32,43	28,69	36,13
Cinzas no Conc. (%)	50,90	51,98	49,75
Cinzas no Rej. (%)	59,26	57,42	58,34
Rec. Matéria Carbonosa (%)	36,64	31,21	40,56

## ANEXO 39

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO ÓLEO DE PINHO

Óleo de Pinho (g/Ton)	0	600	900	1.200	1.500	2.000
Diesel (g/Ton)	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000
Silicato de Na(g/Ton)	800	800	800	800	800	800
MIBC (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Recuperação Peso (%)	27,43	35,20	49,61	50,72	61,74	60,69
Cinzas no Conc. (%)	49,78	49,27	47,90	49,18	49,43	49,01
Cinzas no Rej. (%)	58,34	59,34	64,36	64,44	68,04	68,10
Rec. Mat. Carb. (%)	31,31	40,40	59,01	59,53	71,86	71,16

## ANEXO 40

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO WALKER

Walker (g/Ton)	0	500	1.000	1.000	1.500	2.000
Diesel (g/Ton)	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000
Silicato de Na(g/Ton)	800	800	800	800	800	800
MIBC (g/Ton)	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Recuperação Peso (%)	28,69	43,77	36,82	64,15	68,93	70,02
Cinzas no Conc. (%)	51,98	47,09	47,29	43,77	48,13	47,45
Cinzas no Rej. (%)	57,42	64,66	55,44	69,56	74,09	75,59
Rec. Mat. Carb. (%)	31,21	58,77	40,81	75,07	81,62	83,41

## ANEXO 41

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO SILICATO DE SÓDIO

Silicato de Na (g/Ton)	0	400	800	1.500	2.000
Diesel (g/Ton)	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000
Walker (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Óleo de Pinho (g/Ton)	900	900	900	900	900
Recuperação Peso (%)	39,64	62,22	57,29	51,91	47,01
Cinzas no Conc. (%)	45,99	48,43	44,03	45,64	45,36
Cinzas no Rej. (%)	62,81	69,16	65,11	67,80	66,03
Rec.Matéria Carbonosa (%)	48,82	73,34	68,27	64,46	58,79

## ANEXO 42

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO pH

pH	3	5	7	9	10	11	11	5	9
Silicificado de Na (g/Ton)	800	800	800	900	300	800	800	---	---
Diesel (g/Ton)	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000
Walker (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
MIBC (g/Ton)	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Recuperação Peso (%)	45,56	53,55	64,15	69,32	70,62	---	---	60,59	70,75
Cinzas no Conc. (%)	47,27	47,93	48,77	45,61	46,16	---	---	48,57	46,19
Cinzas no Rej. (%)	62,70	65,52	69,56	77,71	69,10	---	---	67,57	77,22
Rec. Mat. Carb. (%)	54,19	63,52	75,07	84,65	80,73	---	---	70,91	85,11

## ANEXO 43

## FLOCO-FLOTAÇÃO - EFEITO DO TEMPO

Tempo (min)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	1,0	1,5
Walker (g/Ton)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Diesel (g/Ton)	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000
MIBC (g/Ton)	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Recuperação Peso (%)	36,54	58,82	68,40	59,07	65,49	69,53	76,49	78,90	52,65	62,22
Cinzas no Conc. (%)	40,71	41,18	42,57	42,72	43,64	44,51	44,89	46,03	42,73	43,28
Cinzas no Rej. (%)	-	-	71,57	-	-	70,21	-	78,94	-	68,50
Rec. Mat. Carb. (%)	44,89	71,68	81,38	71,02	77,47	80,98	89,28	90,59	63,89	74,78

## ANEXO 44

## CICLONAGEM - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Amostra Inicial</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneiras (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	13,53	13,53
43	24,07	37,60
65	15,63	53,23
115	11,05	64,28
170	7,52	71,80
270	9,16	80,96
325	11,18	92,14
F	7,86	100,00

## ANEXO 45

## CICLONAGEM - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Teste 8 - Underflow</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneiras - Tyler</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	6,16	6,16
48	34,33	40,49
65	26,04	66,53
115	16,10	82,63
170	6,42	89,05
270	6,29	95,34
325	1,01	96,35
F	3,65	100,00

## ANEXO 46

## CICLONAGEM - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

<i>Teste 14 - Underflow</i>	<i>Peso Retido</i>	<i>Peso Retido Acumulado</i>
<i>Peneiras (Tyler)</i>	<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
35	5,56	5,56
48	40,44	46,00
65	25,13	71,13
115	13,82	84,95
170	5,42	90,37
270	4,61	94,98
325	1,02	96,00
F	4,00	100,00