

ARTHUR PINTO CHAVES

FLOTAÇÃO DE CARVÃO DE SANTA CATARINA
(Região do Alto Metalúrgico)

Tese apresentada à Escola
Politécnica da USP para a
obtenção do Título de Dou-
tor em Engenharia.

São Paulo, 1982

ARTHUR PINTO CHAVES

Engenheiro Metalurgista, Escola Politécnica da USP, 1969
Mestre em Engenharia, Escola Politécnica da USP, 1972

FLOTAÇÃO DE CARVÃO DE SANTA CATARINA
(Região do Alto Metalúrgico)

Tese apresentada à Escola
Politécnica da USP para a
obtenção do Título de Dou
tor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies
Professor Titular do Departamento
de Engenharia de Minas da EPUSP.

São Paulo, 1982

AGRADECIMENTOS

A pesquisa tecnológica que deu origem a esta tese de doutoramento faz parte de um programa maior e mais abrangente contratado pela FINEP-Financiadora de Estudos e Projetos com a Paulo Abib Engenharia S.A. Neste contrato foram estudadas as possibilidades de beneficiamento de todos os carvões do Sul do Brasil através dos diversos processos. A FINEP soube compreender o interesse científico e acadêmico de se rever uma pequena parte do trabalho e permitiu a exposição do material contido nesta tese como tal. Assim, nosso primeiro agradecimento é dirigido a essa entidade, através das seguintes personalidades:

- Dr. Arlindo de Almeida Rocha, coordenador deste projeto pela FINEP, e
- Dr. Paulo Roberto Krahe, chefe do grupo de estudos de energia da FINEP a época do desenrolar dos trabalhos.

Nosso segundo agradecimento é dirigido à Paulo Abib Engenharia S.A. pelo apoio que nos deu durante o desenrolar da pesquisa tecnológica e para a redação da presente tese, através das seguintes personalidades:

- Eng^o Kazuo Abe, nosso superior hierárquico à época da pesquisa,
- Eng^o Julio Wilson Amigo Ortega, que foi responsável pela parte prática dos trabalhos aqui descritos, realizada com cuidado e esmero, enriquecendo-os com suas opiniões e observações pessoais,
- Quim^o Reynaldo Arbue Pini, responsável pelas análises imediatas e outras utilizadas nesta pesquisa.

Queremos também externar a nossa gratidão ao Prof. Wildor Theodoro Hennies, nosso orientador, que há oito anos vem nos incentivando e sem cujo apoio e encorajamento esta tese jamais teria sido feita.

Finalmente, queremos deixar o nosso agradecimento maior e toda a nossa saudade ao Prof. Paulo Abib Andery. Menos pela participação que ele teve no delineamento deste trabalho (que infelizmente nem chegou a ver concluído), mas principalmente pelo exemplo de capacidade técnica, honestidade profissional, firmeza de propósitos e nobreza de caráter que muito nos marcaram, como a todos que com ele conviveram, e se constituem num ideal humano a ser perseguido.

RESUMO

FLOTAÇÃO DE CARVÃO DE SANTA CATARINA
(Região do Alto Metalúrgico)
Arthur Pinto Chaves (1979)

Esta tese de doutoramento trata da flotação de carvão brasileiro. A amostra utilizada foi composta com base em critérios estatísticos, a partir de incrementos múltiplos colhidos em diversas minas da região do Alto Metalúrgico de Santa Catarina. Os finos naturais presentes na amostra foram considerados distintos dos finos gerados no manuseio e cominuição posteriores, e, tratados separadamente.

As variáveis estudadas foram a adição de coletor, a diluição de polpa, a adição de cloreto férrico (como depressor da pirita) e o efeito dos espumantes e de presença das lamas. Inicialmente foram feitos ensaios exploratórios em que se delimitou a faixa de variação desses parâmetros e se estabeleceu a rotina operacional. No planejamento experimental foram empregadas ao máximo ferramentas estatísticas de modo a controlar o erro experimental e a conhecer o efeito das diferentes variáveis e de suas interações.

As conclusões obtidas no que se refere à depressão da matéria mineral foram:

a) finos naturais:

- a adição de coletor aparentemente não tem ação preponderante,
- o cloreto férrico aparentemente não exerce efeito significativo,
- os melhores resultados são obtidos com alta diluição de sólidos na flotação,
- a eliminação das lamas favorece a seletividade do processo,
- é perfeitamente viável a flotação sem a presença do cole-

tor, o efeito manifestado por este reagente sendo de aumentar a recuperação de matéria carbonosa. O metil-isobutil-carbinol (MIBC) é mais seletivo que o óleo de pinho.

b) finos de cominuição:

- o processo é mais seletivo com este material que com os finos naturais,
- o cloreto férrico e a diluição de polpa exercem efeito de mesmo sentido que com os finos naturais.

O estudo da eliminação da pirita foi feito em duas etapas: na primeira se considerou a depressão da pirita e os ensaios foram feitos concomitantemente aos estudos de depressão das cinzas, dada a sua interdependência e possibilidade de interação mútua. Houve efetiva depressão da pirita pelo cloreto férrico e verificou-se que as condições que favorecem a eliminação das cinzas favorecem a depressão da pirita. Os resultados obtidos com os finos de cominuição são melhores que os obtidos com os finos naturais. A segunda etapa deste estudo pesquisou a depirritização em dois estágios, o primeiro consistindo na depressão das cinzas e flotação da matéria carbonosa (sem preocupação de deprimir a pirita), seguida de uma etapa de flotação da pirita e depressão da matéria carbonosa. Consta-se que este processo também é efetivo, e comparável ao anterior. Foi possível estabelecer modelo matemático representando-o.

A maneira como os ensaios foram conduzidos permitiu que eles fossem analisados sob um ponto de vista cinético. As velocidades de flotação dos finos naturais e de cominuição são diferentes, o que confirma serem eles duas matérias-primas intrinsecamente distintas. O efeito do coletor é o de aumentar a velocidade de flotação, sendo a ação do óleo de pinho muito mais acentuada que a do MIBC. Entretanto, o mesmo efeito se faz sentir sobre a matéria mineral, o que explica a maior seletividade deste reagente. As lamelas prejudicam a velocidade de flotação dos finos naturais.

O trabalho compreende ainda uma revisão inicial dos conceitos básicos de flotação dos carvões, com vistas a uma mais perfeita caracterização e compreensão dos termos empregados.

ABSTRACT

FLOTATION OF SANTA CATARINA COAL
(High Metallurgical Area)
Arthur Pinto Chaves* (1979)

This thesis deals with froth flotation of Brazilian coal. The samples for the experimental work were composed of many increments taken from different mines in High Metallurgical area in the State of Santa Catarina, Brazil. The composition of the increments was done on a statistical bases. The natural fines present in the samples were considered distinct from comminution or handling fines and treated in different ways.

The variables considered were promoter addition, pulp dilution, Ferric Chloride addition (as pyrite depressant) and the effects of frother and of slimes presence. Inicially exploratory tests were performed in order to limit the range of variation for the parameters and to stablish operational routine. Statistics has been amply used to control experimental error and to control parameters effect and its interactions.

The conclusions concerning to mineral matter depression are as follows:

a) with natural fines:

- promoter addition had no apparent preponderant action,
- Ferric Chloride did not exert any apparent important action,
- better results were obtained with a high pulp dilution,
- desliming favours process selectivity,
- promoter-less flotation is viable, this reagent effect being to increase carbonaceous matter recovery. Methyl-isobutyl-carbinol presents better selectivity as

compared to pine oil.

b) with comminution fines:

- the process presented a better selectivity for this material as compared to natural fines,
- Ferric Chloride and pulp dilution show the same behaviours as for the case of natural fines.

The depyritization study was performed in two methods: first, pyrite depression was considered and tests were performed at the same time as ash depression tests, considering its interdependence and the possibility of mutual interaction. Ferric Chloride effectively depressed pyrite and conditions favouring ash depression are the same which favour pyrite depression. Better results were obtained with comminution fines. Secondly, a double stage depyritization was considered, the first part consisting of ash depression and carbonaceous matter flotation, followed by a pyrite flotation step and carbonaceous matter depression. This process was also found to be effective and comparable to the first method. A mathematical model was developed to represent it.

The tests were performed in such a way as to allow analysis from a kinetic viewpoint. The velocities for natural fines are different from those for comminution fines. This demonstrates again their intrinsic difference. The promoter increases the flotation rate. The pine oil effect is greater than the effect of Methyl-isobutyl-carbinol, but the same effect is exerted on mineral matter, which justifies this reagent's greater selectivity. Slimes diminish flotation rate for natural fines.

This thesis also presents an initial revision of basic concepts on coal flotation.

Í N D I C E

9

FLOTAÇÃO DE CARVÃO DE SANTA CATARINA (Região do Alto Metalúrgico)

Notação e Nomenclatura	11
Lista de Figuras	14
Lista de Tabelas	16
1. Introdução	18
1.1. Generalidades	18
1.2. Conjuntura do carvão no Sul do Brasil	20
1.3. Apresentação do trabalho	24
2. Revisão de conceitos básicos	27
2.1. Modelo eletrocinético da superfície do carvão	27
2.2. Mecanismos de depressão e coleta.....	29
2.3. Efeito do "rank"	33
2.4. Efeito da oxidação	37
2.5. Cinética da flotação	37
2.6. Condições peculiares de operação	42
2.7. Reagentes utilizados	44
2.8. Eliminação do enxofre.....	47
2.8.1. Depressão da pirita	48
2.8.2. Flotação em duplo estágio	48
2.8.3. Métodos gravimétricos	49
3. Amostra utilizada	50
3.1. Amostragem executada	52
3.2. Características da amostra resultante	54
4. Técnica experimental	60
4.1. "Timed Release Analysis"	60
4.2. Técnica experimental utilizada	63
4.3. Análises químicas	65
4.4. Equipamentos	67
5. Programação dos experimentos e critérios de trabalho...	68
6. Ensaio visando a eliminação das cinzas	72
6.1. Finos naturais	72
6.1.1. Experimento executado	72

	10
6.1.2. Efeito das variáveis	74
6.1.3. Flotação sem adição de coletor	88
6.2. Finos de cominuição	90
6.2.1. Experimento executado	92
6.2.2. Efeito das variáveis,	93
7. Ensaio visando a eliminação da pirita	105
7.1. Depressão da pirita	106
7.1.1. Finos naturais	106
7.1.2. Finos de cominuição	109
7.2. Flotação em duplo estágio (finos naturais)	109
7.2.1. Experimento realizado	110
7.2.2. Análise dos resultados	113
8. Cinética de flotação	117
8.1. Ordem de reação	117
8.1.1. Finos naturais	120
8.1.2. Finos de cominuição	122
8.1.3. Conclusões e critérios	124
8.2. Efeito das variáveis	124
8.2.1. Efeito do coletor e do espumante	125
8.2.2. Efeito do depressor da pirita	127
8.2.3. Efeito da granulometria	129
8.2.4. Efeito da diluição	129
8.2.5. Conclusões	131
9. Conclusões	133
Bibliografia	138

NOTAÇÃO E NOMENCLATURA

A inexistência de uma terminologia única que fixe e esclareça os conceitos envolvidos no Tratamento de Minerais obriga a que desde logo se definam todos os termos que serão usados ao longo deste trabalho, sob o risco de que o mesmo não seja entendido, ou pior, seja mal interpretado. Assim, passamos a esclarecer o significado dos termos técnicos empregados.

- Recuperação em massa: é a relação, expressa em termos percentuais, entre a massa do concentrado e a massa inicialmente alimentada ao processo.
- Recuperação de matéria carbonosa: é a relação, expressa em termos percentuais, entre a massa de matéria carbonosa presente no concentrado e a massa de matéria carbonosa inicialmente presente na alimentação do processo. Neste trabalho considerou-se como matéria carbonosa o resultado da subtração da massa de cinzas da massa total inicial. Isto é uma simplificação mas atende bem às nossas necessidades de informação e à precisão dos experimentos praticados.
- Enriquecimento: é a relação, expressa em números, entre o teor de um elemento ou de uma substância no concentrado e o teor inicial da alimentação.
- Rejeição das cinzas: é a relação, expressa em termos percentuais, entre a massa de cinzas presente no rejeito e a massa de cinzas inicialmente presente na alimentação do processo.
- Rejeição do enxofre: é a relação, expressa em termos percentuais, entre a massa de enxofre presente no rejeito e a massa de enxofre inicialmente presente na alimentação do processo.
- Curvas de seletividade: é um método para comparar os resultados de ensaios de beneficiamento. Consiste em colocar em um diagrama cartesiano ortogonal os resultados dos ensaios em termos de teor do concentrado e recuperação. Os melho-

res resultados serão aqueles que, para os maiores teores apresentarem as maiores recuperações. A figura 18 (item 6.2.2.) é um bom exemplo desse tratamento. Note-se que à medida que se caminha para a direita melhoram os teores de cinzas (diminuem) e à medida que se caminha para cima, melhoram as recuperações de matéria carbonosa. Assim, os melhores resultados se apresentarão no gráfico para cima e para a direita, como é o caso das curvas designadas pelos números 4 e 8.

As unidades adotadas são sempre métricas, exceto onde expressamente indicado o contrário.

Para tamanho de partículas e distribuições granulométricas usa-se sempre a escala Tyler. Adotou-se a forma de representação usual entre o pessoal especializado em carvão, que é a de representar as duas malhas superior e inferior separadas por x. Por exemplo, 4 x 2" significa passante em quatro e retido em duas polegadas, e, é equivalente à notação mais usual: -4 + 2".

Alguns termos são empregados na língua de origem por não haver terminologia consagrada em português, como é o caso dos diferentes estágios de operação de concentração ("rougher", "scavenger" e "cleaner"). Outras vezes, não existe termo correspondente em português e a tradução literal carece de significado, como é o caso por exemplo dos tipos de carvão ("flambant", "demi gras", etc.).

A tabela 1 resume todos os símbolos adotados na exposição e as unidades em que foram tomados.

TABELA 1: SÍMBOLOS EMPREGADOS E UNIDADES

a = teor de cinzas na fórmula de Gy (%)

a = porcentagem de sólidos, em peso (%)

a_i = coeficientes empíricos

B = parâmetro de cálculo na fórmula de Gy

b = adição de depressor (g/t)

c = adição de coletor (g/t)

C = adição de coletor (g/t) no modelo matemático

c = concentração de material flotável no instante t (g/l)

c_0 = concentração inicial de material flotável (g/l)

D = adição de depressor (g/t) no modelo matemático

d = dimensão do maior fragmento presente na amostra (cm)

E = enriquecimento

e = fator de composição mineralógica na fórmula de Gy

ζ = potencial eletrocinético (mV)

f = fator de forma (adimensional)

g = fator de distribuição de tamanhos (adimensional)

k = constante cinética (seg^{-1})

l = fator de liberação (adimensional)

M = massa mínima de amostra representativa (g)

nC = recuperação de matéria carbonosa, acumulada (%)

$\bar{n}Cz$ = rejeição das cinzas, acumulada (%)

$\bar{n}S$ = rejeição do enxofre, acumulada (%)

%Cz = teor de cinzas, (%)

%M = recuperação em massa, acumulada (%)

%S = teor de enxofre (%)

$s = \frac{\sigma}{a}$, na fórmula de Gy

σ = desvio padrão

t = tempo (seg)

= malhas, escala de Tyler

LISTA DE FIGURAS

1 - Modelo eletrocinético da superfície de partícula mine <u>ral</u> imersa em uma solução	28
2 - Efeito do pH sobre o potencial eletrocinético de carvã <u>o</u> e de pirita na presença de concentrações variã <u>veis</u> de cloreto fêrrico	32
3 - Efeito do "rank" sobre a flotabilidade dos carvõ <u>es</u>	35
4 - Variação do potencial eletrocinético com o pH para vitrê <u>nio</u> de diferentes carvõ <u>es</u>	35
5 - Efeito da oxidação sobre o potencial eletrocinético ...	38
6 - Correlação entre ângulo de contacto e potencial ele <u>troc</u> inético de carvõ <u>es</u> oxidados	38
7 - Bacia carbonífera de Santa Catarina - locais de cole <u>ta</u> de amostras	51
8 - Curvas de lavabilidade e das cinzas dos finos natu <u>rais</u> e de cominuição. Fração 28x200#	57
9 - Ensaio de flotação pela técnica de "Timed Release Ana <u>lysis</u> "	62
10 - Esquema do ensaio de flotação pela técnica simplifica <u>da</u>	64
11 - Curvas de seletividade dos ensaios executados com os finos natu <u>rais</u>	77
12 - Efeito do coletor - finos natu <u>rais</u>	79
13 - Efeito do depressor - finos natu <u>rais</u>	81
14 - Efeito da diluição de polpa - finos natu <u>rais</u>	83
15 - Efeito da granulometria de alimentação - finos natu <u>rais</u>	84
16 - Representação espacial do planejamento executado	85
17 - Curvas de seletividade - efeito do coletor e do espu <u>man</u> te (finos natu <u>rais</u>)	91
18 - Curvas de seletividade - finos de cominuição	95
19 - Efeito do coletor - finos de cominuição	97
20 - Efeito do depressor - finos de cominuição	99
21 - Efeito da diluição de polpa - finos de cominuição	101
22 - Efeito das lamas - finos de cominuição	102

23 - Relação entre teores de cinzas e enxofre no flotado - finos naturais	108
24 - Planejamento experimental para a flotação da pirita..	111
25 - Predição do enriquecimento de enxofre em função da adição de coletor e depressor - finos naturais	115
26 - Aferição do modelo	116
27 - Cinética de flotação dos finos de cominuição (en- saios 4 e 5)	118
28 - Cinética de flotação dos finos naturais (ensaios 2 e 3)	118
29 - Finos naturais: cinética de flotação - 1º flotado ...	121
30 - Finos de cominuição: cinética de flotação - 1º flo- tado	123
31 - Finos naturais: efeito do coletor e do espumante so- bre a cinética de flotação	125
32 - Finos de cominuição: efeito da adição de coletor so- bre a cinética de flotação	127
33 - Finos naturais: efeito da adição de depressor sobre a cinética de flotação	128
34 - Finos de cominuição: efeito da adição de depressor sobre a cinética de flotação	128
35 - Finos de cominuição e naturais: efeito da granulo- metria sobre a cinética de flotação	130
36 - Finos de cominuição e naturais: efeito da diluição de polpa sobre a cinética de flotação	130
37 - Comparação entre os resultados de flotação e as la- vabilidades dos materiais estudados	137

LISTA DE TABELAS

1 - Símbolos empregados e unidades	13
2 - Porcentagem de carvão alimentado a usinas de flotação em relação ao total de carvão beneficiado, por país	19
3 - Reservas brasileiras de carvão	21
4 - Distribuição granulométrica do material amostrado	55
5 - Distribuição granulométrica do produto de britagem a 1/2" (circuito fechado)	56
6 - Finos naturais (28x200#) - resultados do ensaio densimétrico e análises químicas	58
7 - Finos de cominuição (28x200#) - resultados do ensaio densimétrico e análises químicas	58
8 - Finos naturais: experimento fatorial - condições ensaiadas	73
9 - Finos naturais: resultados experimentais	74
10 - Finos naturais: tratamento dos resultados experimentais	75
11 - Finos naturais: agrupamento dos ensaios segundo as adições de coletor e médias de cada grupo	78
12 - Finos naturais: agrupamento dos ensaios segundo as adições de depressor e médias de cada grupo	80
13 - Finos naturais: agrupamento dos ensaios segundo as diluições de polpa no estágio "rougher" e médias de cada grupo	82
14 - Finos naturais: quadro comparativo dos ensaios conduzidos com material a 35# x0 e a 35x200#	84
15 - Configuração do experimento fatorial	86
16 - Finos naturais: ações e interações das variáveis de controle	87
17 - Finos naturais: condições de ensaio	88
18 - Finos naturais: resultados experimentais	89
19 - Finos naturais: tratamento dos resultados - ensaios sem adição de coletor	89
20 - Finos de cominuição: experimento fatorial - condições ensaiadas	92

21 - Finos de cominuição: resultados experimentais	93
22 - Finos de cominuição: tratamento dos resultados experimentais	94
23 - Finos de cominuição: agrupamento dos ensaios segundo as adições de coletor e médias de cada grupo	96
24 - Finos de cominuição: agrupamento dos ensaios segundo as adições de depressor e médias de cada grupo	98
25 - Finos de cominuição: agrupamento dos ensaios segundo as diluições de polpa no início do estágio "rougher" e médias de cada grupo	100
26 - Finos de cominuição: quadro comparativo dos ensaios conduzidos com material a 35# x0 e a 35x200#	102
27 - Finos de cominuição: ações e interações das variáveis de controle	104
28 - Finos naturais: efeito da depressão da pirita no Flotado I	107
29 - Finos naturais: resultados experimentais - ensaios de depirritização por flotação em duplo estágio	112
30 - Finos naturais: tratamento cinético dos resultados ...	120
31 - Finos de cominuição: tratamento cinético dos resultados	123
32 - Finos naturais: efeito do coletor e do espumante	125

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

As exigências da sociedade moderna e o rápido aumento populacional demandam cada vez mais energia: de 1970 a 2000 gastar-se-á mais energia que em toda a História anterior da humanidade (1). Entre as diferentes fontes o carvão mineral ainda se constitui na mais barata e mais abundante.

Nos Estados Unidos 17% das necessidades energéticas são supridas pelo carvão mineral. Em função da alteração conjuntural introduzida pelo embargo de petróleo pela OPEP é de se prever que esse consumo dobre entre 1975 e 1985 e chegue à casa dos 1.300.000.000 t/ano (1). Deste total, metade da produção atual é beneficiada (2), parte por flotação. O uso deste processo iniciou-se em 1950; em 1960 já estavam instaladas trinta e uma usinas (40 segundo (3)) e em 1970, 66 (2). Todas as usinas projetadas mais recentemente tem incorporado a flotação em seu circuito. Segundo Aplan (4) a produção americana de concentrados de flotação é de 12.000.000 t/ano e tende a crescer. Arbiter (5) descrevendo as tendências atuais de beneficiamento de carvão declara: "... existem presentemente* 459 usinas de preparação. Destas, 175 utilizam jiques, enquanto 265 usam meio denso, 124 usam ciclones e mesas de concentração e 123 utilizam equipamento "de flotação".

Na Inglaterra 4.000.000 t/ano foram beneficiadas por flotação em 1960 (3). Isto foi equivalente a três por cento da produção total e a quatro por cento das vendas,

(1) - os números entre parênteses se referem à citação constante da Bibliografia apresentada no fim do volume.

* - em 1962

o que indica uma qualidade superior para o produto. Segundo o mesmo autor, o custo de operação de uma usina de flotação de carvão é de 1.10 US\$/t e o investimento, 19,000 US\$/t seca/h (valores de 1961).

Na Índia, país com carvões bastante parecidos com os nossos, mas com uma indústria mineira e uma estrutura de produção já muito bem estabelecidas, a flotação dos finos abaixo de 0,5 mm é prática definitivamente incorporada (6).

Analisando a estrutura de produção e comercialização de carvão em vários países pode-se construir o seguinte quadro, que reflete a situação em 1976 * :

TABELA 2: PORCENTAGEM DE CARVÃO ALIMENTADO A USINAS DE FLOTAÇÃO EM RELAÇÃO AO TOTAL DE CARVÃO BENEFICIADO, POR PAÍS (Valores de 1976)

Aus- trá- lia	Bél- gica	Fran- ça	Ín- dia	Japão	Polô- nia	Rumã- nia	África do Sul	Ingla- terra	EUA	Alema- nia Oc.
8,8	8,5	8,9	0,7	11,0	5,7	12,0	2,5	7,2	4,1	7,1

No Brasil sô desde muito recentemente se vem dando atenção ao carvão mineral como combustível. O consumo é ainda muito pequeno quando comparado com valores internacionais, 2.216.900 t/ano (prevendo-se para 1984, 10.200.000 t/ano (7)) e com as nossas necessidades de energia - em 1976 correspondeu a 3,5% do total de energia consumido no Brasil (8). De 1966 a 1976 seu consumo cresceu a taxas inferiores à do total de energia primária, mas é de se esperar que nos próximos dez anos tal situação se modifique e se tenha um incremento anual de 15,2% (8).

* - Edwards, G.E. - comunicação pessoal, junho 1976

Em Santa Catarina tradicionalmente os mineradores flotam carvão para a produção de coque de fundição. Isto é feito sobre os finos separados na pré-lavagem feita na boca-da-mina.

1.2. CONJUNTURA DO CARVÃO NO SUL DO BRASIL

Embora se conheçam ocorrências de carvão em diversos pontos do território nacional só existe exploração nas bacias carboníferas do Sul do Brasil, que são as seguintes:

- bacia do Rio do Peixe, no estado do Paraná;
- bacia de Santa Catarina, no sul deste Estado, em torno da cidade de Criciúma;
- bacia de Leão-Butiã, no estado do Rio Grande do Sul, próximo a São Jerônimo;
- bacia de Charqueadas, junto à anterior;
- bacia de Candiota, nesse mesmo Estado, próximo a Bagé;

De descoberta muito recente é a bacia de Morungava, no Rio Grande do Sul. Dada a qualidade excelente do carvão aí jacente todos os esforços vem sendo envidados para tornar a sua exploração uma realidade dentro do mais curto prazo.

A tabela 3 procura indicar a situação das reservas de carvão nessa região (9). As reservas mais significativas se situam no estado do Rio Grande do Sul, mas as de Santa Catarina tem maior importância econômica pois parte do carvão é coqueificável. As reservas vem sendo constantemente aumentadas por trabalhos de pesquisa que vem sendo realizados na área. Assim comparando com os valores fornecidos por Fabrício (10), Krahe (11) e por Putzer (12), estimativas respectivamente de 1973, 1975 e 1976, vemos que as reservas totais vem aumentando sempre, bem como vem aumentando, dentro das reservas totais, a participação das reservas medidas.

TABELA 3: RESERVAS BRASILEIRAS DE CARVÃO (10^6 t)
(apud 9)

Estado	Camada ou Local	Medida	Indicada	Inferida	Total
Santa Catarina	Barro Branco	238	374	149	761
	Irapuã	-	-	10	10
	Bonito	31	207	611	849
	TOTAL	269	581	770	1620
Rio Grande do Sul	Candiota	319	946	6736	8001
	Iruí	70	36	224	330
	Leão-Butiã	34	6	600	640
	Charqueadas	666	331	63	1060
	TOTAL	1089	1319	7623	10031
Paraná	Rio do Peixe	29		11	40
	Rio Tibagi	6		1	7
	TOTAL	35		12	47
TOTAL		3293			11698

Em Santa Catarina é lavrada atualmente a camada Barro Branco. Existem duas outras camadas significativas, a Irapuã, em fase de esgotamento e a Bonito que não é explorada. Embora a camada Barro Branco seja bastante uniforme, pode-se dividir a bacia em duas regiões, segundo a relação entre a produção possível de carvão metalúrgico com 18,5% de cinzas e carvão vapor (13):

- região do alto metalúrgico, constituída pelas zonas de Içara, Criciúma, Urussanga e Lauro Müller. Caracteriza-se por uma produção de carvão metalúrgico com 18,5% de cinzas bem superior à de carvão vapor.
- região do médio e baixo metalúrgico, constituída de Sangão, Rio Maina e Siderópolis, fornece uma produção de carvão metalúrgico da mesma ordem da de carvão vapor (13). Este trabalho procura definir o comportamento à flotação do carvão da região do alto metalúrgico.

A camada Barro Branco é uma série de estratos com altura média de 1,70 m. A camada superior, denominada "forro" é de carvão, bem como a inferior, chamada "banco". Sotoposto ao banco há uma camada de argilito, o Barro Branco, que dá o nome à formação. Sobre este há uma camada delgada de carvão brilhante, o "coringa". Sobre o coringa ocorre uma série de intercalações de carvão e folhelho designadas pelo nome de "quadração". Em números grosseiros, para a altura total de 1,70 m há uma altura de carvão de 0,80m, dos quais 0,65 m são recuperáveis.

Operam na área nove companhias de mineração. A maior delas, Cia. Carbonífera Próspera é responsável por 50% da produção e pertence à Cia. Siderúrgica Nacional que também é proprietária do Lavador de Capivari S.A. Possui minas em Siderópolis e em Criciúma, estando concluído o projeto para abrir uma nova mina em Sangão.

As demais companhias que juntas produzem os

restantes 50% do carvão catarinense são:

- Cia. Carbonífera Metropolitana - opera as minas União e Metropolitana em Rio Maina;
- Cia. Brasileira de Carvão de Araranguá (CBCA) - opera três minas em Forquilha, município de Criciúma: São Simão, Poço 1 e Poço 2;
- Cia. Nacional de Mineração de Carvão Barro Branco (CNMCBB) - opera duas minas em Lauro Müller: Poço 1 e Conjunto 3 B;
- Carbonífera Catarinense: opera uma mina em Criciúma;
- Carbonífera Criciúma: opera duas minas em Criciúma - São Marcos e São Roque;
- Sociedade Carbonífera Boa Vista: operando a Mina Boa Vista em Rio Maina;
- Carbonífera Urussanga - tem duas minas em Urussanga: Santana e Rio Deserto. Esta última apresenta um carvão antracítico muito curioso;
- Carbonífera Barão do Rio Branco: pertencente à Companhia Siderúrgica de Mogi das Cruzes, opera uma mina em Içara, que fornece o que é considerado o melhor carvão brasileiro;
- Carbonífera Treviso: opera uma mina a céu aberto em Urussanga.

A mecanização das minas obriga à retirada de todo o material presente, carvão e intercalações. Assim é necessário uma pré-lavagem na boca-da-mina para eliminar o estéril. Esta pré-lavagem é feita em jigues. O carvão pré-lavado é encaminhado ao Lavador de Capivari, em Tubarão, onde sofre um beneficiamento em ciclones de meio denso, do qual resulta uma fração nobre, o carvão metalúrgico, com 18,5% de cinzas e o carvão vapor, com cerca de 35% de cinzas. O circuito atualmente instalado não aproveita os finos abaixo de 35 malhas, que estão sendo acumulados em lagoas de deposição para aproveitamento futuro (14).

1.3. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese apresenta resultados experimentais de ensaios de beneficiamento de carvão de Santa Catarina e a análise respectiva. A operação unitária escolhida foi a flotação ("froth flotation"), usual nos países de indústria mineira de carvão desenvolvida e especialmente adequada para as granulometrias inferiores a 35 malhas.

Com vistas à eliminação das cinzas, a operação consiste em flotar a matéria carbonosa e deprimir a matéria mineral. Com vistas à eliminação da pirita, temos duas opções: uma, de deprimir a pirita junto com as cinzas. Outra, de deprimir as cinzas e flotar a matéria carbonosa, sem preocupação quanto às piritas, que seriam eliminadas numa operação subsequente, através da sua flotação (com reagentes adequados) e depressão da matéria carbonosa.

Diversas variáveis afetam cada uma dessas operações: pH da polpa, quantidade de sólidos na polpa, presença de lamas ou de partículas muito grandes, quantidade de reagentes adicionais, etc. Outrossim, a qualidade do carvão em termos de sua evolução geológica ("rank") e o fato de ele deixar de estar ou estar mais ou menos oxidado também afetam o seu comportamento.

A presente tese de doutoramento procura quantificar a influência de todas estas variáveis sobre um dos tipos de carvão encontrados na camada Barro Branco, no Estado de Santa Catarina. O trabalho executado começou com a retirada de amostras de canal nas minerações em operação, procurando-se cobrir tanto quanto possível toda a área da bacia carbonífera e tentando recolher o maior número possível de incrementos. Cada um destes incrementos foi analisado e, utilizando critérios estatísticos, verificou-se a sua congruência ou incongruência com as características da jazida, determinadas também segundo métodos estatísticos. Os incrementos

incongruentes foram eliminados e a partir dos incrementos cujas características correspondem às do carvão do Alto Meta-lúrgico, compôs-se uma amostra a ser utilizada no trabalho experimental.

A partir desta amostra definiram-se dois tipos de material para estudo: os finos naturais correspondem às frações de granulometria menor presente no material conforme retirado da mina, e os finos de cominuição, gerados nas operações de manuseio ou de reduções de tamanho subsequentes. Cada um destes materiais mereceu estudo separado.

A técnica operacional para os ensaios de flotação precisou ser desenvolvida. O ensaio padrão utilizado internacionalmente não serviu ao nosso objetivo e teve que ser adaptado mediante simplificações sucessivas.

Os ensaios foram programados segundo técnicas de planejamento estatístico e levaram em conta as variáveis operacionais mais importantes. A análise dos resultados permitiu o estabelecimento de conclusões empíricas sobre a influência dessas variáveis. Fez-se também uma análise de parte dos resultados à luz de conceitos de cinética de flotação.

Desta tese consta ainda uma introdução teórica em que são discutidas as principais idéias referentes aos mecanismos de flotação e à prática da flotação de carvões.

Parece-nos evidente que um carvão inferior como o é o brasileiro exija um esforço de beneficiamento maior. Todas as tentativas de diminuir o teor de cinzas pelo beneficiamento de granulometrias menores tem esbarrado na geração de uma quantidade excessiva de finos, impossíveis de tratar nos circuitos de meio denso. Nóvoa (15) estima que se se bri

tar o carvão de Siderópolis a 1/4", 18% da massa estará em granulometria inferior a 18 malhas. A introdução de uma etapa adicional de flotação associada ao circuito de meio denso poderia solucionar o problema.

Em 1982 estaremos transpondo o limiar de uma era caracterizada pela abundância de petróleo, para uma era caracterizada pela sua escassez (16). Urgem pois todos os esforços capazes de melhorar o nosso suprimento energético. Cremos que a melhoria da qualidade do carvão brasileiro pela aplicação adequada dos processos de beneficiamento se insere nesse esforço e que o trabalho ora apresentado possa vir a ser oportuno e valioso.

2. REVISÃO DE CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo passaremos em rápida revisão sem intenção de esgotar o assunto, alguns conceitos fundamentais quando aplicáveis ao beneficiamento de carvão mineral. A idéia é apenas definir claramente o que cada termo quer significar de modo a evitar confusões no entendimento da exposição. Aproveitaremos a ocasião para fornecer uma série de informações que julgamos necessárias à boa compreensão do trabalho.

2.1. MODELO ELETROCINÉTICO DA SUPERFÍCIE DO CARVÃO

A figura 1, na sua parte superior, representa esquemática e resumidamente o modelo mais geral de distribuição de cargas elétricas numa solução na região de influência de uma partícula mineral, e no diagrama abaixo, a variação do potencial elétrico resultante dessa distribuição de cargas.

Nesta figura, I representa a superfície da partícula mineral. No esquema representamos esta superfície como carregada negativamente. A matéria carbonosa não tem cargas elétricas pois é constituída apenas por substâncias graxas de cadeia covalente. Entretanto, as impurezas que a acompanham são em maior ou menor extensão eletrólitos e apresentam cargas na superfície da partícula. Quanto mais puro for o carvão, mais ele se afastará deste modelo. À medida que aumente o seu teor em impurezas, aproximar-se-á da situação descrita.

- II representa a camada determinante de potencial: íons não solvatados fortemente adsorvidos e solidários com a superfície do mineral. Esta adsorção é química, de modo que o íon determinante de potencial pode ter qualquer sinal; no nosso exemplo estamos representando com si-

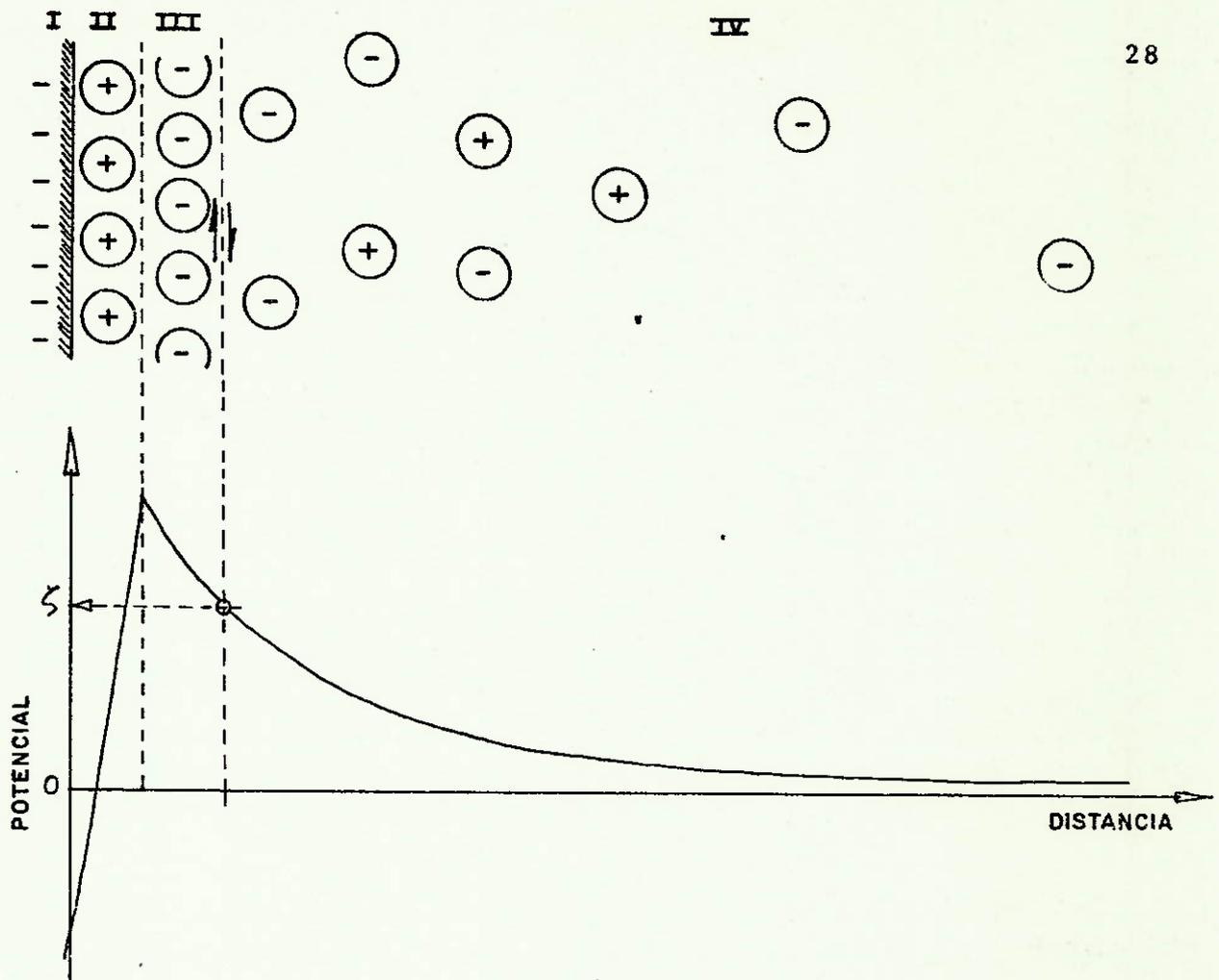


FIGURA 1: MODELO ELETROKINÉTICO DA SUPERFÍCIE DE PARTÍCULA MINERAL IMERSA EM UMA SOLUÇÃO

nal oposto ao da superfície do grão (+) para mostrar que além de alterar o valor do potencial da superfície, os íons determinantes de potencial podem até inverter o seu sinal.

- III representa a camada compacta de Stern. Tratam-se de íons adsorvidos à camada determinante de potencial e de sinal oposto ao dela (-). Esta adsorção é eletrostática e os íons já se encontram parcialmente solvatados.

- Finalmente IV representa uma camada difusa que se estende para o interior da solução, contendo íons de

cargas sucessivamente opostas e cada vez mais solvatados.

O diagrama apresentado na porção inferior da Figura 1 mostra a variação do potencial eletrostático à medida que nos afastamos da superfície da partícula de carvão. Nela o potencial é o da partícula. A partir da superfície ele é rapidamente alterado pela presença dos íons determinantes do potencial e vai decrescendo para o interior da solução, tendendo assintoticamente para o valor do potencial eletrostático desta.

Caso a partícula mineral se movimente em relação à solução, a camada determinante de potencial e a camada compacta de Stern se movem solidariamente com ela. A camada difusa tende a permanecer estática, de modo que existe um plano de cisalhamento, que na Figura 1 é mostrado em linha tracejada.

Isto tudo significa que uma partícula mineral imersa em uma solução e em movimento relativamente a ela, exibe um potencial eletrostático que não é o da sua espécie mineral, nem o da camada determinante de potencial, nem o da camada compacta, mas sim o da posição da camada difusa no plano de cisalhamento. Este potencial é denominado de potencial eletrocinético e usualmente é designado por potencial zeta (ζ).

2.2. MECANISMOS DE DEPRESSÃO E COLETA

Os carvões betuminosos constituem o exemplo clássico de substância natural flotável apenas com o auxílio de espumante, sem que se faça necessária nenhuma coleta (2, 17, 18, 19). Esta flotabilidade natural pode ser facilmente compreendida se examinarmos a estrutura química dos macerais do carvão, constituídos de hidrocarbonetos de cadeia extremamente longa e de estrutura cíclica.

Uma polpa de flotação é um sistema eletroquímico no sentido de que vários dos reagentes empregados são eletrólitos, bem como a maioria dos minerais, e estes trocam cargas com a solução até que se estabeleça um estado de equilíbrio.

Havendo íons determinantes do potencial da espécie mineral presentes na solução, existe uma concentração crítica destes de tal maneira que resulta um estado de equilíbrio com o meio e cessa de ocorrer transferência de cargas de uma fase para outra. Não há nessa situação diferença de potencial entre a superfície apresentada à fase aquosa e esta. Tal situação da interface é denominada "ponto zero de carga".

Os coletores utilizados para as espécies minerais inorgânicas tem uma porção de sua estrutura molecular que é iônica. Esta porção é atraída ou repelida para a superfície, dependendo dos sinais relativos do íon e da superfície. No ponto zero de carga não há qualquer ação eletrostática entre coletor e superfície; para qualquer outro potencial, o coletor será atraído ou repelido.

O carvão tem uma estrutura molecular covalente de modo que, teoricamente não haveria possibilidade de adsorção do coletor por forças eletrostáticas; entretanto, a presença de óleo combustível melhora sensivelmente a flotação dos carvões (2). Já que grupos polares estão totalmente ausentes tanto do mineral como do coletor, não se conhece o mecanismo de adsorção de tais coletores. O mais provável é que se trate de uma adsorção física devido a forças de Van der Waals (20) e também que ocorra o fenômeno usualmente designado por "squeezing out effect" e que consiste na expulsão das moléculas graxas, do seio da solução para a interface com outra fase com a qual tenham mais afinidade: as substâncias orgânicas dos macerais do carvão, ou, a fase gasosa do

ar.

Entretanto, na medida em que o carvão esteja oxidado ou que sua superfície esteja contaminada com outros minerais (o que é o caso de carvões de alta cinza como os nossos), aparecem grupos iônicos e a coleta passa a depender da adequação da superfície.

Neste sentido o pH da polpa exerce ação preponderante pois regula o potencial eletrocinético (20). Estudando o comportamento da superfície de carvões betuminosos e antracíticos verificou-se que o potencial eletrocinético, tanto do carvão como de todos os litotipos, é negativo em água de condutividade e que os íons hidroxônio e hidroxila aparentemente são os íons determinantes de potencial, embora não o sejam para os minerais de ganga usuais. Diminuindo o pH ocorre a adsorção de íons hidroxônio e a superfície carga-se positivamente. Os pontos zero de carga encontrados para os macerais do carvão betuminado foram: pH de 2,8 para o fusênio, 3,5 para o vitrênio, 4,2 para o durênio e 4,6 para o carvão como um todo (21,22,23).

Os reagentes polares empregados na flotação de carvões são os espumantes. Por isso apresentam atividade coletora, adsorvidos que são por seus grupos polares sobre as áreas hidrofílicas das partículas de carvão (24).

Na modulação da coleta pode-se pensar tanto em deprimir o carvão como os minerais de ganga associados. O usual entretanto é deprimir as gangas e destas, especialmente a depressão da pirita vem merecendo maior atenção devido às restrições decorrentes das necessidades da proteção ambiental. Qualquer reagente que oxide a superfície do carvão, destruindo assim sua hidrofobicidade natural deve ser considerado como um depressor em potencial. O pH também atua nesse sentido, como visto acima. Para os minerais de ganga usam

se sais minerais (2).

O estudo do efeito de íons metálicos hidrolizados sobre a depressão da pirita (21) levou à conclusão de que esta se dá pela adsorção do hidróxido do metal, coloidal, carregado positivamente, sobre a interface pirita-solução. Os gráficos, mostrados na figura 2 e construídos a partir dos dados fornecidos por esse autor, mostram a variação do potencial eletrocinético de cada uma das espécies minerais - carvão e pirita - em função do pH e da presença de diferentes quantidades de modulador de coleta (cloreto férrico).

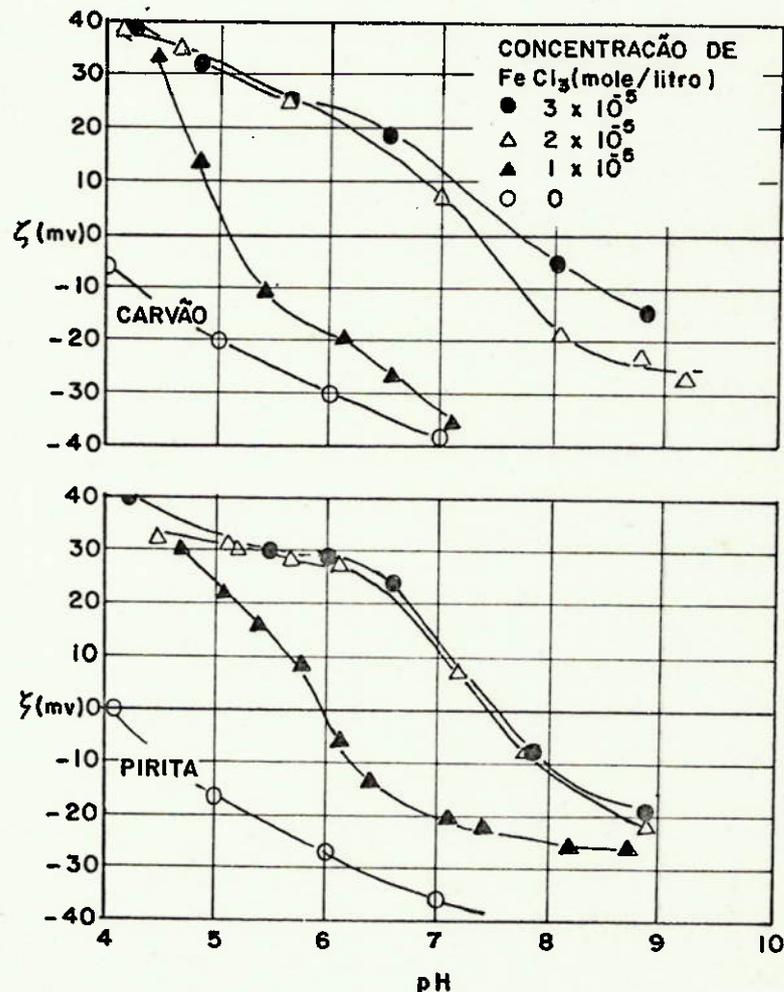


FIGURA 2: EFEITO DO pH SOBRE O POTENCIAL ELETROKINÉTICO DE CARVÃO E DE PIRITA NA PRESENÇA DE CONCENTRAÇÕES VARIÁVEIS DE CLORETO FÉRRICO.

O exame da figura 2 mostra que, para ambas as espécies minerais, à medida que aumenta a adição de cloreto férrico, aumenta o potencial eletrocinético. Para a pirita, adições de 10^{-5} moles/litro já são suficientes para inverter o sinal do potencial, em pHs inferiores a 6. Para o carvão o mesmo acontece para pHs inferiores a 5.

2.3. EFEITO DO "RANK"

"Rank" do carvão é o grau de maturação atingido ao longo de uma evolução geológica, desde o estágio inicial de turfas, até o estágio final de grafite. Esta maturação é traduzida por um enriquecimento relativo de carbono, diminuição das matérias voláteis contidas, do hidrogênio, do oxigênio e de um aumento, até um certo valor, do poder calorífico (25).

Conforme evolui o "rank" do carvão, a constituição química da vitrinita, que teria 70 a 80% dos átomos de carbono em ciclos aromáticos, evolui para uma constituição com 80 a 90% dos átomos de carbono em ciclos aromáticos nos carvões coqueificáveis, 90% nos antracitos, para por fim nos grafites todos os ciclos serem alifáticos (cadeia da grafite) (26). Com relação à exinita, o mesmo autor comenta que nos carvões pouco evoluídos, sua constituição e propriedades são bem diferentes das da vitrinita, mas à medida que a evolução geológica se faz sentir, essas diferenças se atenuam, parecendo desaparecer ao nível do "demi-gras". Já a inertinita parece evoluir menos com o "rank" como se a sua humificação tivesse sido mais apressada que a dos outros macerais desde o início do processo geológico.

Estas diferenças estruturais são descritas

(27) como:

- línhitos e carvões sub betuminosos contêm estruturas cíclicas que não são nem aromáticas nem hidroaromáticas;

- carvões betuminosos de "rank" inferior contêm grandes quantidades de estruturas hidroaromáticas;
- conforme cresce o "rank" desses carvões, aumentam as quantidades de estruturas aromáticas.

Mason descrevendo o processo de hulheificação indica que realmente a lignina, que se supões ser a substância matriz do processo pode ser decomposta prontamente dando compostos semelhantes aos encontrados no carvão; e que a celulose, que não se decompõe, pode ser convertida em compostos aromáticos se submetida às condições que se acredita existirem durante a formação do carvão (28).

Outros autores chamam a atenção para a presença de grupos hidroxila e carboxila nos carvões marrons, grupos estes que tendem a se reduzir gradualmente conforme evolua o carvão (3 e 20).

Todas estas diferenças estruturais se resumem na variação da flotabilidade dos carvões com o "rank" (2, 3, 7, 19, 29): o ângulo de contacto aumenta com o teor maf* de carbono fixo até os baixo voláteis e semi-antracíticos, passando então a diminuir até os antracíticos (2,3). A figura 3, extraída de (2) ilustra esses fatos.

É possível quantificar estas variações de flotabilidade em termos eletrocinéticos. O valor negativo do potencial zeta do vitrênio aumenta conforme diminui o "rank" (e também com o sumento do pH), como mostra a figura 4. Estas diferenças de comportamento são atribuídas a que, quanto mais baixo o "rank" do carvão, maior a quantidade de grupos funcionais contendo oxigênio (carboxila, hidroxila, carbonila e metoxila) presentes (30).

* maf = "moisture and ash free" - base seca, descontadas as cinzas

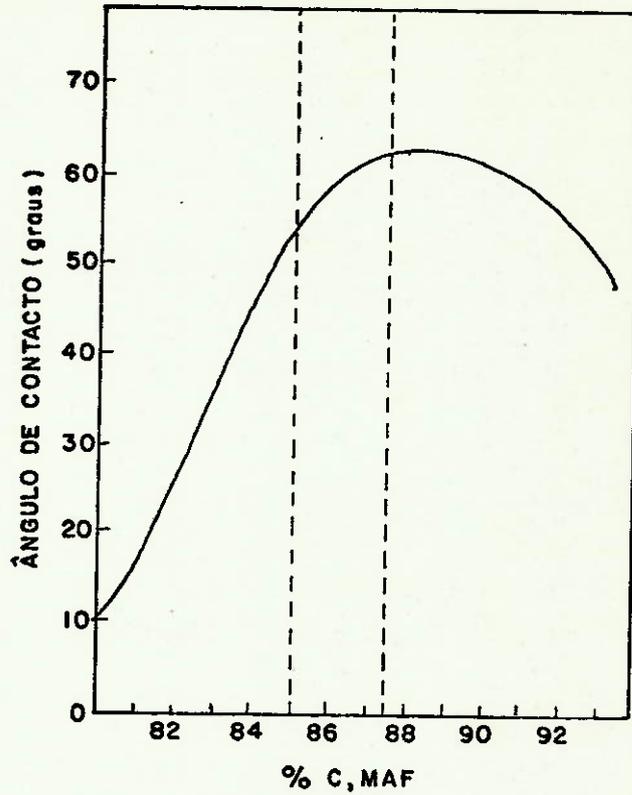


FIGURA 3: EFEITO DO "RANK" SOBRE A FLOTABILIDADE DOS CARVÕES

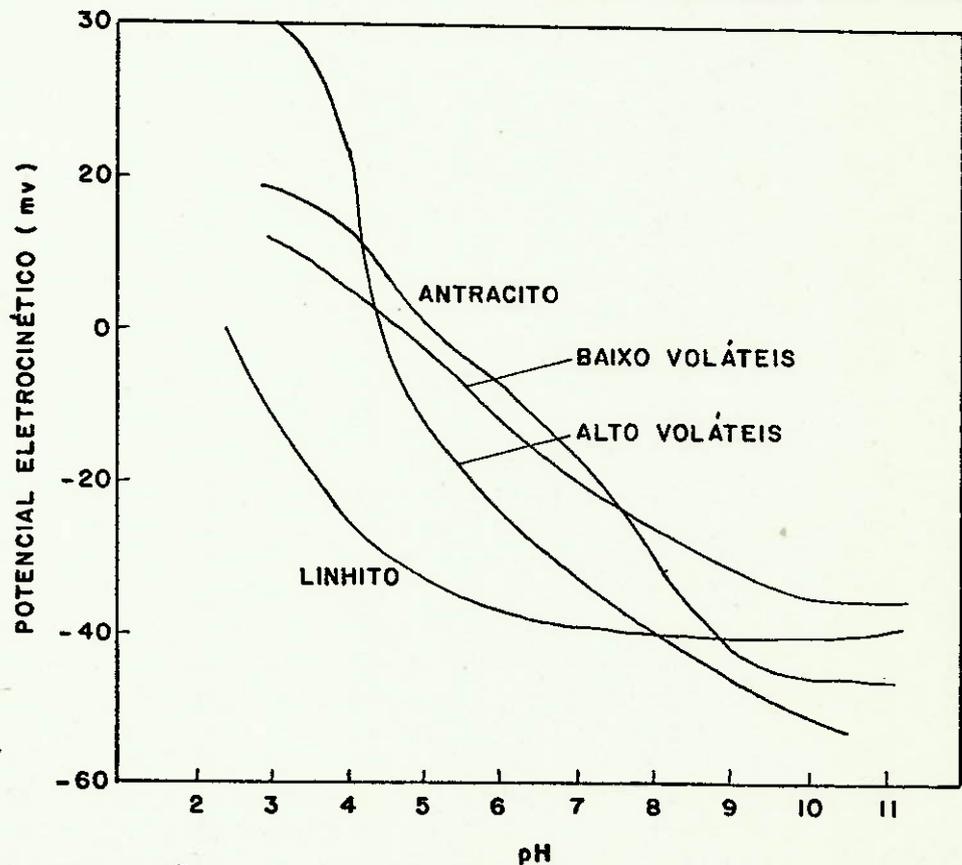


FIGURA 4: VARIAÇÃO DO POTENCIAL ELECTROCÍNÉTICO COM O pH PARA VITRÊNIO DE DIFERENTES CARVÕES

Os carvões de Santa Catarina se situam no "rank" dos Alto Voláteis (31 e 32). Os resultados apresentados apontam teores de carbono fixo, maf, de 85 a 87,5%, o que corresponde à porção quase que mais elevada da curva da figura 3, conforme aí mostrado. É de se esperar portanto excelente flotabilidade para os carvões catarinenses. Brown entretanto chama a atenção para o perigo de se generalizar esse comportamento esquematizado, prejudicado que pode ser pela presença de cinzas (3).

Queremos colocar ainda dois comentários a respeito dessas considerações todas, no que toca aos carvões brasileiros: o primeiro é de que as medidas petrográficas são feitas apenas sobre a fração mais leve do carvão. O "rank" fixado se refere portanto apenas à fração mais nobre que é uma pequena porção do total. A excessiva presença de cinzas prejudica o estudo petrográfico das demais frações. O segundo comentário repousa sobre essa mesma quantidade excessiva de cinzas, lembrando que o comportamento à flotação pode ser totalmente alterado em decorrência.

Outro comentário a ser feito é o de que todos os estudos e conclusões feitos e obtidos por autores americanos ou europeus devem ser encarados com a reserva devida ao fato de que seus carvões são diferentes dos carvões gonduânicos. Os carvões brasileiros, de modo geral tem composição petrográfica perfeitamente comparável à dos outros carvões do Gondwana, com elevado teor de inertinita (31). Estes carvões diferem dos europeus no que se refere à matéria inerte, ao tipo de micrinita e ao fato de ser frequente a impregnação de resinita na vitrinita, donde o fato de os carvões brasileiros terem teores de matérias voláteis inferiores ao que corresponderia ao seu "rank".

2.4. EFEITO DA OXIDAÇÃO

É fato perfeitamente estabelecido que a oxidação prejudica a flotação dos carvões (2, 3, 19, 20). Este efeito é tão nítido que até tem sido propostos ensaios padronizados de flotação como um dos testes para medir a oxidação de lotes de carvão (33).

Genericamente pode-se aceitar que a oxidação do carvão prejudica a sua flotabilidade pelo fato de deixar uma superfície com alto teor de cinzas e em consequência, polar(29). Esta explicação entretanto é simplista pois deixa de levar em conta a alteração dos componentes superficiais do carvão, a oxidação da pirita presente e o desprendimento dos íons das espécies minerais presentes nas cinzas, quando em solução, e que podem vir a exercer efeito depressor.

Minucioso estudo levado a cabo por Wen e Sun (30) sobre um carvão Alto Voláteis americano pode verificar que o potencial eletrocinético do vitrênio aumenta em valor negativo conforme evolui a oxidação. Isto é mostrado na figura 5, que registra medidas feitas sobre amostras oxidadas durante períodos crescentes. Puderam também verificar que o hidroxônio e a hidroxila são os íons determinantes de potencial para carvões moderadamente oxidados mas deixam de sê-lo para carvões intensamente oxidados.

Obtiveram ainda a interessantíssima correlação mostrada na figura 6 entre a flotabilidade, expressa pelo ângulo de contacto com o potencial zeta dos vitrênios dos carvões diferentemente oxidados.

2.5. CINÉTICA DA FLOTAÇÃO

Analogamente a uma reação química, pode-se estabelecer uma equação cinética para uma operação de flotação, ao se considerar como parâmetro a quantidade de material flotado.

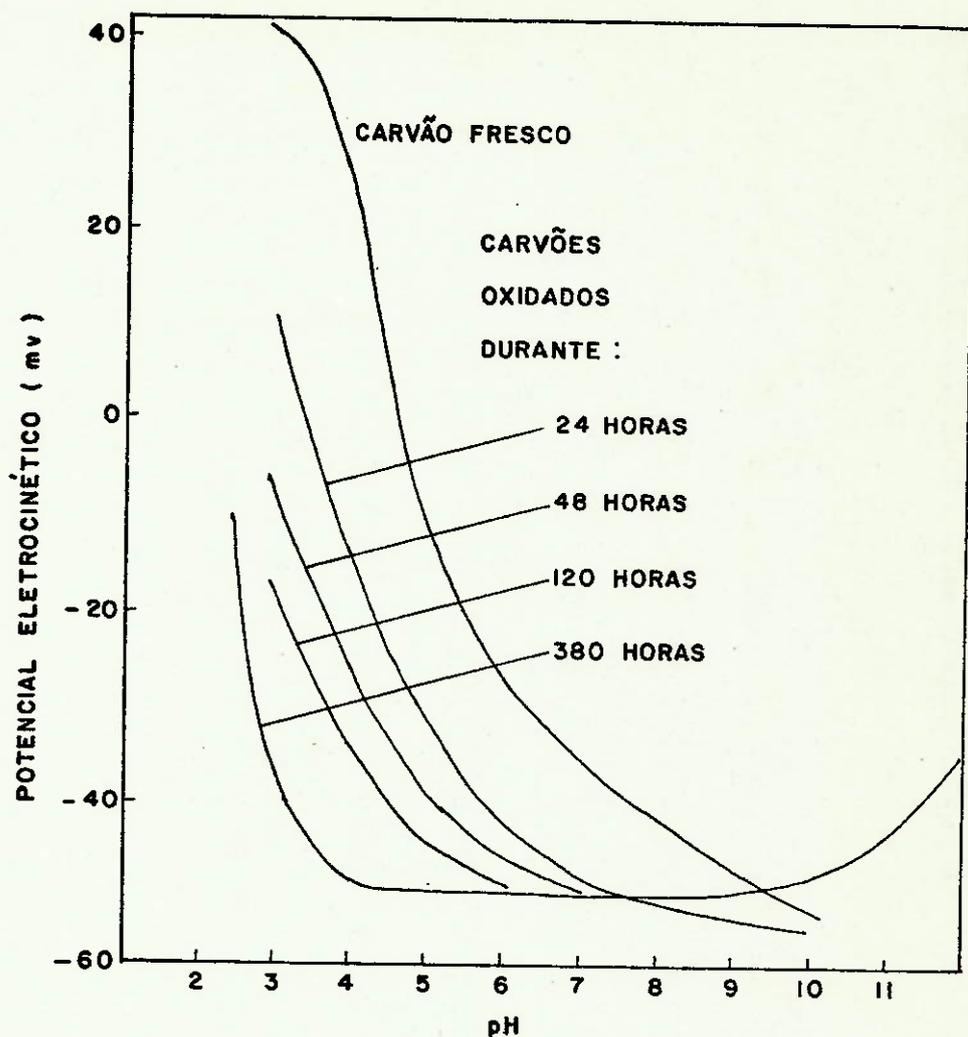


FIGURA 5: EFEITO DA OXIDAÇÃO SOBRE O POTENCIAL ELETROCINÉTICO

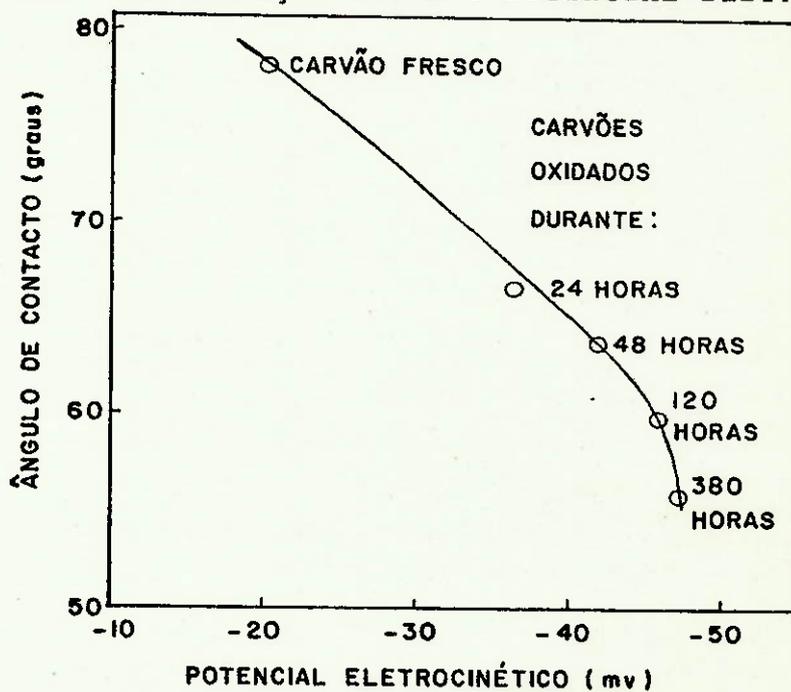


FIGURA 6: CORRELAÇÃO ENTRE ÂNGULO DE CONTACTO E POTENCIAL ELETROCINÉTICO DE CARVÕES OXIDADOS

De início flutam as partículas de carvão mais puro. À medida que evolui o processo, começam a separar partículas cada vez mais impuras. Em termos ideais, para um tempo de processamento infinito, flotaria a totalidade da massa alimentada ao sistema.

É pois vantajoso conhecer a evolução do fenômeno com o tempo, para poder interromper o processo no momento adequado, evitando a contaminação do concentrado obtido com os materiais sucessivamente cada vez mais impuros que se seguem.

O fundamento teórico desta aproximação é o de que a probabilidade de uma partícula ser separada na espuma é o produto das probabilidades de diversos eventos. A lista mais exaustiva que poderíamos traçar, baseados em (34, 35 e 36) é:

- probabilidade de adesão do coletor à partícula mineral,
- probabilidade de a partícula coletada passar pela zona agitada da célula,
- probabilidade de colisão da partícula coletada com uma bolha de ar,
- probabilidade de a partícula aderir à bolha,
- probabilidade de a partícula permanecer aderida à bolha,
- probabilidade de a bolha passar à espuma,
- probabilidade de que a partícula suporte o escumamento e passe para o concentrado.

Tudo isso ocorre num processo dinâmico. A avaliação da probabilidade resultante pode ser feita pelo sucesso ou insucesso com que as partículas são removidas, ou seja, pode ser quantificada pela velocidade de flotação. Para efeito do nosso tratamento, definiremos a velocidade de flotação como o quociente da variação da quantidade de material flotável dentro da célula pelo intervalo de tempo em que tal variação ocorreu (4).

O tratamento cinético visa definir leis para a velocidade de flotação e verificar a influência das diferentes variáveis tais como granulometria, composição petrográfica, adição de reagentes, etc., sobre ela, estabelecendo inclusive ordens de equação, de conceito análogo ao das reações químicas.

Imaizumi e Inoue em trabalho que já é clássico (35) demonstram que a flotação do carvão não obedece a um comportamento tão simples como esquematizado pelas equações cinéticas, mas que elas o representarão muito bem desde que se adote uma ordem variável ao longo da evolução do processo, ou seja desde que se admita um "espectro de k".

Tomlinson e Fleming(36) analisando o processo consideram que existem dois comportamentos diferentes, o que talvez possa explicar as diferenças no comportamento cinético verificadas na prática:

- flotação livre, que ocorreria quando as bolhas de ar estão apenas escassamente recobertas de partículas minerais: não existe carência de área da interface e as partículas minerais não precisam competir pela superfície de bolha;
- flotação inibida, que ocorreria quando as bolhas de ar estão saturadas de partículas minerais. Além da competição das partículas pela superfície da bolha, ocorre que bolhas pequenas podem ficar sobrecarregadas e não sejam capazes de flutuar. Nessas condições a capacidade de transporte das partículas para a superfície do banho dependerá principalmente da aeração e como esta é constante para condições normais de operação (característica do equipamento), resulta que a velocidade de remoção das partículas é constante, ou seja, fica caracterizada a equação cinética de primeira ordem.
- flotação transicional, correspondente a qualquer condição

entre esses dois extremos.

Estes autores chamam a atenção para o fato de que esse modelo, se bem que lógico e muito plausível é bastante idealizado e que as equações obtidas são válidas apenas se a flotabilidade das partículas permanece constante ao longo do processo. Na prática há variação de tamanhos e flotabilidade entre as partículas, de modo que a ordem da equação pode parecer mudar durante a evolução do processo.

Em termos práticos, esta conclusão parece equivaler à de Imaizumi e Inoue, de que a ordem de reação varie. De fato, estes autores postulam que três fatores controlam a eficiência da flotação:

- intensidade do campo de forças (seja de Van der Waals, seja eletrostático) entre bolha e partículas,
- duração do contacto relativo ao tempo de indução na colisão partícula-bolha,
- ângulo de contacto (flotabilidade do carvão).

Isto aceito, considerando-se que a influência relativa destes fatores variará ao longo do processo, a conclusão é a mesma que a acima descrita, de que em termos práticos resulta uma cinética aparentemente variável, seja ela resultado de uma característica intrínseca do processo, seja efeito de uma superposição de fenômenos.

Gaudin chama atenção para a peculiaridade do carvão ter um peso específico muito baixo se comparado com os demais minérios usualmente estudados. A função levitadora requerida das bolhas de ar torna-se pois muito menor que o usual, donde o processo ser aplicável a partículas consideravelmente mais grossas (19). Em consequência desse tamanho maior das partículas maiores é comum constatar-se a presença de várias bolhas presas a uma única partícula, em vez de várias partículas presas a uma única bolha (37), como descrito nos modelos estudados. Cremos pessoalmente que embora o fato

relatado seja verdadeiro, s \tilde{o} ocorre em condi \tilde{c} oes extremas, e que, nas condi \tilde{c} oes usuais de flota \tilde{c} ao de carv \tilde{o} es, e especial \tilde{m} ente, nas condi \tilde{c} oes em que foi feito o nosso trabalho experimental, n \tilde{a} o alterar \tilde{a} as conclus \tilde{o} es estabelecidas.

2.6. CONDI \tilde{C} OES PECULIARES DE OPERA \tilde{C} AO

A pr \tilde{a} tica da flota \tilde{c} ao dos carv \tilde{o} es, se compara da com a dos outros minerais, apresenta uma s \tilde{e} rie de peculiaridades que julgamos oportuno mencionar:

- usualmente a flota \tilde{c} ao \tilde{e} feita em apenas um est \tilde{a} gio; raramente se faz "cleaner" e mais raramente ainda "scavenger";
- a flota \tilde{c} ao de carv \tilde{o} o opera com granulometrias mais grossas que a dos demais min \tilde{e} rios;
- a flota \tilde{c} ao do carv \tilde{o} o opera com dilui \tilde{c} oes de polpa extremamente altas se comparadas com as usuais para outros minerais;
- o processo se d \tilde{a} melhor com grandes quantidades de bolhas de ar de pequeno di \tilde{a} metro (2 e 3);
- a necessidade e a conveni \tilde{e} ncia de condicionamento com coletores \tilde{e} assunto de grande controv \tilde{e} rsia;
- a velocidade de flota \tilde{c} ao varia com o "rank", cresce conforme melhora a aera \tilde{c} ao da polpa e \tilde{e} aproximadamente constante nas polpas dilu \tilde{i} das, caindo quando a porcentagem de s \tilde{o} lidos excede 13% (2).

Com refer \tilde{e} ncia \tilde{a} necessidade ou n \tilde{a} o do condicionamento, cremos que a diferen \tilde{c} a de opini \tilde{o} es dos diversos autores retrata a sua experi \tilde{e} ncia pessoal e as caracter \tilde{i} sticas particulares dos carv \tilde{o} es que est \tilde{a} o acostumados a tratar. Miller (38) discutindo aspectos de consumo de coletor e do tempo necess \tilde{a} rio para um condicionamento efetivo conclui que:

- pouco condicionamento de coletores oleosos resulta em dispers \tilde{a} o insuficiente do coletor na polpa e recobrimento incompleto das part \tilde{i} culas;

- condicionamento excessivo leva a uma absorção do coletor na superfície porosa do carvão e a perdas.

Nos Estados Unidos, a flotação de carvão é conduzida em diluições de 3 a 4% de sólidos. A diluição de polpas na flotação de minérios fica genericamente em torno de 20-25% de sólidos. Se considerarmos que o carvão tem densidade aproximadamente a metade dos minerais usuais, para manter a mesma percentagem de sólidos em volume deveríamos ter cerca de 12%. Aplan (2) interpreta a diluição aparentemente excessiva habitualmente praticada como decorrente de um processo histórico, em que a flotação foi introduzida como operação do circuito de clarificação da "black water", efluentes da usina de beneficiamento, que arrastam todas as partículas finas demais para poderem ser tratadas pelos métodos gravimétricos.

Outro assunto polêmico se refere aos tamanhos máximos e mínimos tratáveis por flotação. Cremos que também aqui tenha ocorrido uma tendência a generalizar aspectos característicos de cada carvão e que a verdade deva ser pesquisada em cada caso individual. O assunto é muito importante, porque a flotação é um processo caro se comparado aos métodos gravimétricos e é de se esperar dele uma performance boa o suficiente para justificar a sua aplicação, e como ressalta Gaudin (19), partículas a 200 malhas, que de um ponto de vista da indústria do carvão são extremamente finas, ainda são partículas usualmente pouco liberadas. Também deve se notar que as condições que favorecem a flotação dos grãos grossos não são as mais convenientes para a fração fina (2). Desde que as frações extremamente finas costumam trazer alto teor de argilas ou de outros minerais, a perda de seletividade nestes tamanhos pode ser desastrosa em termos de rejeição de pirita e de cinzas.

A granulometria parece influir também na ve-

locidade de flotação. Passando-se da granulometria de -30 para -200 malhas (BSS) a velocidade de flotação aumenta de duzentas vezes (2).

Com relação aos tamanhos máximos praticáveis encontramos:

- 3 mm (19);
- 3 x 6 malhas (6,7 x 3,3 mm) para carvão betuminoso de densidade 1,35; 14 x 20 malhas (1,17 x 0,83 mm) para antracito de densidade 1,54 (3).

Com referência à presença de lamas, Aplan esclarece que recobrimentos de lama não causam depressão do carvão a menos que a quantidade de lama seja excessiva (2), embora outros autores recomendem a sua eliminação tão completa quanto possível. O principal efeito prejudicial parece ser a contaminação da espuma.

2.7. REAGENTES UTILIZADOS

O carvão, sendo prontamente flotável exige apenas um pequeno "cutucão" para flotar, na expressão de Aplan (2). Assim, os reagentes utilizados devem ser os mais simples e baratos, tendo-se podido notar da bibliografia uma grande diversidade de reagentes e combinações usadas com sucesso, o que a nosso crer indica apenas o uso dos reagentes localmente disponíveis e mais abundantes.

Os coletores citados na Bibliografia são:

- nenhum (39),
- querosene (24, 40): 100 g/t (32,41),
- óleo diesel (2,42): 1,7 lb/t em média,
- óleo combustível (3,40); (43) recomenda associação com metil-isobutil-carbino, 3 lb/t; 0,5 e 2,0 lb/t (41),
- óleo de pinho (24),
- alcatrões (24) - associados ao querosene,
- xilenol, para relavagem (39),

- creosoto (3),
- amina de cadeia longa para carvões oxidados (2),

Aplan comenta que a emulsificação do óleo combustível com um espumante ou com um surfactante parece diminuir o consumo e comenta que não existe um estudo sistemático sobre o efeito do óleo usado (2) e ainda que os coletores oleosos tendem a coletar também a pirita, aumentando o teor de enxofre no concentrado. Glembotski chama a atenção para o fato de que o óleo, além de coletar, emulsifica na polpa, formando gotas minúsculas que floculam os finos dispersos (24).

Os espumantes citados foram:

- alcoois (24), indicando como mais ativos aqueles com 6 a 8 átomos de carbono no radical não-polar; alcoois amílico, e butílico, terpineol, cresóis e metil-isobutil-carbinol (41); espumantes da série Aero-froth (40),
- óleo de pinho (40,44); (42) recomenda 0,057 a 0,0907 g/t para carvão com 20 a 27% de cinzas; Aplan comenta que sua popularidade está decrescendo (2) - os tenso-ativos presentes no óleo de pinho são alcoois aromáticos complexos como o terpineol (40),
- metil-isobutil-carbinol (MIBC) (39, 42): 20 g/t (45), 0,1 a 0,5 lb/t (3), 0,1 a 0,2 lb/t (46),
- cresóis (42) e ácido cresílico (2),
- sais inorgânicos ou água do mar (2, 20, 24, 47), o que a nosso ver, por enquanto se trata de mera curiosidade,
- glicol, ácido cresílico, querosene e óleo combustível (44).

Aplan comenta que o MIBC não é adsorvido pelo carvão e em consequência não tem propriedades coletoras (2), no que diverge de Zimmerman (41). Comenta ainda que o óleo de pinho tem propriedades coletoras e que por isso o seu consumo é maior que o de MIBC pois parte é absorvida na superfície dos grãos.

Como ativadores encontramos dextrina, amido, tanino, cola, albumina e todos os colóides orgânicos (3); tanino e quebracho (40), amido e dextrina especialmente entre os hidrocolóides naturais (2).

Encontramos os seguintes depressores:

- cal para a pirita (3),
- cloretos de sódio e potássio para pirita (2,3),
- sulfatos ferroso e fêrrico para pirita (2,3),
- silicato de sódio para ganga silícica (2),
- sulfato de sódio, hidrosulfato de sódio e permanganato de potássio para pirita (2); sulfato de cobre (2);
- cloretos fêrrico, alumínico e crômico para a pirita (2);
- cal, cianeto de sódio e os produtos de oxidação da pirita (sulfatos fêrrico e ferroso), sulfito de sódio, hidrossulfito, sulfito e permanganato de potássio (2).

O estudo da ação dos cloretos fêrrico, alumínico e crômico, bem como do sulfato de cobre na depressão da pirita permitiu concluir que ela é efetiva, o cloreto fêrrico sendo o depressor mais atuante. O mecanismo de depressão é a adsorção do hidróxido do metal, coloidal e carregado positivamente sobre a superfície da pirita (2).

- Aero Depressant 633, 0,4 a 1,0 lb/t (46, 48), para deprimir a matéria carbonosa quando flotando a pirita. Este reagente é uma marca comercial fornecida pela American Cyanamid Co. e suas subsidiárias. Desenvolvido inicialmente para a depressão da ganga carbonática de minério aurífero encontra hoje ampla aplicação. Apresenta ação dispersante, o que é afirmado torná-lo interessante para materiais lamosos, e exibe ligeira tendência a espumar. É um pó marrom a cinza-escuro, ligeiramente higroscópico, solúvel em água (40).

Face a esse amplo espectro de reagentes e combinações de reagentes e mesmo de "receitas", temos que con-

cluír com Miller que: "Da considerável quantidade de trabalho feito sobre a flotação de carvões oxidados ou de "rank" inferior, é forçoso concluir que qualquer carvão, exceto possivelmente linhito e carvões sub betuminosos, pode ser flotado com reagentes e circuito adequado. A questão que fica é se é econômico fazê-lo em alguns casos" (38).

2.8. ELIMINAÇÃO DO ENXOFRE

Antes da mineração, o enxofre se apresenta no carvão, normalmente em duas formas: enxofre orgânico e enxofre pirítico. A forma de enxofre sulfático só aparece associada aos casos de intemperismo e provém da oxidação das piritas e posterior dissolução dos produtos dessa oxidação. Nos carvões já lavrados há algum tempo, portadores de quantidades consideráveis de piritas, ocorre o mesmo.

As piritas apresentam-se em formas muito diversas, podendo assumir a forma de grandes cristais isolados até a distribuição de pequenas inclusões de frações de milímetros dentro da matéria carbonosa. Schapiro e Gray estudando o enxofre contido em uma amostra de carvão Alto Voláteis de Pittsburgh verificaram que a pirita estava associada a todos os microlitotipos, exceto micrinóides. Nos exinóides era geralmente extremamente fina, frequentemente constituída de cristais unitários de dimensão inferior a 1 micron. Nos vitrinóides variou muito, em tamanho, forma e grau de disseminação. Nos semi-fusinóides e fusinóides era geralmente maior e consistia de preenchimentos secundários de vazios (49).

O enxofre orgânico não é discernível microscopicamente. Posto que essencial para o crescimento das plantas, deve se fazer presente em todas as entidades petrográficas. Análises químicas realizadas por esses autores confirmaram essa assertiva, mas demonstraram um aumento para os exinóides.

Analíticamente é possível dosar individualmente as três formas de enxofre. Entretanto, a separação do enxofre orgânico é impossível e pirritas de pequenas dimensões que não se liberam na cominuição normal se comportam como tal para efeito de beneficiamento. Como, ademais o processamento analítico é caro e demorado, no trabalho ora apresentado, optou-se por não entrar na diferenciação analítica dos tipos de enxofre.

2.8.1. Depressão da pirita

A pirita grossa, se liberada é facilmente eliminada por quaisquer métodos gravimétricos. As pirritas finas são eliminadas durante a flotação. Entretanto a pirita tem a característica de ser prontamente flotável e tender a ser coletada pelos mesmos reagentes utilizados para o carvão, o que introduz uma complicação adicional. Faz-se necessário então deprimir a pirita, o que é feito pela introdução de reagentes específicos para essa finalidade. No ítem 2.7. foram enumerados esses reagentes.

2.8.2. Flotação em duplo estágio

Esta técnica, desenvolvida recentemente pelo "Bureau of Mines" (43, 46, 50, 51, 52, 53, 54), efetua uma primeira flotação deprimindo as cinzas e tentando obter o máximo de recuperação da matéria carbonosa. Num segundo estágio deprime-se a matéria carbonosa e flota-se as pirritas. Os reagentes utilizados no primeiro estágio são os mesmos reagentes já discutidos em 2.7. Para o segundo estágio utiliza-se um xantato para coletar a pirita e algum depressor para a matéria carbonosa.

Os xantatos encontrados no comércio são os sais sódicos ou potássicos do ácido xântico (ditiocarbônico), obtidos a partir de alcoois de dois a seis átomos de carbono na cadeia. Geralmente, conforme cresce o comprimento

da cadeia o coletor torna-se mais poderoso e menos seletivo, caso do amil e hexil xantatos (40). Reagente comercial característico desta série é o amil xantato de potássio, recomendado por (46). Trata-se de um xantato de ação coletora forte e pouco seletiva (45). Aparentemente na flotação da pirita e depressão do carvão, a pouca seletividade é contornada pelo uso de um depressor eficiente.

Para o segundo estágio é necessário condicionar com xantato e o pH assume papel muito importante. O processo é extremamente rápido e o prolongamento da flotação prejudica a qualidade do concentrado. O carvão obtido (deprimido) tem diluição suficiente para permitir o seu desaguentamento por filtragem a vácuo, sem a necessidade de um espessamento intermediário (48).

Em recente trabalho do "Bureau of Mines", nove carvões americanos foram estudados comparando o desempenho do seu processo com a depressão da pirita (usando estágios "rougher" e "cleaner") e concluiu-se que se pode obter, por estes processos, eliminação de mais de 70% do enxofre pirítico presente. Concluiu-se também que do ponto de vista técnico o processo de flotação em duplo estágio é superior (55).

2.8.3. Métodos gravimétricos

Nos Estados Unidos é muito utilizada a combinação da flotação com uma operação anterior de mesagem ou de ciclonação em ciclones autógenos, como método para eliminação da pirita. Entre 65 e 325 malhas o ciclone autógeno é de longe superior à flotação para a remoção do enxofre e acima de 65 malhas, a flotação compara-se-lhe com vantagem (56).

3. AMOSTRA UTILIZADA

Neste capítulo discutimos as características do material estudado, quanto às suas propriedades físicas e químicas. Apresentamos ainda os critérios estatísticos que orientaram a coleta e a composição das amostras e os locais de onde foram retirados os incrementos.

A amostra utilizada em nossos estudos foi composta a partir de amostras de canaleta vertical colhidas em diversas minas da região do alto metalúrgico; cada um desses incrementos foi colhido separadamente. Do fundo de cada uma dessas canaletas foi tirada uma canaleta menor, que foi encaminhada à análise química. Os resultados foram tratados mediante critérios geoestatísticos e permitiram excluir da composição da amostra final as canaletas que apresentaram resultados anômalos.

A figura 7 mostra os locais na bacia de Santa Catarina onde foram colhidas as amostras e as demais minas em operação na região.

Uma jazida sedimentar do tipo das jazidas carboníferas de Santa Catarina pode - dentro do plano da Teoria da Amostragem - ser assimilada a um objeto típico de duas dimensões. Qualquer amostragem a ser executada nela tem que ser considerada como uma amostragem de pontos, face às dimensões das canaletas ou furos de sondagem em relação às dimensões da jazida. As condições de amostragem correta destas jazidas em forma de camadas superpostas são bem conhecidas e se resumem a retirar uma coluna vertical de seção constante extraíndo toda a formação mineralizada (57).

Cada amostra possível num tal universo tem associadas, entre outras, as seguintes grandezas estatísticas:

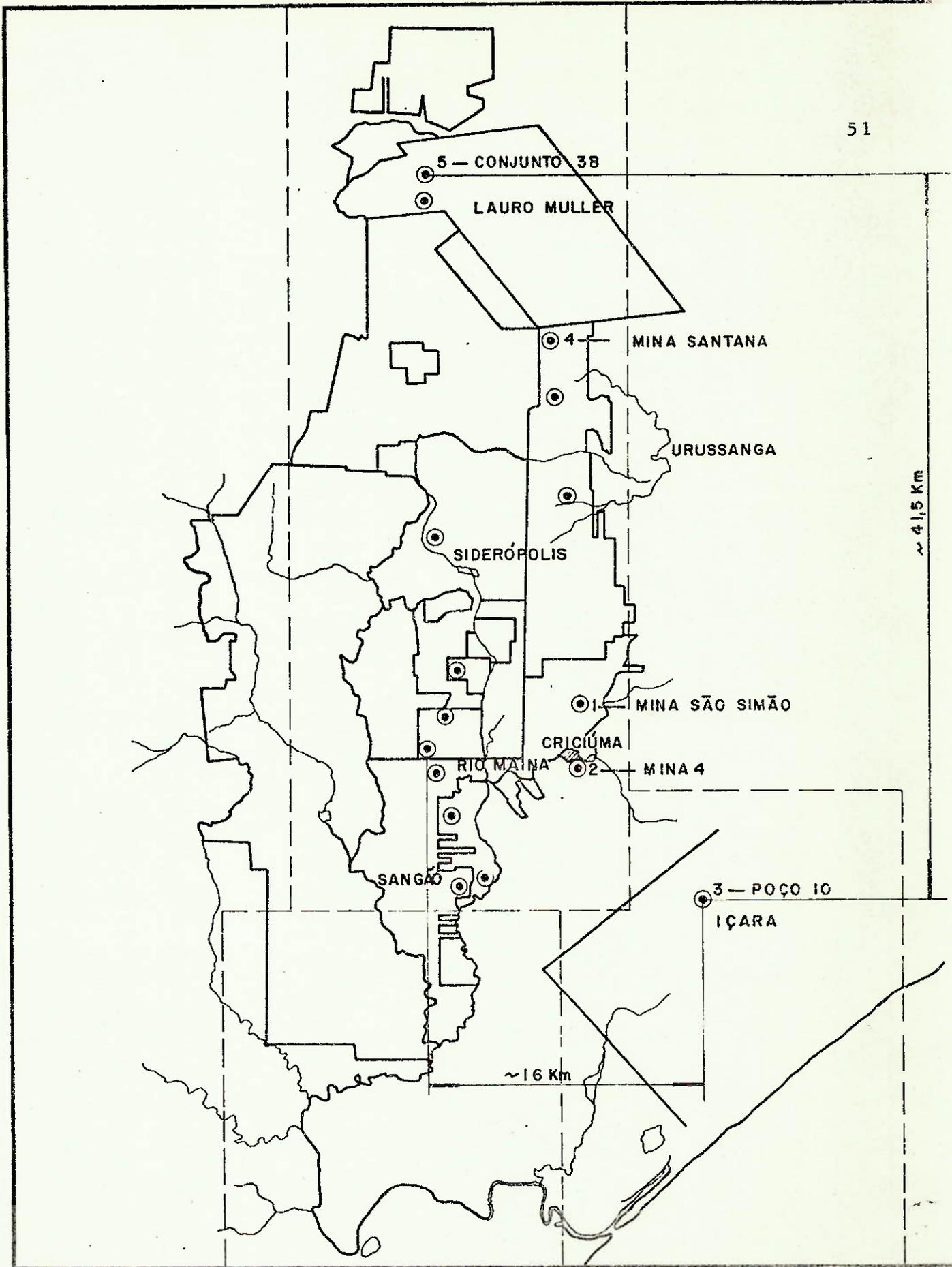


FIGURA 7 - BACIA CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA - LOCAIS DE COLETA DE AMOSTRAS

- uma certa probabilidade de representar a totalidade do jazimento, ou seja, de se afastar do valor médio do parâmetro de aferição de menos que um valor pré-fixado;
- uma probabilidade de ser tomada como representativa, sendo totalmente diversa da média (erro de primeira espécie);
- uma probabilidade de ser desprezada por errônea, sendo representativa (erro de segunda espécie).

Para minimizar o risco de ocorrência destes erros usa-se um estratagema que consiste em utilizar amostras compostas a partir de um certo número de pequenas amostras individuais (incrementos). Cada um destes incrementos tem associada uma probabilidade de erro de primeira ou segunda espécie, mas no conjunto resulta uma atenuação sensível para a amostra composta.

3.1. AMOSTRAGEM EXECUTADA

O trabalho de amostragem executada consistiu em retirar incrementos nas seguintes minas, conforme se descreve a seguir:

- a - Mina São Simão da Companhia Brasileira de Carvão de Aranguá: (posição 1 na figura 7). Foram extraídos quatro incrementos com cerca de 250 kg cada um. Um desses incrementos foi desprezado. Nesta mina o forro apresentou espessura constante em torno de 20 cm e a espessura do banco variou de 51 a 54 cm.
- b - Mina 4 da Companhia Carbonífera Próspera (posição 2 na figura 7). Foram retirados quatro incrementos, com um peso total de cerca de 1000 kg. Destes, um incremento foi desprezado. Cada canaleta correspondeu à área lavrada na ocasião da amostragem por um conjunto mecanizado. As espessuras das camadas se mostraram muito variáveis: de 50 a 75 cm para o banco e de 2 a 27 cm para o forro. A espessura da quadração variou de 86 a 96 cm.
- c - Poço 10 da Carbonífera Barão do Rio Branco (posição 3 na figura 7). Foram aproveitadas duas das três canaletas

executadas, que deram um peso inicial de 2500 kg (de início criamos que este carvão fosse diferente dos demais, razão do maior tamanho da amostra colhida nesta mina). O forro se mostrou sempre muito estreito - 4 a 7 cm de espessura. O banco variou entre 56 e 75 cm e a quadração entre 80 e 108 cm.

- d - Mina Santana da Companhia Carbonífera de Urussanga (posição 4 na figura 7). Neste local existe uma anomalia da espessura da camada, que chega aos três metros. Ademais ocorre localmente nesta mina uma camada adicional intercalada no forro e designada por "voadeira" e que tinha aqui uma espessura de 30 cm. O forro tinha um total de 76 cm, a quadração uma espessura de 100cm e o banco de 142 cm. Foram tomados três incrementos, um dos quais teve que ser desprezado.
- e - Conjunto 3 B da Companhia Nacional de Mineração de Carvão Barro Branco (posição 5 na figura 7). Foram aproveitados todos os incrementos extraídos, em número de três, perfazendo um total de 3.000 kg. As espessuras do forro ficaram em torno de 25 cm e as do banco em torno de 41-45 cm. O coringa é muito delgado.

O tamanho da amostra foi calculado pela regra do Prof. Pierre Gy (58,59):

$$M = \frac{B d^3}{s^2}, \text{ onde:}$$

- B = f.g.l.e, e,
M = massa mínima de amostra representativa (gramas),
d = dimensão (centímetros) do maior fragmento presente na amostra,
f = fator de forma = 0,5,
e = fator de composição mineralógica = 1,8,
l = fator de liberação = 1,0,
g = fator de distribuição de tamanhos = 0,25,
s = $\frac{\sigma(a)}{a}$

$a =$ teor de cinzas = 50%,
 $\sigma (a) =$ desvio padrão = 0,5%.

Assim, para partículas de tamanho máximo de 4" (cerca de 10 cm), conforme obtido da amostragem programada por nós, corresponderia uma massa mínima de:

$$M = 2.240.000 \text{ g} = 2.240 \text{ kg.}$$

Este peso mínimo foi sobejamente assegurado, como mostra a descrição da amostragem.

A colheita das amostras, por canaleta vertical, obedeceu aos mais rigorosos preceitos e foi sempre acompanhada por engenheiro e executada por técnicos da Paulo Abib Engenharia S.A.

3.2. CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA RESULTANTE

Como descrito, em cada local foram retiradas duas amostras de canaleta: uma grande, com peso variando de 250 a 1000 kg e outra pequena, de alguns quilos apenas. Esta segunda foi encaminhada imediatamente para análise química. A amostra maior foi acondicionada em sacos plásticos (dois - um dentro do outro) em atmosfera de nitrogênio para impedir a oxidação do carvão e ficaram armazenados em Criciúma. Obtidos os resultados das análises químicas e dos ensaios adicionais requeridos, fez-se o tratamento estatístico dos resultados e se definiu a composição da amostra representativa da região do Alto Metalúrgico que passaria a ser tratada. Então, cada saco foi aberto, o seu material homogeneizado em pilha alongada. Estas pilhas foram reduzidas por padejamento alternado até que cada uma das amostras tivesse o mesmo peso (aproximadamente). Aí os incrementos escolhidos foram empilhados numa pilha de homogeneização e as amostras homogeneizadas resultantes, novamente embaladas em sacos duplos de plástico, de paredes espessas, tendo-se tomado a precaução

novamente de assegurar a atmosfera de nitrogênio para prevenir a oxidação. Estes sacos foram abrigados em 45 tambores de aço de 200 l para prevenir a degradação durante o transporte desde Criciúma até São Paulo e enviados para o nosso laboratório.

A amostra assim retirada tinha a distribuição granulométrica mostrada na tabela 4. Seu teor de cinzas era de 43,25%.

TABELA 4 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL AMOSTRADO

fração	4x2"	2x1"	1x1/2"	1/2x1/4"	1/4"x6#
% retida	32,31	53,17	71,15	80,64	85,85
fração	6x28#	28x100#	100x200#	200#x0	
% retida	95,49	98,23	98,93	100,00	

O material para os ensaios de flotação com os finos naturais foi obtido pelo simples peneiramento dessa amostra na malha de nº 35 (Tyler).

O material para os ensaios de flotação com os finos de cominuição foi obtido da maneira que se passa a descrever:

- com base nos resultados da caracterização a que foi submetida a amostra inicial, decidiu-se que a maneira correta de tratar o material seria efetuar uma separação densimétrica na densidade 2,0, rejeitar os afundados e rebritar o flutuado a 1/2", de modo a obter uma liberação adicional da matéria carbonosa.
- a separação densimétrica foi feita mediante líquidos orgânicos (mistura de bromofórmio e nafta Shell). A britagem a 1/2" foi feita em britador de mandíbulas, em circuito fechado.

A distribuição granulométrica desse produto de britagem é mostrada na tabela 5:

TABELA 5 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO DE BRITAGEM A 1/2" (circuito fechado)

fração	1/2x1/4"	1/4"x6#	6x28#	28x200#	200#x0
% retida	46,48	66,19	90,12	98,78	100,00

O peneiramento deste material na malha 35 da série Tyler forneceu a alimentação dos ensaios de flotação com os finos de cominuição.

Foram feitas as análises densimétricas das frações 28x200# de ambos os materiais. Embora não seja possível correlacionar os resultados das curvas de lavabilidade com os resultados da flotação (39, 45, 50, 56), estas curvas dão um retrato bem nítido da liberação do carvão e das cinzas intrínsecas que cada fração densimétrica traz consigo. A figura 8 (linha fina) e a tabela 6 mostram a curva de lavabilidade da fração 28x200# dos finos naturais.

Esta fração corresponde a 3,44% da alimentação na amostra colhida por nós. Apresentou um teor de cinzas de 34,15% e um teor de enxofre de 5,01%. O exame da curva de lavabilidade mostra que há uma boa quantidade de matéria carbonosa praticamente liberada (flutuado em 1,4) e que esta porção está praticamente isenta de cinzas (5,1%). Mostra ainda a existência de uma boa quantidade de estéril liberado (30,86%) com 74,0% de cinzas. cremos que se trate predominantemente de carbonatos face ao elevado teor fornecido pela dosagem de matérias voláteis dessa fração (22,7%). Para se obter um material com 18,5% de cinzas é de se prever uma recuperação de 72,5% de massa ou de 89,7% em termos de matéria carbonosa.

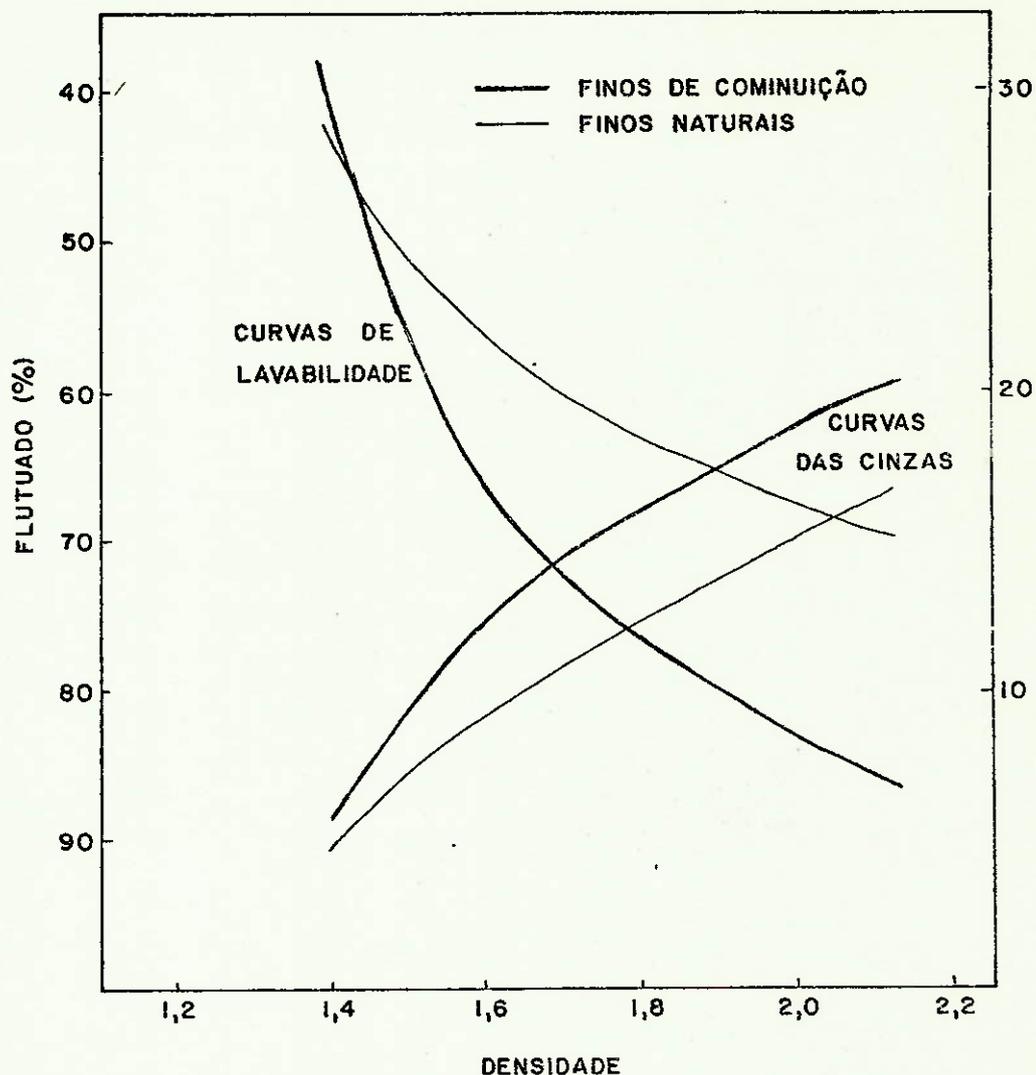


FIGURA 8 - CURVAS DE LAVABILIDADE E DAS CINZAS DOS FINOS NATURAIS E DE COMINUIÇÃO. FRAÇÃO 28x200#

A linha grossa na figura 8 e a tabela 7 mostram a curva de lavabilidade da mesma fração para os finos de cominuição. Esta fração granulométrica corresponde a 8,66% do produto de cominuição e a cerca de 5,6% da alimentação inicial. Apresenta teores de cinzas e enxofre de respectivamente, 27,27 e 3,61%, inferiores portanto aos dos finos de cominuição, o que é compreensível desde que se recorde que antes da cominuição foram retiradas todas as frações de alta densidade e alto teor de cinzas. A curva de lavabilidade mostra também boas quantidades de materiais liberados, pra

TABELA 6 - FINOS NATURAIS (28x200#) - RESULTADOS DO ENSAIO DENSIMÉTRICO E ANÁLISES QUÍMICAS
 - 3,44% DA ALIMENTAÇÃO

Densidade	%	Flutuado		Cinzas b.s. da fração %	Cinzas do flutuado acumulado		Matérias Voláteis % b.s.		S do flutuado acumulado % b.s.	F.S.I.
		%	Acumulado		%	%				
-1,40	43,16	43,16	5,1	5,10	38,3	1,09	3			
+1,40	8,36	51,52	19,3	7,40	30,2	1,19	0,5			
+1,50	8,59	60,11	31,9	10,90	26,3	1,25	1			
+1,70	9,03	69,14	52,7	16,36	21,3	1,39	0,5			
+2,10	30,86	100,00	74,0	34,15	22,7	5,01	0			

TABELA 7 - FINOS DE COMUNICAÇÃO (28x200#) - RESULTADOS DO ENSAIO DENSIMÉTRICO E ANÁLISES QUÍMICAS - 8,66% DA ALIMENTAÇÃO

-1,40	41,50	41,50	6,26	6,26	34,31	1,07	6,5
+1,40	24,76	66,26	23,05	11,97	26,08	1,12	2
+1,60	10,19	76,45	39,57	16,00	21,85	1,16	1
+1,80	6,41	82,87	53,50	19,43	17,88	1,20	1
+2,00	2,40	85,27	62,13	20,92	15,86	1,22	0,5
+2,10	14,74	100,00	67,97	30,94	20,44	3,61	0

Observação: Nesta tabela, em em todas as demais, b.s. significa "base seca".

ticamente isentos de cinzas (41,5%) ou s^o constituídos de cinzas (14,73% com 67,97% de cinzas). Aqui entretanto a curva das cinzas cresce mais abruptamente. Para um teor de 18,5% de cinzas é de se prever uma recuperação de massa de 84% ou em termos de matéria carbonosa, de 94,1%.

Nahuis estudando os carvões catarinenses classifica-os como Alto Voláteis C (betuminosos) (31).

4. TÉCNICA EXPERIMENTAL

No decorrer dos estudos preliminares verificamos que a qualidade operacional dos ensaios afetava de maneira muito grande a confiança e a reprodutibilidade dos resultados. Assim, tiveram que ser estabelecidos critérios operacionais e fixadas uma série de definições antes de se poder começar com o trabalho de investigação tecnológica propriamente dito.

De tal importância se nos afigurou a rotina operacional que desde logo estabelecemos a necessidade de os ensaios serem realizados por operador com, pelo menos, curso técnico completo e a necessidade de prevenir cuidadosamente a possibilidade de erros e controlar o erro experimental, intrínseco a trabalhos desta natureza.

No presente capítulo descrevemos as rotinas operacionais de ensaios de flotação, análises químicas e os equipamentos utilizados.

4.1. "TIMED RELEASE ANALYSIS"

Os diversos estudiosos (38, 39, 45, 56) concordam que é impossível prever a flotabilidade de um carvão a partir de suas curvas de lavabilidade. É impossível dizer que um dos processos dará um rendimento melhor que o outro pois foram encontradas variações nos dois sentidos (39), o que é compreensível dada a diferente natureza dos fenômenos envolvidos.

Assim, é desejável que se estabeleça um procedimento experimental para os ensaios de flotação, que tenha pelo menos as seguintes características:

- deve ser descontínuo e significativo mesmo com amostras de pequena dimensão,

- deve ter boa reprodutibilidade, independentemente do operador,
- o ensaio deve prover adequada remoção da espuma de modo que se possa determinar a retenção de cada partícula na célula,
- a espuma final deve conter tudo quanto seja flotável nas condições de operação mais intensas; o rejeito final deve conter apenas o material definitivamente não flotável,
- a técnica deve garantir uma relavagem ("cleaning") das espumas para garantir que o produto obtido seja o mais limpo para uma dada recuperação, e um "scavenging" dos rejeitos para garantir que o produto obtido tenha a máxima recuperação para um dado teor,
- a técnica deve ter a flexibilidade necessária para poder trabalhar com todos os tipos de carvão.

A literatura (39,45,48) e inúmeras autoridades no assunto com quem temos conversado recomendam a técnica denominada "timed release analysis", desenvolvida pelo Prof. Dell da Universidade de Leeds, Inglaterra. Esta técnica consiste em flotações por estágios com adições sucessivas de espumante, acompanhadas de intensificação das condições de operação (aumento da velocidade de rotação da célula e da injeção de ar).

A figura 9 esquematiza um ensaio: a amostra de carvão a ser ensaiada é empalpada durante 10 minutos para assegurar que toda a superfície dos grãos de carvão tenha sido molhada. Adiciona-se a primeira quantidade de espumante e flota-se durante 15 segundos, obtendo-se o flotado 1. Ao deprimir-se adiciona-se nova quantidade de espumante e flota-se por 30 segundos, com a rotação da célula aumentada e tendo aumentado a injeção de ar. Obtêm-se o flotado 2; adiciona-se nova quantidade de espumante e flota-se por mais 30 segundos, obtendo-se o flotado 3. Prossegue-se, aumentando a rotação da célula e a insuflação de ar, até obter o primeiro rejeito.

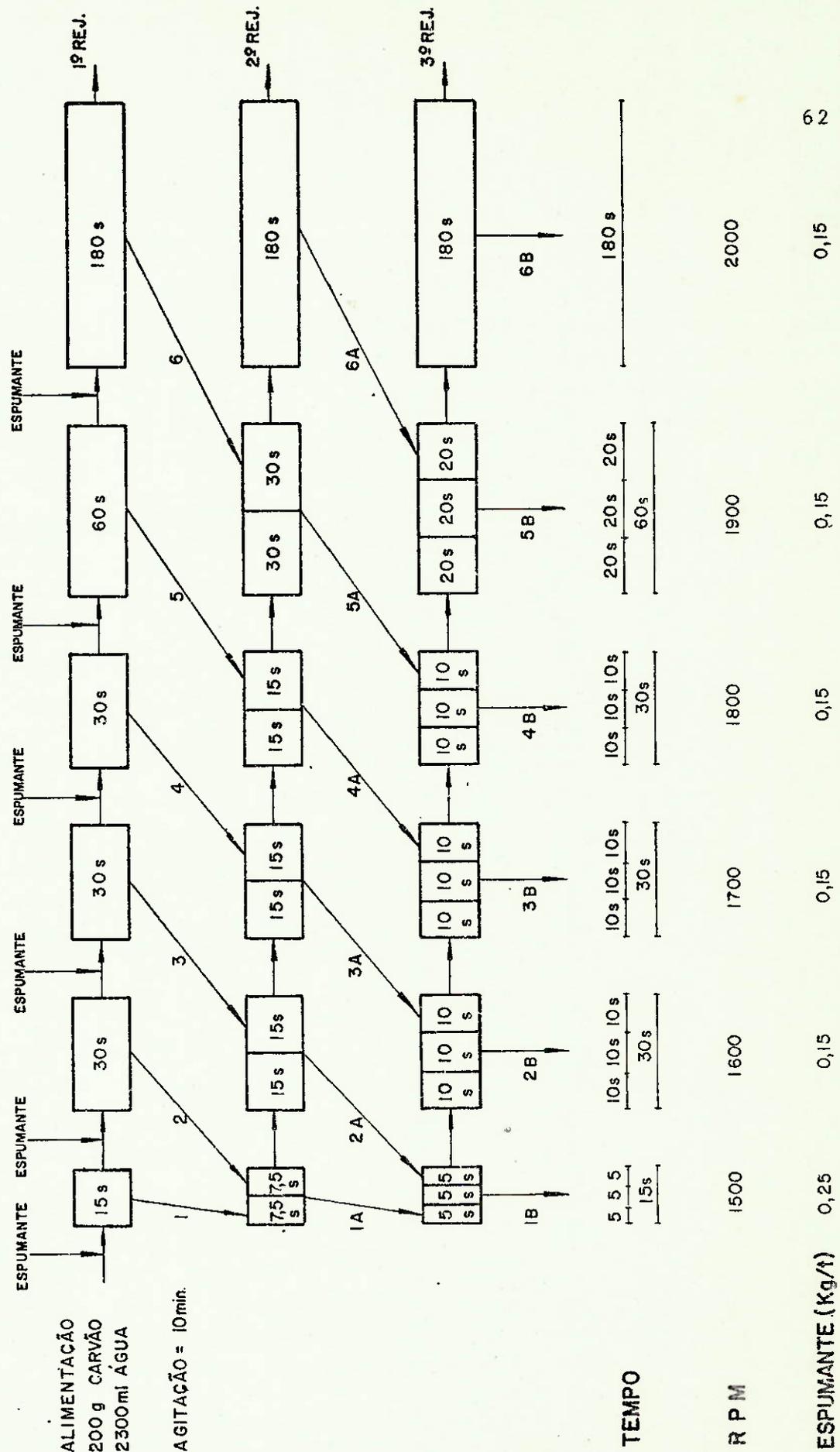


FIGURA 9 - ENSAIO DE FLOTAÇÃO PELA TÉCNICA DE "TIMED RELEASE ANALYSIS"

Os flotados são a seguir relavados duas vezes. O flotado 1 é refltado durante 7,5 segundos. Findo este tempo, adiciona-se o flotado 2 à célula e reflota-se por mais 7,5 segundos. O flotado desta operação é 1A. O deprimido é reflotado por 15 segundos em condições mais enérgicas, após o que se lhe adiciona o flotado 3 e se prossegue a operação por mais 15 segundos, obtendo-se o flotado 2A. E assim por diante.

Esta descrição é a dada por Cavallaro e Deurbrouck (39). Ela introduz uma ligeira modificação em relação ao ensaio conforme estabelecido pelo Prof. Dell, que é a seguinte: o objetivo da primeira flotação é o recolhimento de todo o carvão prontamente flotável - portanto o recolhimento da primeira espuma deveria ser feito até que ela acabasse. Os carvões americanos são tão prontamente flotáveis que teve que ser colocado um limite de tempo no recolhimento da primeira espuma (1 na figura 9).

4.2. TECNICA EXPERIMENTAL UTILIZADA

No estabelecimento da técnica experimental deveríamos, tanto quanto possível, estabelecer um processo aplicável a todos os carvões brasileiros, de modo que os resultados fossem passíveis de comparação. Isto implica em que a técnica a ser usada fosse boa tanto para carvões facilmente flotáveis como os de Santa Catarina e Paraná como para carvões difíceis como os do Rio Grande do Sul. Foram principalmente estes que obrigaram à modificação da técnica experimental.

De início havíamos decidido utilizar a técnica de "timed release analysis", em função da concordância universal sobre sua vantagem e conveniência. Note-se entretanto que a descrição do ensaio não fez menção a:

- uso de coletores para o carvão,
- uso de depressores para a matéria mineral,
- acerto do pH,

o que mostra ter sido essa técnica desenvolvida para os carvões prontamente flotáveis do Hemisfério Norte e que de imediato teriam que ser feitas modificações para atender a essas necessidades.

Ao executar os ensaios pudemos verificar que a técnica é demorada e difícil e sujeita a problemas operacionais tais como o aumento exagerado do volume de polpa em cada reiteração (perdendo-se com isso totalmente o controle da diluição, que se verificou ter importância fundamental para o caso brasileiro). A necessidade de usar coletores também influiu decisivamente, pois pode-se notar perdas desses reagentes nas paredes das vasilhas continuamente substituídas como exigência do próprio procedimento.

Concluiu-se assim pela necessidade de simplificar o método de ensaio. Após algumas tentativas chegou-se ao esquema indicado na figura 10. Neste esquema diminuiu-se o número de flotações para atender às características cinéticas verificadas, isto é, a flotação é extremamente vigorosa de início e não se conseguiu resultados reprodutivos para intervalos menores que um minuto, mas, a seguir perde vigor, de modo que duas flotações adicionais foram julgadas satisfatórias. A modificação essencial entretanto consistiu na eliminação da relavagem ("cleaning") dos flotados.

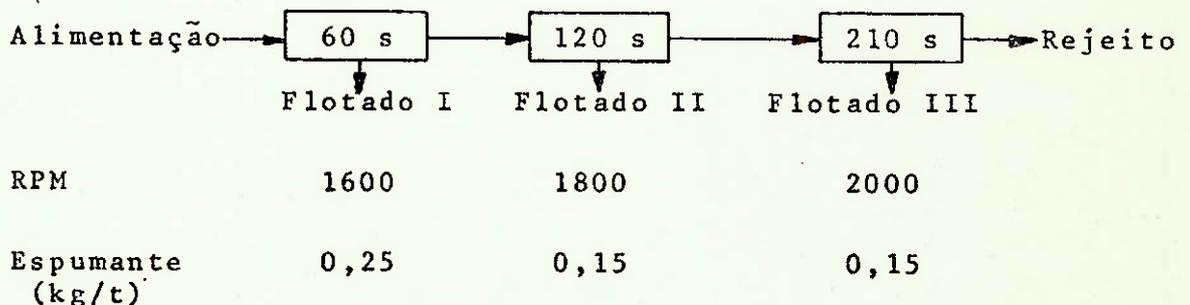


FIGURA 10 - ESQUEMA DO ENSAIO DE FLOTAÇÃO PELA TÉCNICA SIMPLIFICADA

No equipamento utilizado por nós não havia a possibilidade de se controlar a injeção de ar na célula. Essa variável não foi pois controlada, o aumento da insuflação do mesmo sendo pois meramente decorrente do aumento da rotação na célula e controlado por ela.

Os ensaios preliminares que levaram ao estabelecimento da técnica experimental a ser adotada permitiram também avaliar os efeitos de outros fatores importantes na flotação. O primeiro fato a ser estabelecido foi a necessidade de utilizar coletor para flotar os carvões mais difíceis. A granulometria máxima das amostras também foi estabelecida nesses ensaios. De início esta granulometria havia sido fixada como 28 malhas. Pode-se entretanto constatar que a fração mais grosseira do carvão sistematicamente não era flotada e passava para o rejeito. Isto foi sanado diminuindo esse limite superior para 35 malhas. Entretanto, em trabalhos executados com carvões catarinenses (60) conseguiu-se trabalhar com aquele limite superior.

Havia também o propósito inicial de se controlar o pH. Entretanto constatou-se que as polpas eram extremamente ácidas e que a correção desta acidez demandava consumos elevados de álcalis e gerava quantidades substanciais de sais. Não se conhecendo o efeito da presença desses sais sobre os resultados da flotação, decidiu-se evitar esse eventual fator de perturbação e trabalhar com o pH natural da polpa. Os trabalhos descritos por (60) encontraram resultados ótimos para o pH entre 6 e 7.

4.3. ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas necessárias no decorrer do trabalho foram análises imediatas (umidade, matérias voláteis, carbono fixo e cinzas) e dosagens de enxofre. Todas as análises foram feitas pelo laboratório químico de Paulo

Abib Engenharia S.A.

Os métodos analíticos utilizados foram:

- dosagem de enxofre: método ESCHKA, que também é o método normalizado pela ABNT, método MB 15.
- análise imediata: executada segundo a mesma norma MB 15 da ABNT.

Todos os resultados são sempre considerados em base seca.

O laboratório químico foi fiscalizado continuamente durante todo o decorrer dos trabalhos experimentais. Os controles exercidos eram de três naturezas diferentes:

- a - controle de reprodutibilidade interna dos resultados: semanalmente era sorteada uma amostra. Essa amostra era enquartada em oito alíquotas representativas que eram encaminhadas em separado e com identificações diferentes ao laboratório químico. Eventualmente as amostras eram enviadas já pulverizadas, para detetar alguma possível fonte de erro na preparação das mesmas.
- b - controle da confiabilidade dos resultados: semanalmente sorteavam-se amostras já analisadas e se as reencaminhava ao laboratório químico.
- c - controle da qualidade analítica: semanalmente eram escolhidas amostras de diferentes e variados teores de cinzas, enxofre ou matérias voláteis e enviadas a laboratórios de reputação. No nosso caso o laboratório escolhido para padrão de referência da qualidade analítica foi o do CIENTEC - Fundação para a Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul.

Os analistas estavam informados de que esse controle estava sendo feito e continuamente os resultados do controle lhes eram comunicados, tanto no caso de sucesso, co

mo no caso de se fazerem necessárias medidas corretivas.

4.4. EQUIPAMENTOS

Foi utilizado o equipamento disponível no laboratório de Paulo Abib Engenharia S.A. e que é o equipamento usual em laboratório de tratamento de minerais.

A peça mais importante é a célula de flotação tipo Fagergreen, marca Wemco. Este equipamento possui um redutor de velocidade com tacômetro incorporado e permite um controle bastante preciso sobre a rotação (desde 850 até 3000 rpm) e em consequência, sobre a admissão de ar. Ele dispõe de um jogo de cubas intercambiáveis de diferentes capacidades que permite acompanhar a variação das diluições de polpa.

O controle do pH foi feito com um pHmetro de bancada tipo E520 da Metrohm Herisau (procedência suíça) provido de eletrodo de vidro poroso tipo EX 121, da Micronal. A calibração do pHmetro era feita com soluções-tampão (Buffer) fornecidas pela Fischer.

As medidas de tempo foram feitas com um cronômetro de corda marca Heuer-Trackmaster com escala em segundos centesimais.

As pesagens foram feitas em balança eletrônica marca Mettler tipo P1000N de um só prato ("top feed balance") com precisão de décimo de grama e capacidade para 1.000 g.

O equipamento adicional necessário eram balança de maior capacidade, provetas, vasilhame, peneirador vibratório, jogo de peneiras, estufas, sacos plásticos, etiquetas, enquadador de polpa, etc.

5. PROGRAMAÇÃO DOS EXPERIMENTOS E CRITÉRIOS DE TRABALHO

À vista do exposto nos capítulos anteriores, estamos em condições de definir os objetivos visados e estabelecer os critérios e hipóteses de trabalho.

Os objetivos definidos foram os seguintes:

- obtenção de concentrado de carvão com a máxima recuperação da matéria carbonosa e mais baixo teor de cinzas. Como base para o teor de cinzas do concentrado, adotou-se o valor de 18,5%, base seca, que é o valor legal para o carvão metalúrgico,
- máxima rejeição das cinzas,
- eliminação do enxofre pirítico.

O trabalho foi esquematizado em duas etapas. Na primeira o objetivo primordial seria a flotação do carvão e depressão das cinzas. A segunda etapa visou basicamente a eliminação das piritas. Para isso partiu-se de concentrados de carvão obtidos segundo as condições mais convenientes conforme determinado na primeira etapa e tratou-se de flotar a pirita num segundo estágio.

Os experimentos da primeira etapa foram programados de modo a já ensaiar a adição de depressor da pirita, adiantando pois o trabalho da segunda etapa. Isto introduziu uma complicação adicional que foi a necessidade de se analisar o efeito que esse depressor de piritas poderia vir a ter sobre a flotação da matéria carbonosa.

Optou-se por programar os ensaios segundo métodos estatísticos. Além do rigor matemático que essa ferramenta traz para a análise dos resultados, há a vantagem de economia no número de ensaios e de os métodos estatísticos permitirem a detecção de resultados errôneos, possibilidade esta que nunca deve ser descartada num trabalho experimen-

tal. A programação levou em conta também a necessidade de se medir o efeito da interação das variáveis.

Procurou-se nunca perder de vista o fato de que o carvão tem que ser barato e procurou-se sempre evitar processos mais complicados ou que "a priori" se definissem como caros. Procurou-se sempre utilizar os reagentes mais baratos e disponíveis no mercado, procurou-se evitar etapas sucessivas de relavagem na flotação e tanto quanto possível tentou-se evitar operações adicionais de deslamagem.

Outrossim, cremos que a flotação deva sempre ser considerada como uma operação auxiliar com a qual se visa beneficiar frações finas não passíveis de beneficiamento por métodos gravimétricos. Assim não se concebeu moer carvões para levá-los a uma granulometria passível de tratamento por flotação, mas apenas a utilização de finos naturais ou gerados nas operações de cominuição definidas pelas necessidades dos processos gravimétricos.

Como é feito atualmente o beneficiamento em Santa Catarina, há uma pré-concentração na boca-da-mina, destinada principalmente a eliminar as intercalações da camada. O pré-concentrado segue para uma instalação central, o Lavador de Capivari, onde sofre o beneficiamento final. Assim, duas espécies de finos são gerados no processo: os finos que designamos por "naturais", que estão associados ao carvão "run of mine" e são separados na lavagem junto à boca-da-mina; e os finos que designamos por "de cominuição" e que são gerados no processo de redução de tamanho destinado ao beneficiamento final.

Nesta pesquisa foram estudados separadamente esses dois finos de diferente natureza, na suposição de que, a persistir o atual estado de coisas, o tratamento de cada um deles será feito individualmente.

A granulometria máxima foi fixada em 35 malhas Tyler. Não se descartaram as lamas, mas decidiu-se executar ensaios de controle para estabelecer o efeito da sua presença.

Conforme indica a bibliografia, o pH é variável essencial no controle do potencial eletrocinético e deveria ser cuidadosamente controlado. No caso brasileiro, o intenso intercrescimento de matéria mineral e matéria carbonosa fazem com que o potencial seja determinado mais pelas espécies minerais presentes na cinza que pela natureza da matéria carbonosa, o que diminui a sua importância no nosso caso específico. Outrossim, o elevado conteúdo de enxofre seja pirítico, seja orgânico e a presença de seus produtos de oxidação e hidratação torna as polpas extremamente ácidas. Para controlar o pH faz-se necessária a adição de elevadas quantidades de álcalis que implicam em custos elevados e na formação de sais que poderiam vir a prejudicar o processo. Decidiu-se pois trabalhar com as polpas no seu pH natural.

Os ensaios foram feitos usando coletor (que-rozene) e foram executados ensaios de controle sem a adição desse reagente. O espumante utilizado foi o óleo de pinho, que as experiências preliminares demonstraram recuperar mais matéria carbonosa que o metil-isobutil-carbinol. Fizeram-se ensaios de controle utilizando este álcool. Utilizou-se cloreto férrico como depressor da pirita.

Finalmente, definiu-se como programa de trabalho a investigação das seguintes variáveis:

- primeira etapa:
- adição de coletor
 - diluição de polpa
 - adição de cloreto férrico
 - efeito dos espumantes
 - efeito da presença de lamas

- segunda etapa:
- ação do cloreto férrico como depressor das piritas na flotação do carvão
 - ação do amil-xantato de potássio como coletor das piritas na flotação dupla
 - ação do Aero Depressant 633 como depressor do carvão na flotação dupla

tral do fatorial e foram feitas replicações de três deles para medida do erro experimental. A ordem de realização dos ensaios foi estabelecida mediante sorteio (inclusive as reite- rações) para prevenir uma eventual fonte de erro - alteração de alguma das condições operacionais ou fadiga do operador concomitante com a variação das condições experimentais.

Os níveis de variação estabelecidos foram os seguintes:

- coletor: 200, 600 e 1000 g/t
- depressor: 100, 350 e 750 g/t
- diluição de polpa: 6, 12 e 18% de sólidos (em peso)

O espumante utilizado foi o óleo de pinho.

A tabela 8 mostra as condições ensaiadas:

TABELA 8 - FINOS NATURAIS: EXPERIMENTO FATORIAL - CONDIÇÕES ENSAIADAS

Ensaio	Coletor g/t	Depressor g/t	Diluição % sólidos
1	200	750	18
2	1000	750	18
3	1000	750	6
4	200	750	6
5	200	100	18
6	1000	100	18
7	1000	100	6
8	200	100	6
9	600	350	12

Os resultados obtidos são exibidos na tabela 9. Os ensaios identificados pela letra "B" são aqueles repetidos para determinação do erro experimental. Dois destes en

saídos foram repetidos com material deslamado (35x200#).

TABELA 9 - FINOS NATURAIS: RESULTADOS EXPERIMENTAIS

ENSAIO	FLOTADO I CINZAS %	FLOTADO II CINZAS %	FLOTADO III CINZAS %	REJEITO CINZAS %
1	21,53	36,68	62,79	76,66
2	21,48	37,04	65,99	79,15
3	19,43	55,24	63,63	76,49
4	18,16	45,36	56,15	75,14
4-B	16,74	42,53	50,87	76,93
4-35x200#	14,17	30,43	53,98	73,64
5	19,65	38,69	60,77	76,91
5-B	19,89	31,75	61,06	76,96
5-35x200#	19,66	23,70	53,40	77,03
6	20,88	35,31	69,25	80,40
7	18,43	49,79	62,52	77,09
8	18,15	43,59	56,32	76,29
9	23,92	51,92	69,48	79,63
9-B	21,31	47,76	68,47	79,27

- Análises das Amostras de Alimentação: 35#x0 : 38,11% Cz
35x200# : 35,41% Cz

6.1.2. Efeito das variáveis

A tabela 10 mostra o tratamento dado aos resultados experimentais. As medidas tomadas durante o ensaio se resumiram aos pesos dos diferentes flotados (depois de secos) recolhidos nas condições pré-fixadas de tempo, e aos respectivos teores de cinzas; o rejeito também foi pesado e analisado. Com base nesses resultados foi feito o seguinte trabalho:

- foram recalculadas as alimentações com base no balanço das cinzas dos diferentes flotados e do rejeito.
- para cada flotado foi calculada a recuperação em massa (ZM) acumulada, o teor de cinzas (%Cz) acumulado, a recuperação da matéria carbonosa (nC) acumulada e a rejeição das cinzas ($\bar{n}Cz$) acumulada.

TABELA 10 - FINOS NATURAIS: TRATAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

ENSAIO		FLOTADO I	FLOTADO II	FLOTADO III	TOTAL	REJEITO
1	%M	63,19	70,90	76,25	100,00	23,75
	%Cz	21,53	23,18	25,96	38,00	76,66
	nC	80,19	87,85	91,05	100,00	
	n̄Cz	64,20	56,75	47,91	0,00	
2	%M	60,16	73,38	79,83	100,00	20,17
	%Cz	21,48	24,28	27,65	38,04	79,15
	nC	76,23	89,68	93,22	100,00	
	n̄Cz	66,03	53,16	41,97	0,00	
3	%M	60,89	73,99	80,79	100,00	19,21
	%Cz	19,43	25,77	28,95	38,09	76,49
	nC	79,25	88,72	92,71	100,00	
	n̄Cz	68,94	49,94	38,60	0,00	
4	%M	54,86	69,59	78,73	100,00	21,27
	%Cz	18,16	23,91	27,65	37,76	75,14
	nC	72,14	85,07	91,52	100,00	
	n̄Cz	73,62	55,94	42,35	0,00	
4-B	%M	50,05	68,43	78,06	100,00	21,94
	%Cz	16,74	23,66	27,02	37,97	76,93
	nC	66,22	83,01	90,52	100,00	
	n̄Cz	77,94	57,36	44,46	0,00	
4 35x200	%M	46,82	72,86	79,39	100,00	20,61
	%Cz	14,17	19,98	22,78	33,26	73,64
	nC	60,21	85,35	91,85	100,00	
	n̄Cz	80,05	56,23	45,63	0,00	
5	%M	58,41	70,36	77,21	100,00	22,79
	%Cz	19,65	22,88	26,25	37,79	76,91
	nC	75,44	87,22	91,53	100,00	
	n̄Cz	69,63	57,40	46,37	0,00	
5-B	%M	58,10	69,90	77,35	100,00	22,65
	%Cz	19,89	21,89	25,66	37,28	76,96
	nC	74,21	87,05	91,68	100,00	
	n̄Cz	69,00	58,96	46,76	0,00	
5 35x200	%M	52,80	73,86	79,68	100,00	20,32
	%Cz	19,66	20,81	23,19	34,13	77,03
	nC	64,40	88,79	92,92	100,00	
	n̄Cz	69,59	54,97	45,86	0,00	
6	%M	56,79	73,36	79,97	100,00	20,03
	%Cz	20,88	24,14	27,87	38,39	80,40
	nC	72,93	90,33	93,63	100,00	
	n̄Cz	69,11	53,87	41,94	0,00	

continua ...

ENSAIO		FLOTADO I	FLOTADO II	FLOTADO III	TOTAL	REJEITO
7	%M	59,88	73,90	80,52	100,00	19,48
	%Cz	18,43	24,38	27,51	37,17	77,09
	nC	77,75	88,94	92,83	100,00	
	n̄Cz	70,31	51,53	40,41	0,00	
8	%M	55,18	69,80	79,19	100,00	20,81
	%Cz	18,15	23,48	27,37	37,55	76,29
	nC	72,32	85,52	92,09	100,00	
	n̄Cz	73,33	56,36	42,28	0,00	
9	%M	66,99	75,19	79,81	100,00	20,19
	%Cz	23,02	26,17	28,67	38,97	79,63
	nC	84,50	90,96	93,27	100,00	
	n̄Cz	60,43	49,50	41,29	0,00	
9-B	%M	64,47	75,19	80,83	100,00	19,17
	%Cz	21,31	25,08	28,10	37,91	79,27
	nC	81,70	90,73	93,58	100,00	
	n̄Cz	63,76	50,26	40,09	0,00	

... continuação

Esses resultados constam da tabela 10:

- Com esses resultados foram construídas as curvas de seletividade de cada ensaio, mostradas na figura 11.
- Os ensaios foram agrupados segundo os valores da adição de coletor para permitir a análise do efeito desta variável. Os resultados constam da tabela 11 e com base neles foi construída a figura 12.
- Os ensaios foram agrupados segundo os valores da adição do depressor de pirita, para permitir a análise do efeito deste reagente. Os resultados são apresentados na tabela 12 e na figura 13.
- Os ensaios foram agrupados segundo os valores da diluição de polpa no estágio de flotação "rougher". Resultou a tabela 13 e a figura 14.
- O planejamento fatorial permitiu a aplicação de um algoritmo matemático para avaliar o efeito da interação das variáveis.
- Finalmente, foi analisado o efeito da granulometria da alimentação sobre os resultados, o que é mostrado na tabela 14 e na figura 15.

Passamos a descrever cada um desses tratamentos e a discutir as conclusões a que se pode chegar.

A figura 11 mostra nas curvas de seletividade construídas para cada um dos ensaios executados. Os algarismos arábicos junto a cada uma das curvas designam o ensaio correspondente. O exame dessa figura permite concluir que:

- o processo é muito seletivo no seu início (região dos baixos teores de cinzas). A cinética do mesmo é extremamente rápida e em consequência, decorridos os primeiros instantes de flotação, as recuperações e teores dos flotados tendem a se igualar.
- os melhores ensaios foram os de números 7 e 3. Os piores ensaios foram os de números 6, 2 e 1. Confrontando-se as condições de operação (vide tabela 8), verifica-se que ambos os melhores ensaios tinham em comum o fato de terem sido executados com uma diluição do estágio "rougher" de 6% de sólidos em peso. Verifica-se também que o único fato em comum que os piores ensaios apresentaram foi o de terem sido executados a 18% de sólidos de diluição inicial.

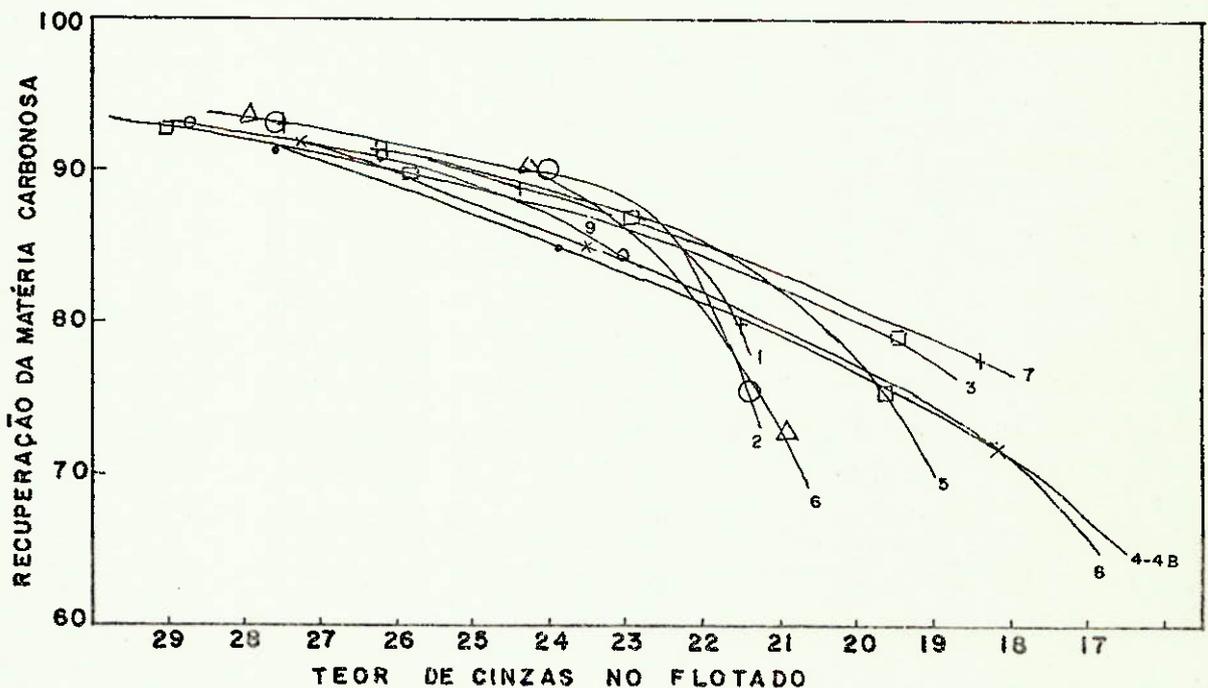


FIGURA 11 - CURVAS DE SELETIVIDADE DOS ENSAIOS EXECUTADOS COM OS FINOS NATURAIS.

Para analisar o efeito do coletor agruparam-se os ensaios de acordo com o nível de adição desse reagente. Em termos estatísticos isto equivale a abstrair o efeito das demais variáveis, o que é legítimo fazer em função do planejamento do experimento (61). O agrupamento desses resultados é verificado na tabela 11, que mostra também as médias obtidas para cada adição de coletor.

TABELA 11 - FINOS NATURAIS: AGRUPAMENTO DOS ENSAIOS SEGUNDO AS ADIÇÕES DE COLETOR E MÉDIAS DE CADA GRUPO

Adição do Coletor (g/t)	Ensaio	Flotado I		Flotado II		Flotado III		Total		Rejeito	
		% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC
200	1	21,53	80,19	23,18	87,85	25,96	91,05	38,00	76,66		
	4	17,45	69,18	23,79	84,04	27,34	91,02	37,87	76,04		
	média										
	5	19,77	74,83	22,39	87,14	25,96	91,61	37,54	76,94		
	média										
600	8	18,15	72,32	23,48	85,52	27,37	92,09	37,55	76,29		
	MÉDIA	19,23	74,13	23,21	86,14	26,66	91,44	37,74	76,47		
	9	22,17	83,10	25,63	90,85	28,39	93,43	38,44	79,45		
1000	média										
	2	21,48	76,23	24,28	89,68	27,65	93,22	38,04	79,15		
	3	19,43	79,25	25,77	88,72	28,95	92,71	38,09	76,49		
	6	20,88	72,93	24,14	90,33	27,87	93,63	38,39	80,40		
MÉDIA	7	18,43	77,75	24,38	88,94	27,51	92,83	37,17	77,09		
	MÉDIA	20,06	76,54	24,64	89,42	28,00	93,10	37,92	78,28		

Esses valores todos foram colocados em curvas de seletividade, tendo todos os pontos se alinhado sobre uma curva única, conforme mostrado na figura 12. O significado desta curva única é evidente: o nível de adição de coletor, pelo menos na faixa ensaiada (200 a 1000 g/t) não exerce efeito sobre a seletividade do processo.

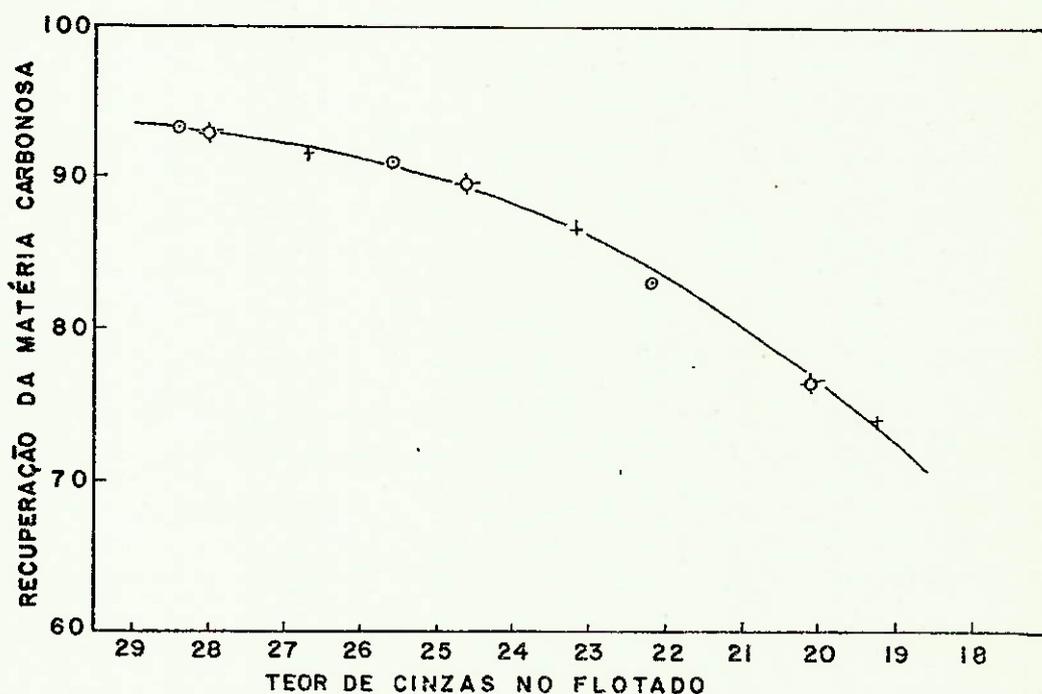


FIGURA 12 - EFEITO DO COLETOR - FINOS NATURAIS

Para analisar o efeito da adição do depressor de pirita procedeu-se a um agrupamento análogo que é mostrado na tabela 12. Os valores experimentais foram colocados em gráfico, tendo-se construído as curvas de seletividade mostradas na figura 13. Nesta figura os pontos se colocam sobre três linhas que aparentemente não se superpõem, mas que estão muito próximas. A interpretação que pode ser dada é de que o efeito da adição de depressor de pirita sobre a seletividade da flotação do carvão, se existir, é muito pequeno e só é manifesto nos primeiros instantes de flotação.

TABELA 12 - FINOS NATURAIS: AGRUPAMENTO DOS ENSAIOS SEGUNDO AS ADIÇÕES DE DEPRESSOR E MÉDIAS DE CADA GRUPO

Adição de Depressor (g/t)	Ensaio	Flotado I		Flotado II		Flotado III		Total		Rejeito	
		% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC
100	5 média	19,77	74,83	22,39	87,14	25,96	93,11	37,54	76,94		
	6	20,88	72,93	24,14	90,33	27,87	93,63	38,39	80,40		
	7	18,43	77,75	24,38	88,94	27,51	92,83	37,17	77,09		
	8	18,15	72,32	23,48	85,52	23,37	92,09	37,55	76,29		
	MÉDIA	19,31	74,46	23,60	87,98	26,18	92,54	37,66	77,68		
350	9 média	22,17	83,10	25,63	90,85	28,39	92,92	38,44	79,45		
750	1	21,53	80,19	23,18	87,85	25,95	91,05	38,00	76,66		
	2	21,48	76,23	24,28	89,68	27,65	93,22	38,04	79,15		
	3	19,43	79,25	25,77	88,72	28,95	92,71	38,09	76,49		
	4 média	17,45	69,18	23,79	84,04	27,34	91,02	37,87	76,04		
	MÉDIA	19,97	76,21	24,26	87,57	27,48	92,00	38,00	77,11		

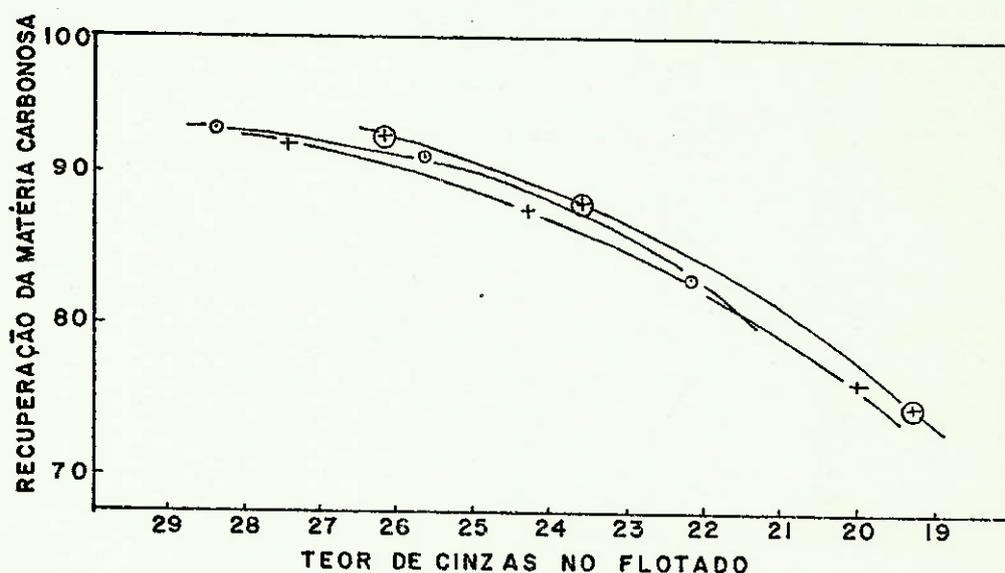


FIGURA 13 - EFEITO DO DEPRESSOR - FINOS NATURAIS

Tratamento análogo foi feito com vistas à análise do efeito da diluição de polpa no estágio "rougher" da flotação. Os resultados são apresentados na tabela 13 e na figura 14. O gráfico mostra um comportamento curioso: há evidente diferenciação dos resultados em função desta variável de controle. O efeito parece entretanto evoluir e mudar de sentido conforme decorre o tempo: no primeiro estágio de flotação os melhores resultados são obtidos com 6% de sólidos, mas no segundo estágio os melhores resultados são obtidos com 18%. Se se desprezar o segundo ponto da curva de 18% de sólidos, o gráfico fica bem mais plausível.

Examinando-se os resultados experimentais (tabela 9) pode-se constatar entretanto que com as diluições de 6% os teores de cinzas dos flotados são cerca de 3% menores que com as diluições de 18% e que as recuperações de matéria carbonosa variam no sentido inverso. Isto já havia sido notado e comentado ao analisarmos a figura 11.

Para analisar o efeito da presença de lamelas sobre a seletividade do processo foram realizados ensaios

TABELA 13 - FINOS NATURAIS: AGRUPAMENTO DOS ENSAIOS SEGUNDO AS DILUIÇÕES DE POLPA NO ESTÁGIO "ROUGHER" E MÉDIAS DE CADA GRUPO

Diluição (% sólidos)	Ensaio	Flotado I		Flotado II		Flotado III		Total		Rejeito	
		% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC
6	3	19,43	79,25	25,77	88,72	28,95	92,71	38,09		76,49	
	4	17,45	69,18	23,79	84,04	27,34	91,02	37,87		76,04	
	média										
	7	18,43	77,75	24,38	88,94	27,51	92,83	37,17		77,09	
	8	18,15	72,32	23,48	85,52	27,37	92,09	37,55		76,29	
	MÉDIA	18,37	74,63	24,36	86,81	27,79	92,16	37,67		76,48	
12	9	22,17	83,10	25,63	90,85	28,39	93,43	38,44		79,45	
	média										
18	1	21,53	80,19	23,18	87,85	25,96	91,05	38,00		76,66	
	2	21,48	76,23	24,28	89,68	27,65	93,22	38,04		79,15	
	5	19,77	74,83	22,39	87,14	25,96	93,11	37,54		76,94	
	média										
	6	20,88	72,93	24,14	90,33	27,87	93,63	38,39		80,40	
	MÉDIA	20,92	76,05	23,50	88,75	26,86	92,75	37,99		78,29	

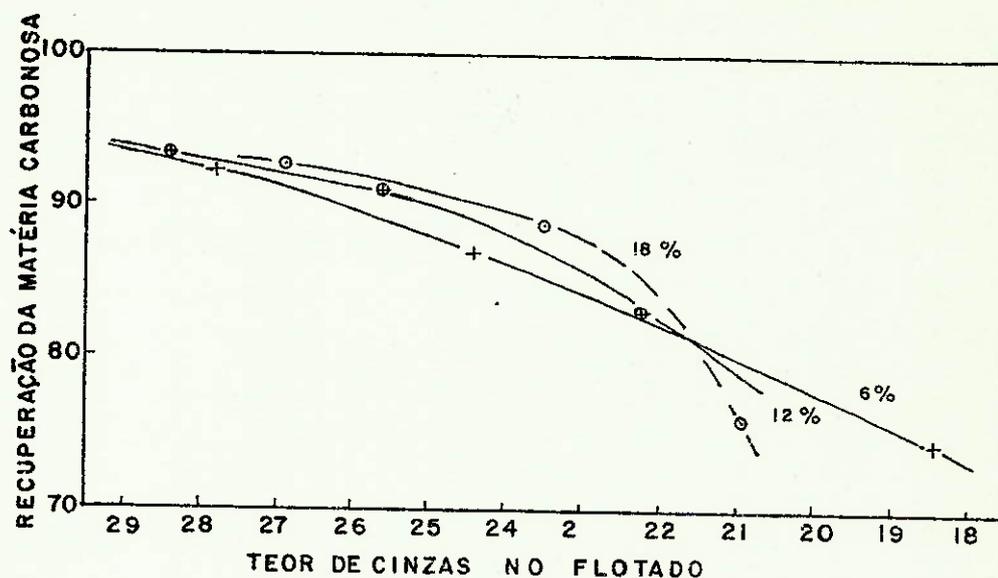


FIGURA 14 - EFEITO DA DILUIÇÃO DE POLPA - FINOS NATURAIS

repetindo as mesmas condições operacionais de alguns dos ensaios programados. Escolheram-se aqueles ensaios que foram repetidos para determinação do erro experimental, de modo a prevenir a possibilidade de estar comparando o efeito da granulometria com algum ensaio eventualmente anômalo ou errado. A reiteração e o uso das médias dos resultados ajudaria a prevenir esta possibilidade. Os resultados dos ensaios com alimentação deslamada ou sem deslamar são mostrados na tabela 14.

Do exame dos resultados do ensaio 4 verifica-se que em cada produto os teores de cinzas são mais baixos e as recuperações são mais altas para o material deslamado. Com o ensaio 5 os resultados não são tão espetaculares mas a tendência é a mesma.

O tratamento gráfico desses resultados é mostrado na figura 15. O primeiro ponto, correspondente ao Flotado I do ensaio 9, deslamado deve ser eliminado. Isto feito a conclusão é evidente, de que a eliminação das lamas favorece sensivelmente a seletividade do processo de flotação.

TABELA 14 - FINOS NATURAIS: QUADRO COMPARATIVO DOS ENSAIOS CONDUZIDOS COM MATERIAL A 35# x0 E A 35x200#

ENSAIO		FLOTADO I	FLOTADO II	FLOTADO III	REJEITO
4 Média	%M _f	52,45	69,01	78,39	21,61
	%C _{zr}	17,45	23,78	27,33	76,03
	nC	69,18	84,04	91,02	
	nCz	75,78	56,65	43,38	
4 35x200	%M _f	46,82	72,86	79,39	20,61
	%C _{zi}	14,17	19,98	22,78	73,64
	nC	60,21	85,35	91,85	
	nCz	80,05	56,23	45,63	
5 Média	%M _f	58,25	70,13	77,28	22,72
	%C _{zi}	19,77	22,38	25,95	76,93
	nC	74,82	87,13	91,60	
	nCz	69,31	58,18	46,56	
5 35x200	%M _f	52,80	73,86	79,68	20,32
	%C _{zi}	19,66	20,81	23,19	77,03
	nC	64,40	83,79	92,92	
	nCz	69,59	51,97	45,36	

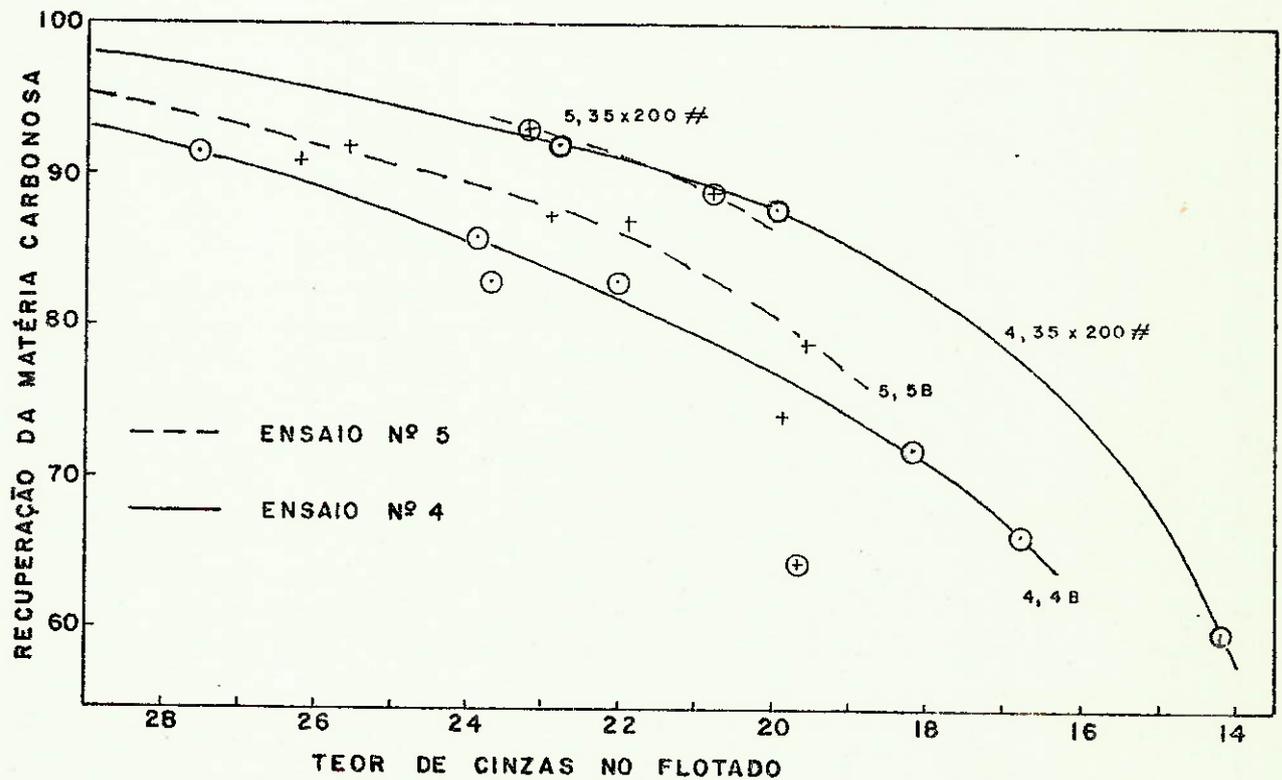


FIGURA 15 - EFEITO DA GRANULOMETRIA DA ALIMENTAÇÃO - FINOS NATURAIS

O planejamento fatorial executado pode ser representado como mostra a figura 16, como um cubo cujos v̄rtices representassem cada uma das condiçõs de ensaio. Este cubo estaria orientado, segundo um sistema de coordenadas cartesianas com origem no centro do cubo. Os eixos representam as variáveis de controle (a = % de sólidos, b = adição de depressor e c = adição de coletor). O comprimento de cada aresta do cubo é de duas unidades de comprimento, de modo que as ordenadas e abcissas serão sempre ou -1 ou +1, conforme se considere o valor mais baixo ou mais alto da variável. Consideraremos como ação/interação o evento de uma ou mais variáveis apresentarem seus valores mais elevados num mesmo experimento. Isto posto, a configuração do experimento pode ser resumida como mostra a tabela 15.

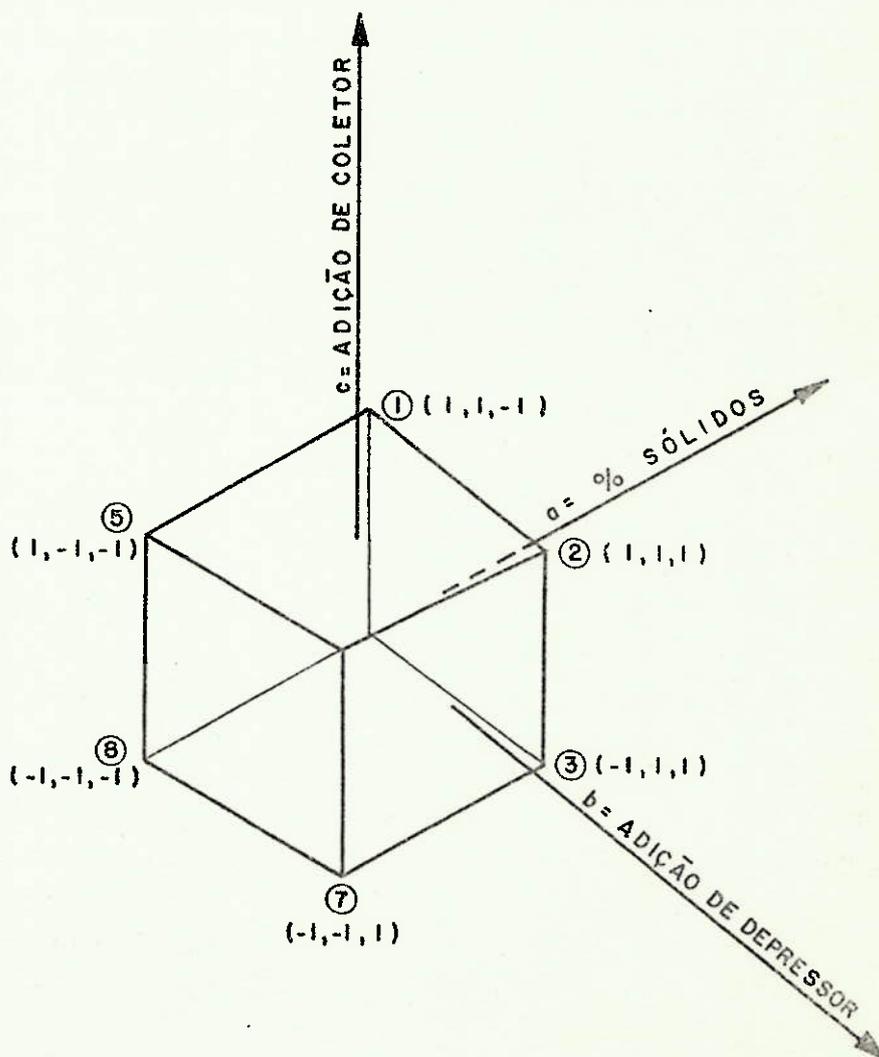


FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DO PLANEJAMENTO EXECUTADO

TABELA 15 - CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO FATORIAL

Ensaio	condições experimentais				interação
	% sólidos	depressor	coletor		
1	+1	+1	-1		ab
2	+1	+1	+1		abc
3	-1	+1	+1		bc
4	-1	+1	-1		b
5	+1	-1	-1		a
6	+1	-1	+1		ac
7	-1	-1	+1		c
8	-1	-1	-1		-
9	0	0	0		0

A análise estatística do efeito das variáveis e suas interações foi feita em computador (HP 9830 A). Os resultados são apresentados na tabela 16, da qual foram desprezados os valores inferiores a 10^{-3} . Para efeito de comparação foi decidido só considerar as ações de valor superior, em módulo, ao da interação periférica. Isto posto, o tratamento matemático confirma que a variável mais significativa com relação ao teor de cinzas, no início da flotação, é a porcentagem de sólidos, (a). A variável adição de coletor, (c), só começa a mostrar efeito à medida que o tempo decorre (flotado II e III). A variável (b) - adição de depressor - não é significativa nunca. As interações entre as variáveis mostraram-se na maioria das vezes desprezíveis, menores mesmo que as ações das variáveis.

Cabe aqui fazer um comentário que consideramos extremamente importante com referência ao significado da diluição na flotação. Sendo o ensaio descontínuo, é impossível controlar a diluição uma vez começado o ensaio, se se quer trabalhar a nível constante na célula. Com este carvão especialmente, o aumento da diluição é muito grande, pois no primeiro minuto são removidos cerca de 60% da massa

original, o que quer dizer que a porcentagem de sólidos dentro da célula cai para menos que a metade do valor inicial. Só há pois controle da diluição no Flotado I e as conclusões acima descritas só podem se aplicar a este material.

TABELA 16 - FINOS NATURAIS: AÇÕES E INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE

		INTERAÇÕES							peri- férico	
AÇÕES		a	b	c	ab	ac	bc	abc	total	
Flotado I	%M	0,025	0,016	0,022	0,025	-0,044	0,005	-0,013	-0,027	-0,074
	%Cz	0,025	despr	-0,025						
	nC	0,014	0,017	0,024	0,026	-0,053	despr	-0,017	-0,038	-0,078
	̄nCz	-0,049	-0,018	-0,020	-0,023	-0,029	despr	0,015	0,016	0,075
Flotado II	%M	-0,007	-0,007	0,010	0,014	-0,012	0,027	despr	0,028	0,024
	%Cz	-0,008	0,007	0,014	-0,002	despr	-0,001	-0,004	-0,005	-0,017
	nCz	0,019	-0,004	0,003	-0,004	-0,008	despr	-0,006	-0,010	-0,031
	̄nCz	0,019	-0,009	-0,049	-0,002	-0,009	-0,003	-0,006	0,011	0,045
Flotado III	%M	-0,014	-0,004	0,025	-0,002	-0,006	-0,005	despr	-0,009	-0,013
	%Cz	-0,009	-0,003	0,013	-0,004	-0,005	-0,003	-0,004	despr	-0,009
	nC	-0,002	-0,006	0,017	despr	0,004	0,003	-0,002	-0,006	-0,011
	̄nCz	0,034	0,002	-0,043	0,005	-0,010	-0,011	-0,004	-0,011	0,022

6.1.3. Flotação sem adição de coletor

Para estudar a flotabilidade espontânea deste material foram programados ensaios em que não se adicionou coletor e um ensaio com coletor para efeito de comparação. Dado que nestas condições o efeito do espumante assume controle total do processo, decidimos estudar os dois espumantes usuais, Metil-isobutil-carbinol (MIBC) e óleo de pinho. As condições ensaiadas são mostradas na tabela 17. Os resultados experimentais são mostrados na tabela 18 e o tratamento desses resultados, na tabela 19.

TABELA 17 - FINOS NATURAIS: CONDIÇÕES DE ENSAIO

Ensaio	Espumante	Coletor (g/t)
A	Óleo de Pinho	0
B	M.I.B.C.	0
C	Óleo de Pinho	200

Em todos os ensaios se utilizou material sem deslamar (35 malhas x 0), não se adicionou depressor de pirita e fixou-se a diluição de polpa inicial em 6%. No ensaio C relavou-se os concentrados: foi feita uma flotação "rougher" durante 90 segundos. Ao rejeito foi adicionado mais espumante e fez-se uma flotação "scavenger". O concentrado "rougher" foi relavado, dando o Flotado I-A. O rejeito deste "cleaner" foi juntado ao flotado "scavenger" e flotados durante 60 segundos, resultando um Flotado I-B e um Rejeito B. O rejeito inicial do estágio "scavenger" foi designado por rejeito A.

Estes resultados demonstram que:

- é perfeitamente possível flotar este material sem o auxílio de coletor,
- o efeito do coletor é de aumentar a recuperação da matéria carbonosa,

TABELA 18 - FINOS NATURAIS: RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Ensaio	TEORES DE CINZAS (%)			
	Flotado I	Flotado II	Flotado III	Rejeito
A	18,51	31,41	46,32	77,30
B	15,56	21,33	37,01	69,88
	Flotado I-A	Flotado I-B	Rejeito A	Rejeito B
C	17,52	35,31	69,96	57,46

TABELA 19 - FINOS NATURAIS - TRATAMENTO DOS RESULTADOS - EN-
SAIOS SEM ADIÇÃO DE COLETOR

ENSAIO		FLOTADO I	FLOTADO II	FLOTADO III	REJEITO
A	%N _i	41,78	65,92	78,04	21,96
	%Cz _i	18,51	23,23	26,82	77,30
	nC	54,83	81,50	91,97	
	n̄Cz	79,59	59,59	44,77	
B	%N _i	18,92	54,44	71,23	28,77
	%Cz _i	15,56	19,33	23,49	69,88
	nC	25,29	69,52	86,28	
	n̄Cz	92,01	71,43	54,57	
		FLOTADO I-A	FLOTADO II-A	REJEITO-A	REJEITO-B
C	%N _i	50,87	66,67	%M 25,97	7,36
	%Cz _i	17,52	22,42	%Cz 69,96	57,46
	nC	67,80	83,57		
	n̄Cz	76,61	60,78		

- o óleo de pinho apresenta efeitos mais enérgicos que o MIBC, o que é evidenciado pela elevada recuperação de massa do Flotado I. A ação do MIBC é a mais seletiva, o que se evidencia pelos teores do Flotado I e II do ensaio B, quando comparados com os demais.
- a flotação utilizando óleo de pinho é extremamente rápida; o teor de cinzas do segundo flotado já é da mesma ordem da alimentação; o ensaio A, usando exclusivamente óleo de pinho foi o que deu o rejeito com teor de cinzas mais elevado.

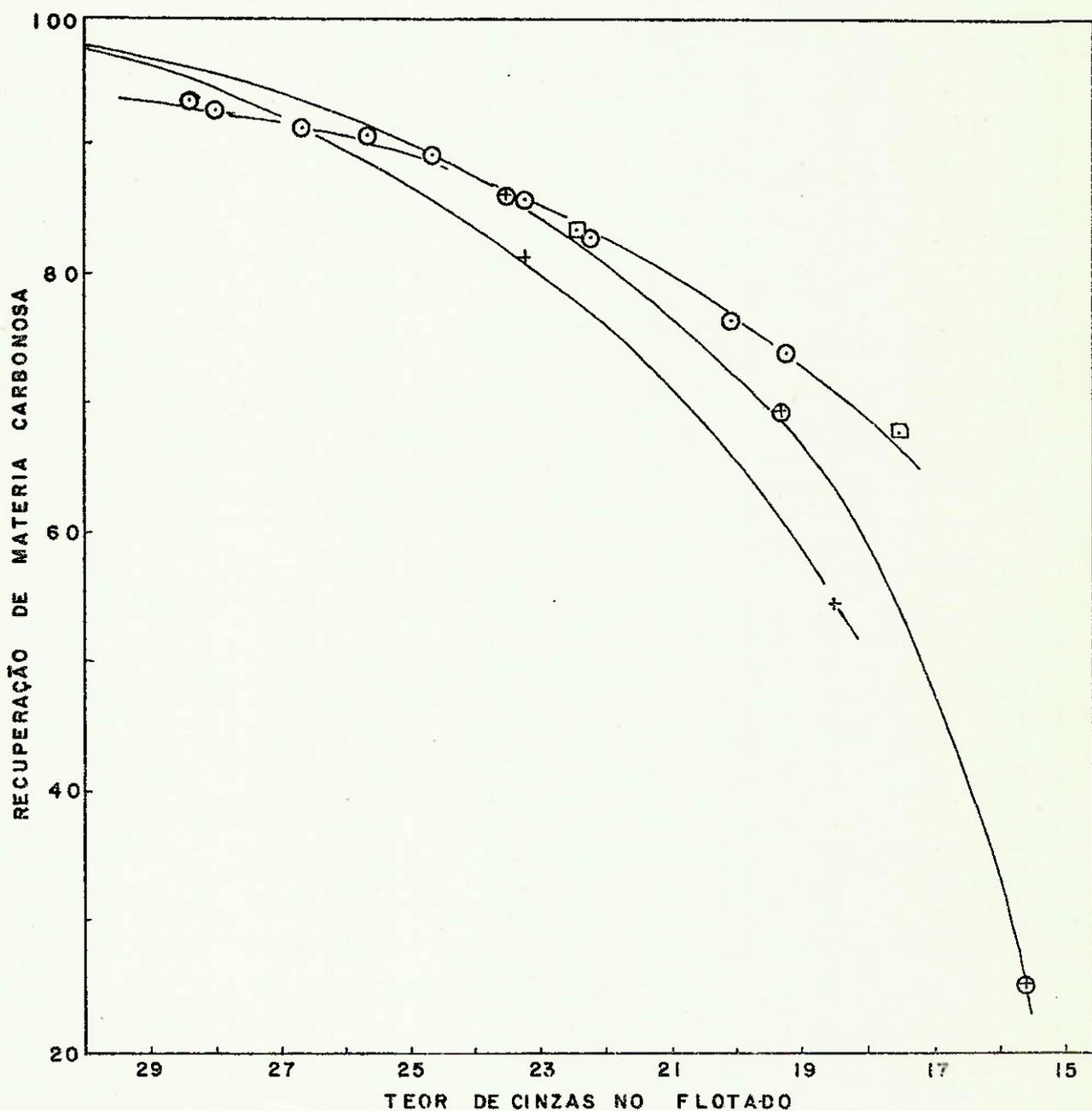


FIGURA 17 - CURVAS DE SELETIVIDADE - EFEITO DO COLETOR E DO ESPUMANTE (FINOS NATURAIS)

- pH da polpa: 5,4 a 5,8.

Com relação às características dos finos naturais, apresentadas no item 6.1., é de se notar que os teo

res de cinzas são mais baixos e que novamente aqui a fração 200# x0 é responsável pela maior contribuição de cinzas. O fato de o pH da polpa ser menos ácido neste caso pode ser interpretado como a separação em meio denso executada ter rejeitado boa porção da pirita liberada.

6.2.1. Experimento executado

O procedimento experimental foi em tudo idêntico ao executado com os finos naturais e descrito no item 6.1.1. A única alteração efetuada foi de mudar os níveis de adição do depressor da pirita para 0,350 e 750 g/t. A programação dos ensaios passou pois a ser a mostrada na tabela 20.

TABELA 20 - FINOS DE COMINUIÇÃO: EXPERIMENTO FATORIAL - CONDIÇÕES ENSAIADAS

Ensaio	Coletor g/t	Depressor g/t	Diluição % sólidos
1	200	750	18
2	1000	750	18
3	1000	750	6
4	200	750	6
5	200	0	18
6	1000	0	18
7	1000	0	6
8	200	0	6
9	600	350	12

Os resultados dos ensaios constam da tabela 21. Não se fizeram aqui replicações porque o erro experimental já fora determinado no experimento anterior e ter sido verificado estar ele dentro da faixa aceitável para experimentos desta natureza. Repetiram-se apenas os ensaios destinados a verificar o efeito da presença das lammas.

TABELA 21 - FINOS DE COMINUIÇÃO: RESULTADOS EXPERIMENTAIS

ENSAIO	FLOTADO I % Cz	FLOTADO II % Cz	FLOTADO III % Cz	REJEITO % Cz
1	19,29	45,40	64,65	70,09
2	18,88	32,38	64,62	71,89
3	15,12	37,83	65,96	74,64
4	14,26	43,18	59,02	70,14
5	19,86	34,10	62,58	69,67
5 35 x 200	21,02	29,09	59,60	69,91
6	17,14	31,00	62,90	70,53
7	14,72	33,22	64,38	71,56
7 35 x 200	14,43	25,71	55,60	72,46
8	16,11	44,55	58,19	69,12
9	20,21	42,27	65,11	74,45

- Análises das Amostras na Alimentação: 35#x0 : 29,22% Cz
35 x200#: 27,85% Cz

6.2.2. Efeito das variáveis

Os resultados experimentais sofreram o mesmo tratamento dado aos finos naturais e descrito no item 6.1.2. A tabela 22 mostra o tratamento desses resultados. Passaremos agora a descrever a sua análise e as conclusões a que se pode chegar.

As curvas de seletividade são mostradas na figura 18. Nota-se que:

- as diferenças de comportamento são maiores com os finos de cominuição que com os finos naturais
- o processo também aqui é extremamente rápido: só há diferenciação no primeiro flotado e com o decorrer do tempo tende a flotar tudo.
- as diferenças de cinética são mais acentuadas neste caso

TABELA 22 - FINOS DE COMINUIÇÃO: TRATAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

ENSAIO		FLOTADO I	FLOTADO II	FLOTADO III	TOTAL	REJEITO
1	% M	74,18	89,14	92,26	100,00	7,74
	% Cz	19,29	23,67	25,05	28,54	70,09
	nC	83,78	95,22	96,76	100,00	
	nCz	49,86	26,07	19,03	0,00	
2	% M	55,65	89,94	93,39	100,00	6,61
	% Cz	18,88	24,03	25,53	28,59	71,89
	nC	63,21	95,69	97,40	100,00	
	nCz	63,25	24,40	16,60	0,00	
3	% M	53,53	91,59	94,30	100,00	5,70
	% Cz	15,12	24,56	25,74	28,53	74,64
	nc	63,57	96,68	97,98	100,00	
	nCz	71,63	21,15	14,92	0,00	
4	% M	59,94	86,81	91,11	100,00	8,89
	% Cz	14,26	23,21	24,90	28,92	70,14
	nC	72,30	93,79	96,26	100,00	
	nCz	70,45	30,33	21,56	0,00	
5	% M	63,80	88,50	91,96	100,00	8,04
	% Cz	19,86	23,83	25,29	28,26	69,67
	nC	71,87	94,76	96,58	100,00	
	nCz	56,10	26,93	19,41	0,00	
5 35x200	% M	71,07	90,17	92,82	100,00	7,18
	% Cz	21,02	22,73	23,78	27,09	69,91
	nC	76,98	95,56	97,03	100,00	
	nCz	44,86	24,34	18,52	0,00	
6	% M	49,48	89,39	93,11	100,00	6,89
	% Cz	17,14	23,33	24,91	28,05	70,53
	nC	56,98	95,25	97,17	100,00	
	nCz	69,77	25,66	17,31	0,00	
7	% M	44,87	90,03	92,71	100,00	7,29
	% Cz	14,72	24,00	25,17	28,55	71,56
	nC	53,55	95,76	97,10	100,00	
	nCz	76,87	24,32	18,26	0,00	
7 35x200	% M	48,65	80,22	89,79	100,00	10,21
	% Cz	14,43	18,87	22,78	27,85	72,46
	nC	57,70	90,21	96,09	100,00	
	nCz	74,79	45,65	26,56	0,00	
8	% M	66,22	87,43	91,55	100,00	8,45
	% Cz	16,11	23,00	24,59	28,35	69,12
	nC	77,53	93,96	96,36	100,00	
	nCz	62,37	29,07	20,59	0,00	
9	% M	72,36	90,72	93,19	100,00	6,81
	% Cz	20,21	24,67	25,74	29,06	74,45
	nC	81,39	96,33	97,55	100,00	
	nCz	49,68	22,99	17,46	0,00	

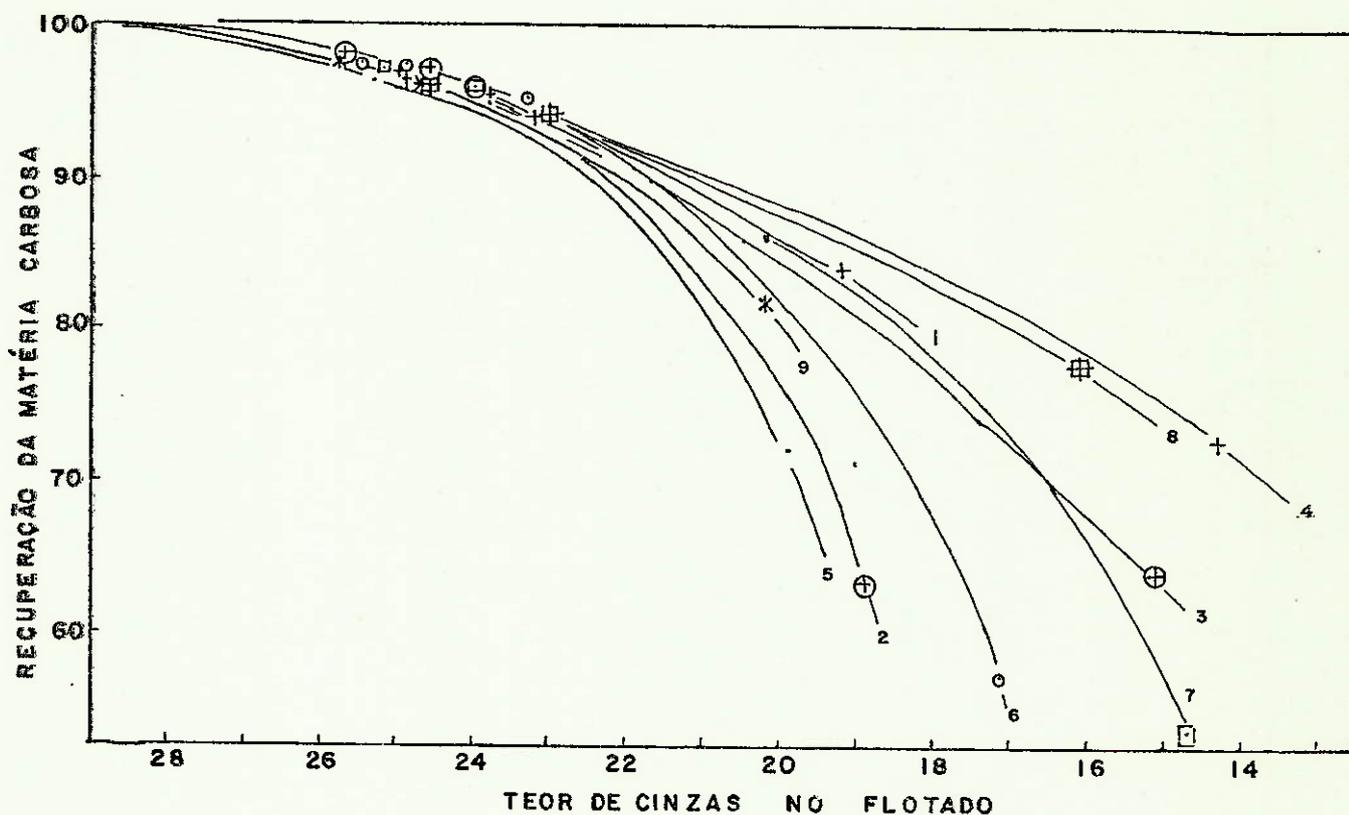


FIGURA 18 - CURVAS DE SELETIVIDADE - FINOS DE COMINUIÇÃO

que no caso anterior,

- os melhores ensaios foram os de número 4 e 8 e os piores, os de número 5 e 2. Considerando suas condições de operação, verifica-se que também aqui a única semelhança é o fato de ambos os melhores ensaios terem sido executados a 6% de sólidos e ambos os piores ensaios a 18% de sólidos.

A análise do efeito da adição do coletor foi feita segundo o mesmo critério estatístico de agrupar os ensaios de mesmo valor dos parâmetros de controle e analisá-los abstraindo o efeito das demais variáveis. A tabela 23 mostra os resultados desses agrupamentos e a figura 19 mostra as curvas de seletividade correspondentes. Estas curvas diferem do comportamento observado com os finos naturais (figura 12): aqui é clara a influência da adição de coletor, os melhores resultados correspondendo ao nível de 200 g/t. É bom salientar que na figura 18 os dois melhores

TABELA 23 - FINOS DE COMINUIÇÃO - AGRUPAMENTO DOS ENSAIOS
SEGUNDO AS ADIÇÕES DE COLETOR E MÉDIAS DE CADA
GRUPO

Adição de Coletor (g/t)	Ensaio	Flotado I		Flotado II		Flotado III		Total		Rejeito	
		% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC
200	1	19,29	83,78	23,67	95,22	25,05	96,76	28,54	70,09		
	4	14,26	72,30	23,21	93,79	24,90	96,26	28,92	70,14		
	5	19,86	71,87	23,83	94,76	25,29	96,58	28,86	69,67		
	8	16,11	77,53	23,00	93,96	24,59	96,36	28,35	69,12		
	Média	17,38	76,37	23,43	94,43	24,96	96,49	28,67	69,76		
600	9	20,21	81,39	24,67	96,33	25,74	97,55	29,06	74,45		
1000	2	18,88	63,21	24,03	95,69	25,53	97,40	28,59	71,89		
	3	15,12	63,57	24,56	96,68	25,74	97,98	28,53	74,64		
	6	17,14	56,98	23,33	95,25	24,91	97,17	28,05	70,53		
	7	14,72	53,55	24,00	95,76	25,17	97,10	28,55	71,56		
	Média	16,47	59,33	23,98	95,85	25,34	97,41	28,43	72,16		

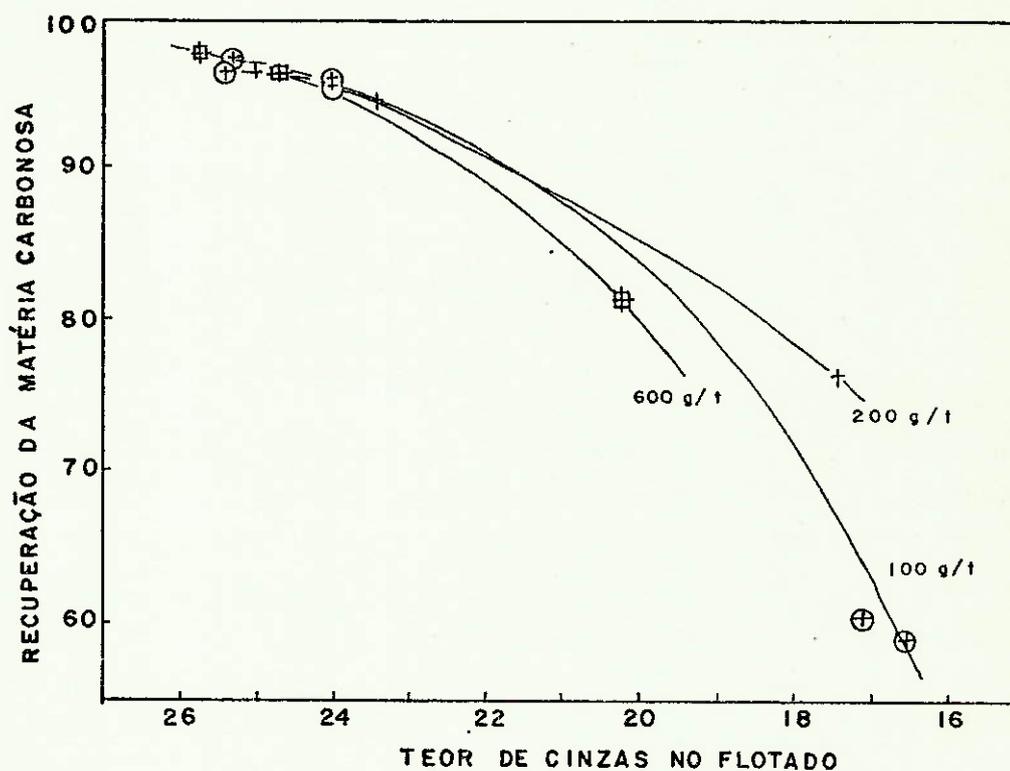


FIGURA 19 - EFEITO DO COLETOR - FINOS DE COMINUIÇÃO

ensaios, 4 e 8, também tem em comum o fato de terem sido executados a níveis de adição de coletor de 200 g/t.

O efeito da adição de coletor se faz sentir de maneira mais acentuada sobre a recuperação da matéria carbonosa: quando se passa de 200 para 1000 g/t a recuperação cai na ordem de 17% (de 76% para 59%).

Para análise do efeito do depressor procedeu-se a tratamento análogo, mostrado na tabela 24 e figura 20. Pode-se traçar uma única curva, apesar de uma pequena dispersão dos pontos em torno dela. Isto indica que a adição de depressor de pirita não atua sobre a seletividade do processo de flotação da matéria carbonosa.

Tratamento idêntico foi dado aos resultados dos ensaios com vistas à análise do efeito da diluição da

TABELA 24 - FINOS DE COMINUIÇÃO: AGRUPAMENTO DOS ENSAIOS SE-
GUNDO AS ADIÇÕES DE DEPRESSOR E MÉDIAS DE CADA
GRUPO

Adição de Depressor (g/t)	Ensaio	Flotado I		Flotado II		Flotado III		Total % Cz	Rejeito % Cz
		% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC		
0	5	19,86	71,87	23,83	94,76	25,29	96,58	28,86	69,67
	6	17,14	56,98	23,33	95,25	24,91	97,17	28,05	70,53
	7	14,72	53,55	24,00	95,76	25,17	97,10	28,55	71,56
	8	16,11	77,53	23,00	93,96	24,59	96,36	28,35	69,12
	Média	16,96	64,98	23,54	94,93	24,99	96,81	28,45	70,22
350	9	20,21	81,39	24,67	96,33	25,74	97,55	29,06	74,45
750	1	19,29	83,78	23,67	95,22	25,05	96,76	28,54	70,09
	2	18,88	63,21	24,03	95,69	25,53	97,40	28,59	71,89
	3	15,12	63,57	24,56	96,68	25,74	97,98	28,53	74,64
	4	14,26	72,30	23,21	93,79	24,90	96,26	28,92	70,14
	Média	16,89	70,72	23,87	95,35	25,31	97,10	28,65	71,69

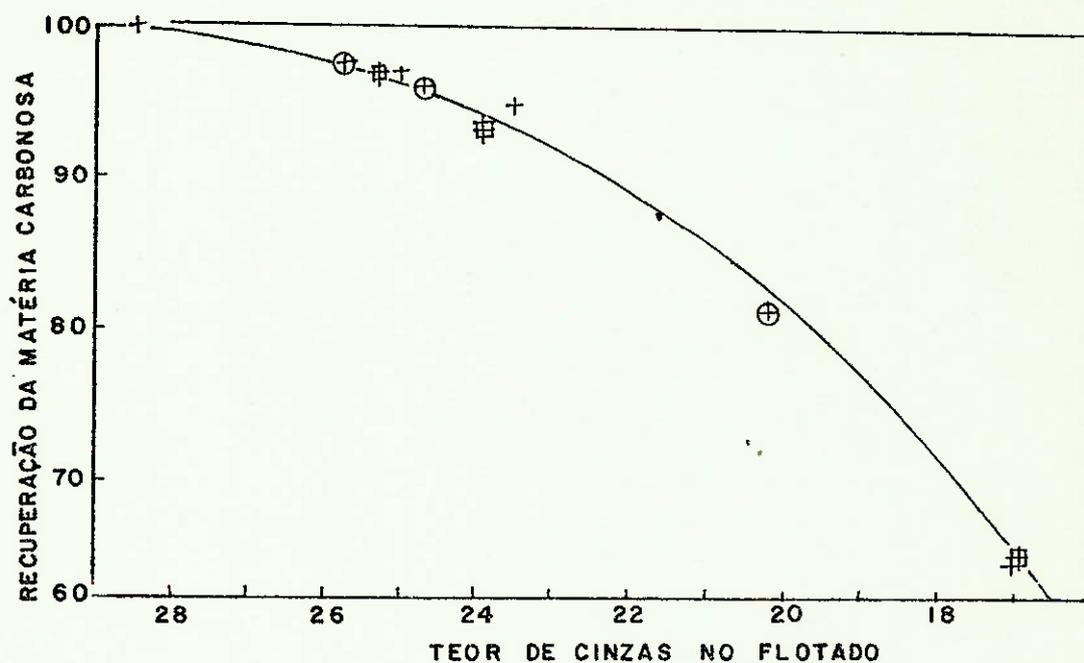


FIGURA 20 - EFEITO DO DEPRESSOR - FINOS DE COMINUIÇÃO

polpa no estágio "rougher" e os resultados podem ser vistos na tabela 25 e na figura 21.

O efeito é nítido e os ensaios com baixa diluição (6% de sólidos) são sensivelmente melhores. Os ensaios com 12 e 18% de sólidos praticamente se confundem.

TABELA 25 - FINOS DE COMINUIÇÃO: AGRUPAMENTO DOS ENSAIOS SE-
GUNDO AS DILUIÇÕES DE POLPA NO INÍCIO DO ESTÁ-
GIO "ROUGHER" E MÉDIAS DE CADA GRUPO

Diluição (% sólidos)	Ensaio	Flotado I		Flotado II		Flotado III		Total	Rejeito
		% Cz	nC	% Cz	nC	% Cz	nC		
6	3	15,12	63,57	24,56	96,68	25,74	97,98	28,53	74,64
	4	14,26	72,30	23,21	93,79	24,90	96,26	28,92	70,14
	7	14,72	53,55	24,00	95,76	25,17	97,10	28,55	71,56
	8	16,11	77,53	23,00	93,96	24,59	96,36	28,35	69,12
	Média	15,05	66,74	23,69	95,05	25,10	96,93	28,59	71,37
12	9	20,21	81,39	24,67	96,33	25,74	97,55	29,06	74,45
18	1	19,29	83,78	23,67	95,22	25,05	96,76	28,54	70,09
	2	18,88	63,21	24,03	95,69	25,53	97,40	28,59	71,89
	5	19,86	71,87	23,83	94,76	25,29	96,58	28,86	69,67
	6	17,14	56,98	23,33	95,25	24,91	97,17	28,05	70,53
	Média	18,79	68,96	23,72	95,23	25,20	96,98	28,51	70,55

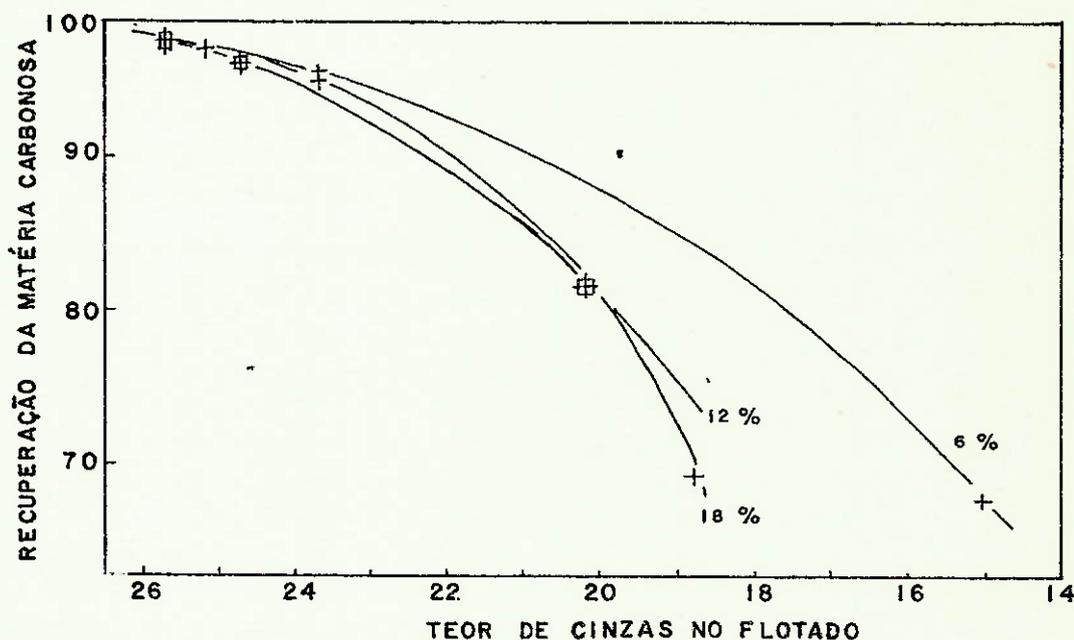


FIGURA 21 - EFEITO DA DILUIÇÃO DE POLPA - FINOS DE COMINUIÇÃO

Os resultados dos ensaios efetuados para verificar o efeito da presença das lamas são mostrados na tabela 26 e figura 22. Observa-se que aqui as diferenças são mínimas - as recuperações de matéria carbonosa no flotado I são cerca de 4% melhores nos ensaios sem lamas, embora o comportamento seja em tudo idêntico ao notado com os finos naturais.

A análise da ação/interação das variáveis foi idêntica à descrita para o caso dos finos naturais. Inclusive a configuração do experimento fica sendo a mesma, pois apesar de terem variado os níveis de adição de depressor de pirita, as posições relativas permanecem, continuando pois válida a tabela 15.

TABELA 26 - FINOS DE COMINUIÇÃO: QUADRO COMPARATIVO DOS EN-
SAIOS CONDUZIDOS COM MATERIAL A 35#x0 E A 35x
200#

ENSAIO		FLOTADO I	FLOTADO II	FLOTADO III	REJEITO
5	%M _i	63,80	88,50	91,96	%M 8,04
	%Cz _i	19,86	23,83	25,29	%Cz 69,67
	nC	71,87	94,76	96,58	
	n̄Cz	56,10	26,93	19,41	
5 35x200#	%N _i	71,07	90,17	92,82	7,18
	%Cz _f	21,02	22,73	23,78	69,91
	nC	76,98	95,56	97,03	
	n̄Cz	44,86	24,34	18,52	
7	%M _i	44,87	90,03	92,71	7,20
	%Cz _i	14,72	24,00	25,17	71,56
	nC	53,55	95,76	97,10	
	n̄Cz	76,87	24,32	18,26	
7 35x200#	%M _i	48,65	80,22	89,79	10,21
	%Cz _i	14,43	18,87	22,78	72,46
	nC	57,70	90,21	96,09	
	n̄Cz	74,79	45,65	26,56	

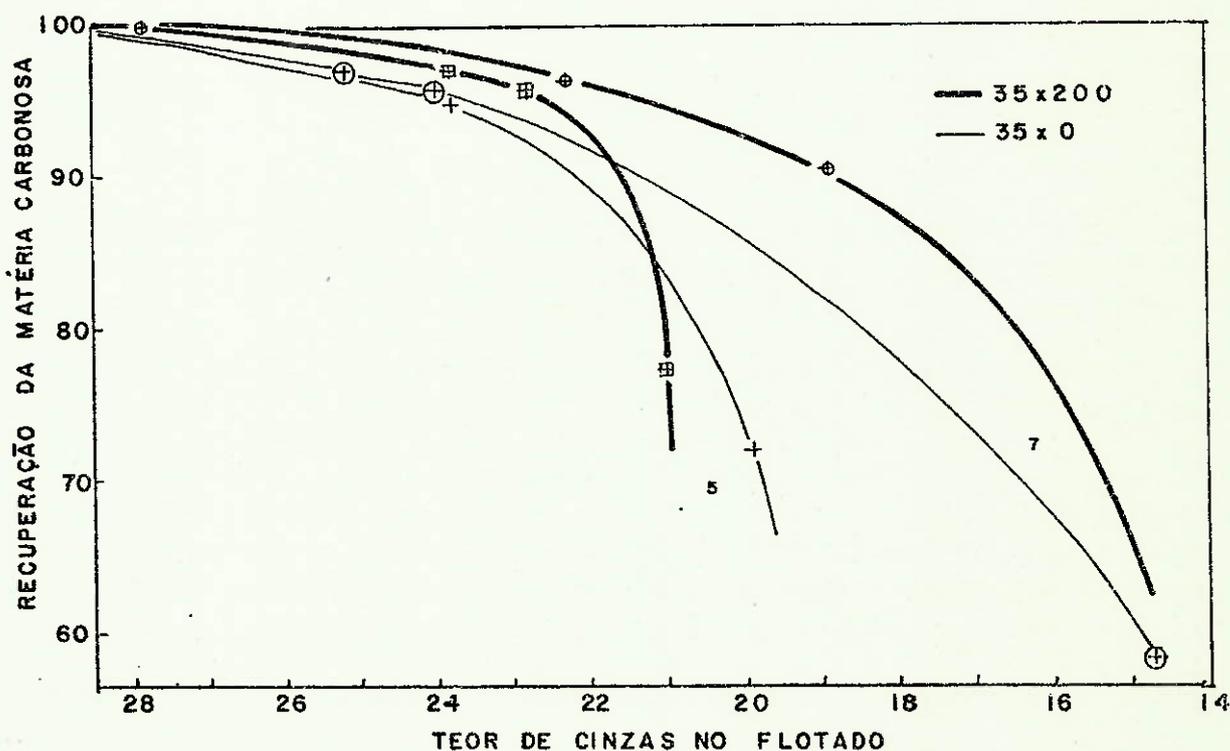


FIGURA 22 - EFEITO DAS LAMAS: FINOS DE COMINUIÇÃO

Os resultados do processamento em computador são apresentados na tabela 27. Verificou-se que com referência à recuperação da matéria carbonosa no Flotado I, a variável (c) (adição de coletor) apresentou os valores mais altos em módulo e de sinal negativo. Isto indica ter ela ação marcante sobre a recuperação e ser esta ação no sentido de provocar perdas com aumento da dosagem. Entretanto nos flotados II e III ela muda de sinal. Com referência aos teores de cinzas do flotado I, a variável mais significativa se mostrou a porcentagem de sólidos (a).

As interações apresentaram sempre valores menores que o da variável mais significativa.

Os valores apresentados na tabela 27 são maiores que os apresentados na tabela 16 porque aqui os valores foram alimentados ao computador como porcentagens (base 100) e lá como frações decimais (base 1).

TABELA 27 - FINOS DE COMINUIÇÃO - AÇÕES E INTERAÇÕES DAS VA
RIÁVEIS DE CONTROLE

	AÇÕES			INTERAÇÕES						perifé rico
	a	b	c	ab	ac	bc	abc	total		
Flotado I	%M	4,637	4,732	-15,152	3,542	-1,272	2,682	-4,787	0,165	-13,901
	%Cz	3,740	-0,070	-0,915	0,655	-0,650	1,140	0,015	1,160	-3,287
	nC	2,222	5,732	-17,042	3,334	-0,687	2,392	-5,232	-0,190	-13,541
	$\bar{n}Cz$	-10,585	-2,480	10,685	-3,900	2,845	-3,400	3,260	-1,195	15,357
Flotado II	%M	0,277	0,532	2,267	0,062	-1,422	0,522	-0,567	-1,405	-1,616
	%Cz	0,022	0,327	0,552	-0,057	-0,622	0,302	0,127	-0,250	-0,966
	nC	0,182	0,412	1,412	0,037	-0,932	0,267	-0,277	-0,905	-1,191
	$\bar{n}Cz$	-0,452	-1,007	-4,217	-0,052	2,747	-1,207	1,007	2,495	3,001
Flotado III	%M	0,262	0,432	1,657	-0,142	-0,517	0,502	-0,512	-0,670	-0,641
	%Cz	0,095	0,315	0,380	-0,125	-0,330	0,280	0,150	-0,025	-0,592
	nC	0,052	0,297	0,922	-0,092	-0,307	0,257	-0,232	-0,375	-0,599
	$\bar{n}Cz$	-0,745	-0,865	-3,375	0,320	1,110	-1,160	0,995	1,265	1,000

7. ENSAIOS VISANDO A ELIMINAÇÃO DA PIRITA

Este capítulo descreve os ensaios executados com vistas à eliminação das piritas presentes na alimentação e discute os resultados obtidos.

Os estudos sobre a eliminação da pirita foram feitos em duas etapas: na primeira, ao mesmo tempo em que se realizavam os ensaios para estudar a depressão das cinzas, foram utilizados os depressores de pirita. Com isto se evitou a repetição de uma campanha experimental, ao mesmo tempo que se verificou a influência que esse reagente poderia ter sobre a flotação do carvão. A segunda etapa é o estudo do processo de remoção da pirita por flotação em dois estágios: inicialmente flota-se o carvão e se rejeitam as cinzas; a seguir flota-se a pirita e se deprime o carvão.

Creemos já ter deixado bem claro que as possibilidades de redução do teor de enxofre pelas técnicas de Beneficiamento de Minerais se limitam ao enxofre pirítico. Não utilizamos os recursos analíticos para diferenciar as formas de ocorrência de enxofre nos carvões, de modo que todos os resultados apresentados se referem sempre a enxofre total. Chamamos a atenção para este fato, pois à vista dos resultados experimentais pode ficar a impressão de que eles são maus, pois a quantidade de enxofre que fica retida no carvão é alta, quando na realidade se trata apenas da quantidade de enxofre que os métodos mecânicos não conseguem remover.

As características dos dois materiais ensaiados, finos naturais e de cominuição, já foram apresentadas nas tabelas 6 e 7, que mostram também as distribuições de enxofre. Note-se que os finos de cominuição exibem teores bem mais baixos, pois grande parte das piritas (toda a pirita liberada antes da rebritagem) foi removida na separação

TABELA 28 - FINOS NATURAIS: EFEITO DA DEPRESSÃO DA PIRITA NO FLOTADO I

ENSAIO	CONDIÇÕES			FINOS NATURAIS			FINOS DE CO-MINUIÇÃO		
	Cole- tor (g/t)	De- pres- sor (g/t)	% sô- li- dos	% S Flo- tado	Re- jeito	\bar{nS}	% S Flo- tado	Re- jeito	\bar{nS}
1	200	750	18	4,07	10,75	56,34	2,65	11,87	47,58
2	1000	750	18	4,22	9,07	56,90	2,67	11,06	60,38
3	1000	750	6	3,70	9,99	61,70	2,23	11,03	68,17
4	200	750	6	3,49	9,90	67,49	1,89	11,87	69,79
4 (35x200)	200	750	6	2,45	11,34	80,53	-	-	-
5	200	100/0	18	3,71	10,87	66,74	2,79	11,31	52,53
5 (35x200)	200	100/0	18	3,61	9,87	64,30	-	-	-
6	1000	100/0	18	3,70	9,59	64,33	2,28	11,74	69,92
7	1000	100/0	6	3,59	10,44	63,50	1,95	11,89	76,67
8	200	100/0	6	3,55	10,82	66,74	2,29	11,37	59,59
9	600	350	12	4,03	10,42	54,17	2,72	11,58	47,52

cinzas dos mesmos ensaios (tabela 10) verificaremos que estas são em média 10% maiores que aquelas. Isto se deve a que a rejeição de enxofre é calculada sobre o enxofre total quando na realidade estamos rejeitando apenas o enxofre pirítico.

O exame dos resultados mostra apenas tendências: não se puderam detetar comportamentos tão nítidos como anteriormente. Os valores apresentaram sempre uma certa dispersão, que não pudemos estabelecer se é devida a erros experimentais ou analíticos ou se a uma característica do próprio comportamento do material nas condições ensaiadas.

A figura 23 tenta correlacionar os valores de teor de cinzas no flotado e teor de enxofre para os finos naturais. Nota-se que existe uma tendência de ambos crescerem no mesmo sentido, o que indicaria que as condições que favorecem a seletividade com relação às cinzas são as mesmas que com relação ao enxofre.

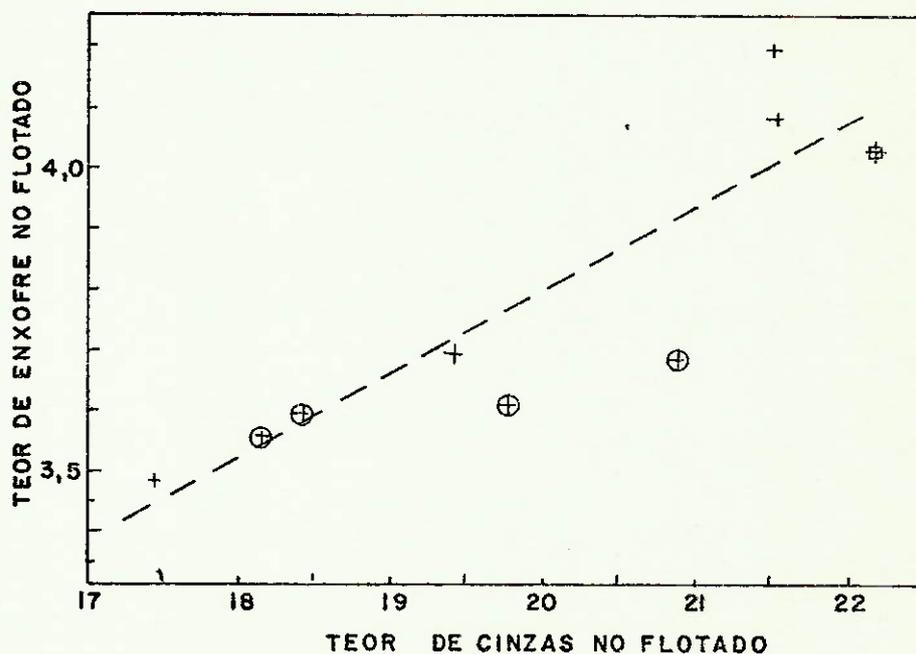


FIGURA 23 - RELAÇÃO ENTRE OS TEORES DE CINZAS E ENXOFRE NO FLOTADO - FINOS NATURAIS

Não se conseguiu correlacionar o resultado da eliminação do enxofre pirítico com as variáveis de controle de operação, ou seja, com a adição de depressor, com a adição de coletor ou com a variação da diluição de polpa.

Dois ensaios foram realizados com material deslamado (35x200#). Em ambos o teor de cinzas do flotado foi melhor que no ensaio correspondente com lamaz. O ensaio 4 com material deslamado apresentou os melhores resultados de toda a série, tendo chegado a 2,45% de enxofre no concentrado e rejeitando 80,53% do enxofre total contido

na alimentação. O segundo melhor resultado se refere ao ensaio 4 com lamas.

7.1.2. Finos de cominuição

A tabela 28 mostra que com os finos de cominuição os resultados obtidos foram ainda melhores que com os finos naturais. Os teores dos flotados variaram de 1,89 a 2,79% e no rejeito esses teores foram sempre superiores a 11,0%.

Os melhores resultados foram obtidos novamente com o ensaio número 4, o que demonstra que as condições ótimas de operação devem se situar nas proximidades desse ponto (baixa adição de coletor, máxima adição de depressor e alta diluição de polpa).

A diferença entre os resultados constatados com os finos das duas origens diferentes permite concluir que nos finos naturais existe uma maior quantidade de enxofre, orgânico ou pirítico, não liberado.

7.2. FLOTAÇÃO EM DUPLO ESTÁGIO (FINOS NATURAIS)

Para esta investigação utilizou-se a amostra de finos naturais. Esta foi peneirada a 35 malhas e o material passante, enquartado e utilizado nos ensaios. Ela apresentou as seguintes características:

- teor de cinzas: 38,41%
- teor de enxofre: 5,50%
- pH natural da polpa: 4,6.

O material foi flotado num primeiro estágio com a adição de 200 g/t de coletor (querozene). Utilizou-se cloreto férrico como depressor de pirita (300 g/t de FeCl_3). Flotou-se até cessar a espumação. Como espumante utilizou-se 100 g/t de óleo de pinho. O ensaio foi feito por batela-

das até se obter toda a massa de concentrado necessária para passar ao segundo estágio. Então esse material foi en-
quartado em divisor rotativo de polpa, obtendo-se as alíquo-
tas a serem utilizadas em cada ensaio.

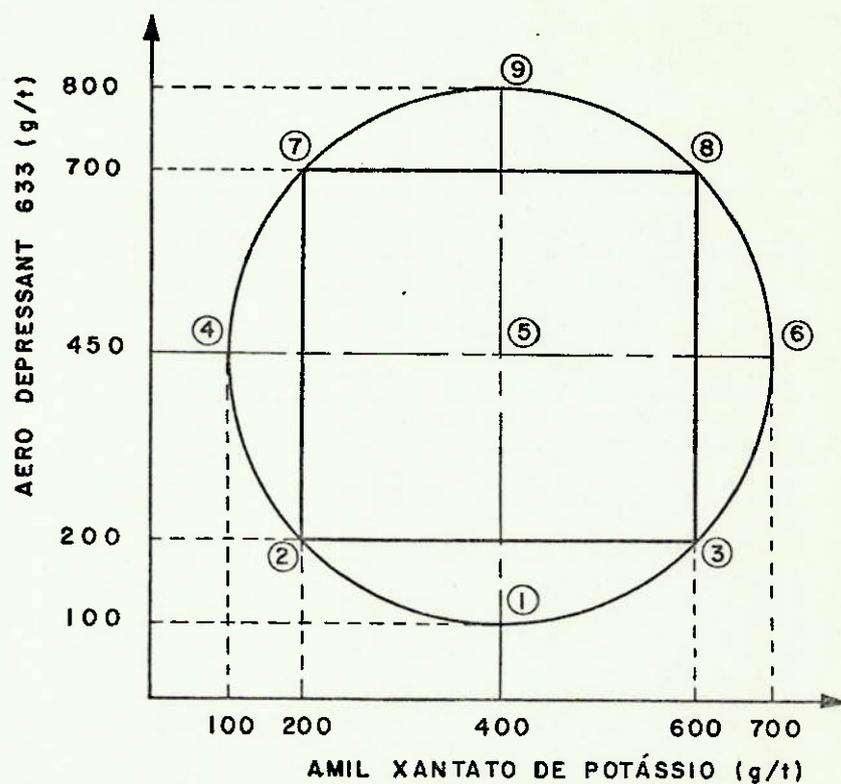
O primeiro estágio de flotação foi conduzido de modo a se obter 80% de recuperação da matéria carbonosa. O teor de cinzas desse concentrado foi de 22,15% e o teor de enxofre baixou para 3,69%.

7.2.1. Experimento realizado

O planejamento experimental realizado é mostrado na figura 24. Investigaram-se apenas duas variáveis: adição do depressor de carvão (Aero Depressant 633, fornecido pela Cyanamid Química do Brasil Ltda.) e adição do coletor de pirita (Amil Xantato de Potássio - Aero 350 Xanthate - fornecido pela mesma firma). Estes reagentes foram os utilizados no desenvolvimento do processo pelo "Bureau of Mines", conforme citados em (48).

Ambos os reagentes foram usados em solução a 1% em peso. A seqüência operacional durante os ensaios foi:

- agitação a 50% de sólidos em peso, durante 5 minutos, 900 rpm, para molhar bem a superfície dos grãos;
- adição do depressor de carvão e condicionamento durante um minuto a 900 rpm;
- adição do coletor de pirita e condicionamento durante um minuto a 900 rpm;
- adição de metil-isobutil-carbinol (50 g/t), expansão da polpa para 25% de sólidos, acerto do pH para 6,0-6,5. Flotou-se durante 30 segundos a 1600 rpm.



ENSAIO	DEPRESSOR g/t	COLETOR g/t
1	100	400
2	200	200
3	200	600
4	450	100
5	450	400
6	450	700
7	700	200
8	700	600
9	800	400

FIGURA 24 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA A FLOTAÇÃO DA PI
RITA

A tabela 29 mostra as condições de ensaio e os resultados obtidos em termos de recuperações de massa (% M) obtidas em cada fração, teores de enxofre (% S) em ca

TABELA 29-FINOS NATURAIS: RESULTADOS EXPERIMENTAIS -ENSAIOS DE DEPIRITIZAÇÃO POR FLOTAÇÃO EM DUPLO ESTÁGIO

Ensaio	CONDIÇÕES		FLOTADO		DEPRIMIDO		Alim.	\bar{n}_S
	Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	% M	% S E	% M S/alim. flot. inicial	% S	% S Recalc.	
1	100	400	29,77	4,09 1,38	70,23	56,2	2,49	58,9
1B(60s)	100	400	33,22	4,04 1,15	66,78	53,4	3,25	61,8
2	200	200	9,27	8,93 2,30	90,73	72,6	3,36	93,5
3	200	600	15,07	5,75 1,45	84,93	67,9	3,65	93,4
4	450	100	2,86	6,39 2,08	97,14	77,7	2,97	94,0
5	450	400	5,12	6,39 1,65	94,88	75,9	3,74	91,5
6	450	700	7,85	6,85 1,79	92,15	73,7	3,56	85,9
7	700	200	2,73	8,92 2,61	97,27	77,8	3,26	93,0
8	700	600	4,29	9,78 2,74	95,71	76,6	3,29	88,2
9	800	400	3,61	9,78 2,79	96,39	77,1	3,28	90,1
9B(60s)	800	400	7,97	7,12 2,05	92,03	73,6	3,15	83,5

da fração e enriquecimento de enxofre (E) no flotado.

Dois dos ensaios (1 e 9) foram repetidos mudando o tempo de flotação para 60 segundos, de modo a poder avaliar o efeito desta variável adicional. Miller chama a atenção para o fato de que a cinética desta flotação é muito rápida e que o prolongamento da flotação conduz a resultados prejudiciais (46).

7.2.2. Análise dos resultados

Da tabela 29 constata-se que os teores de enxofre e os enriquecimentos crescem à medida que aumenta a dosagem de depressor de carvão. O melhor resultado de enriquecimento (ensaio 9) é obtido com adição máxima de depressor e adições médias de coletor de pirita.

O ensaio 2 apresentou resultados anômalos, possivelmente devido a erros experimentais ou de análise química. Deve pois ser descartado.

Os resultados dos ensaios com 60 segundos de flotação são conflitantes quando comparados aos ensaios com 30 segundos e não podem ser considerados.

Com as respostas experimentais do planejamento foi possível estabelecer um modelo matemático para o comportamento do enriquecimento de enxofre no flotado em função dos níveis de adição de depressor e de coletor de pirita. Este modelo é o seguinte:

$$E = a_0 + a_1C + a_2D + a_3C^2 + a_4D^2 + a_5C D$$

onde: E é o enriquecimento em enxofre no flotado,

C é a adição de coletor em g/t

D é a adição de depressor em g/t

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ são coeficientes empíricos dados por:

$$a_0 = 2,2931$$

$$a_1 = 0,0014$$

$$a_2 = 0,0038$$

$$a_3 = \text{desprezível}$$

$$a_4 = \text{desprezível}$$

$$a_5 = \text{desprezível}$$

Este modelo é válido na faixa dos enriquecimentos obtidos do trabalho experimental, ou seja, de 1,4 a 3,0. A figura 25 mostra a forma da equação obtida e a comparação com os valores experimentais. Fica evidenciado que o ensaio 2 está em posição errada, conforme comentado.

O modelo permite prever que os melhores resultados sejam obtidos com adições máximas de depressor (800 g/t), sendo de se esperar que aumentando essa adição aumente ainda mais o enriquecimento. Note-se entretanto que os aumentos de enriquecimento tendem a diminuir conforme aumenta a adição de depressor. Ainda, os máximos se dão para adições médias de coletor, diminuindo o enriquecimento com o aumento da dosagem ou com dosagens inferiores.

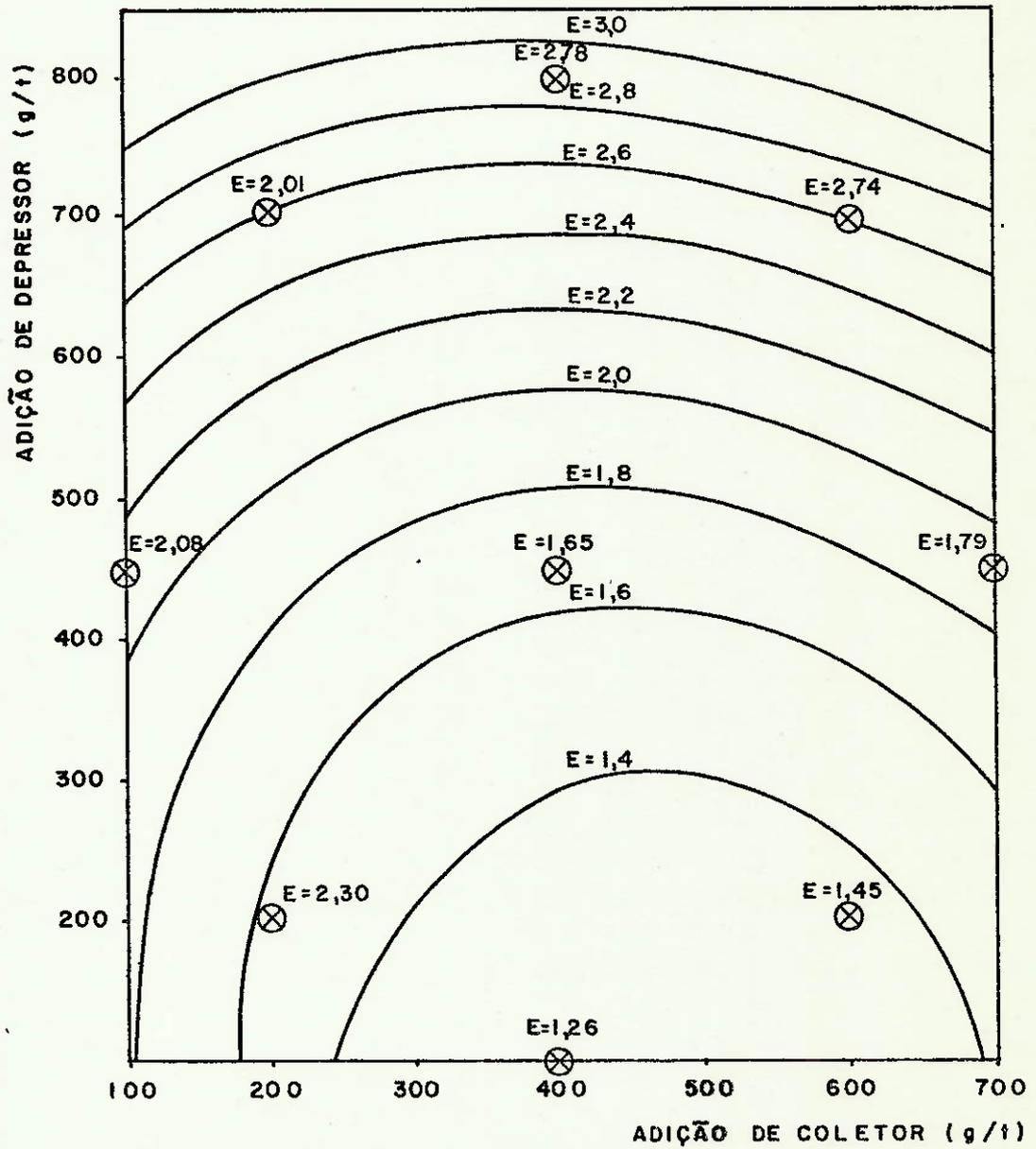


FIGURA 25 - PREDIÇÃO DO ENRIQUECIMENTO DE ENXOFRE EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DE COLETOR E DEPRESSOR - FINOS NATURAIS

A figura 26 mostra a correlação obtida entre os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo e serve para aferir a sua precisão.

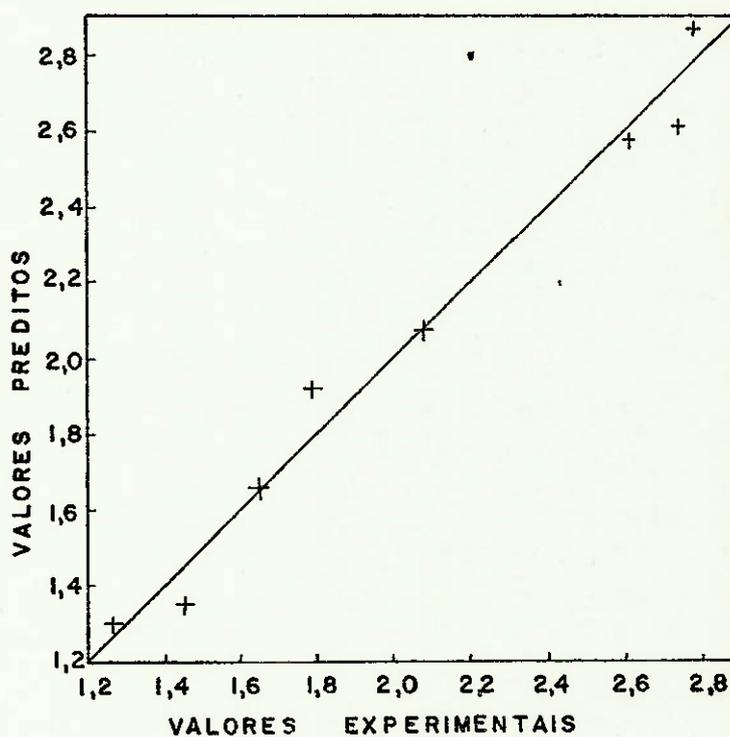


FIGURA 26 - AFERIÇÃO DO MODELO

O melhor resultado obtido foi portanto de 2,97% S e 77,7% de recuperação em massa, superior portanto aos melhores ensaios de depressão da pirita:

ensaio 7 : 3,59% S, 59,9% de recuperação em massa
ensaio 3 : 3,70% S, 60,9% de recuperação em massa.

8. CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

Além da aproximação empírica feita nos capítulos anteriores, pode-se tentar uma aproximação cinética ao processo de flotação. Para isto, assimila-se-o a um processo químico e se o trata em termos cinéticos, considerando como variável a quantidade de material removida para a espuma na unidade de tempo, ou, a redução da quantidade de material que permanece no interior da célula.

O planejamento de nossos experimentos não permite o tratamento de todos os resultados à luz destes conceitos pois na flotação estagiada as condições de operação foram feitas variar em cada estágio da operação. Entretanto, se se considerar apenas o período inicial dos ensaios, ou cada um dos períodos em que foi dividido o ensaio, é possível de fazê-lo. O presente capítulo se ocupa de tratar esses resultados desta maneira e compara as conclusões assim obtidas com as conclusões anteriores.

8.1. ORDEM DE REAÇÃO

A primeira preocupação do estudo cinético é a de determinar a ordem da equação cinética, o que é feito em ensaios de flotação estagiada e pela construção de gráficos com os das figuras 27 e 28, utilizando-se as seguintes escalas:

- linear para os tempos e logarítmica para a recuperação (papel monolog). Uma equação de primeira ordem se traduz pelo alinhamento dos pontos.
- linear para o inverso dos tempos e linear para o inverso da recuperação da matéria carbonosa. Uma equação de segunda ordem se traduz pelo alinhamento dos pontos obtidos.
- se em qualquer dos tipos de gráfico, a velocidade é constante, a equação é de ordem zero.

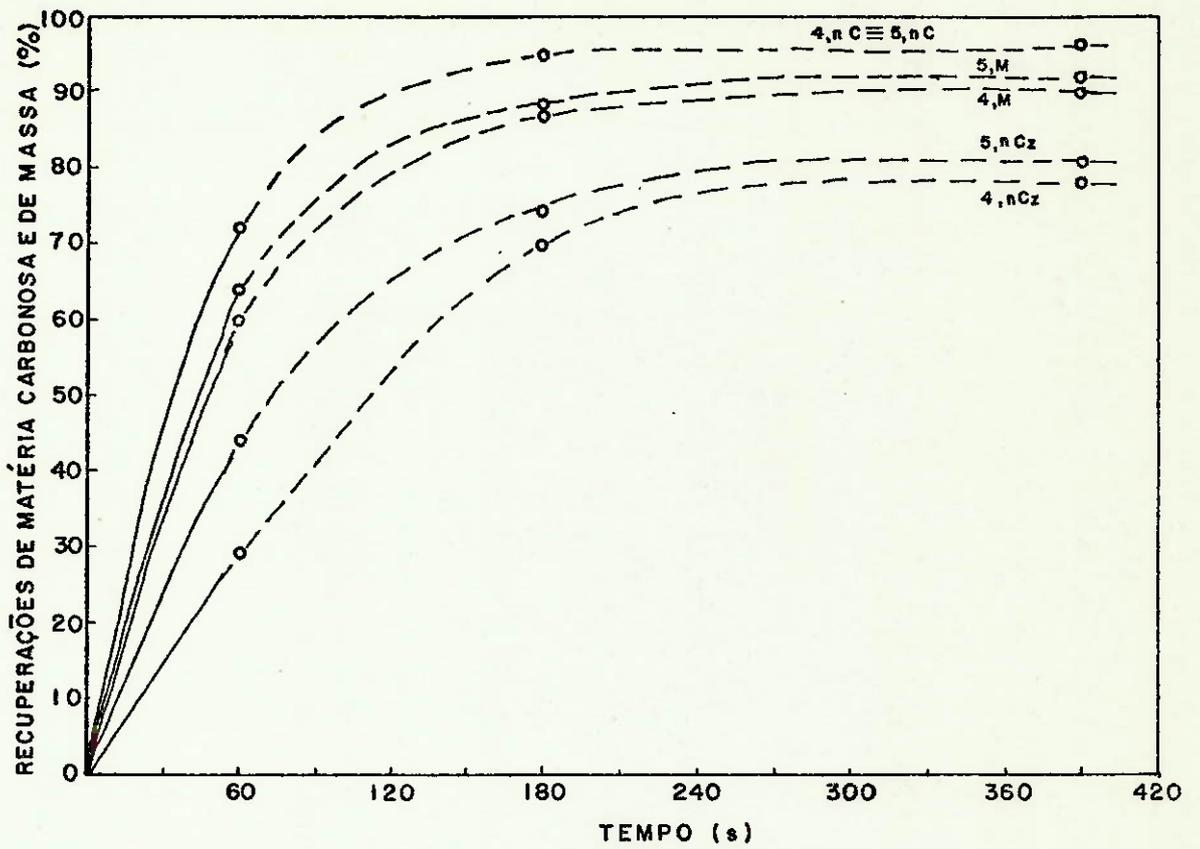


FIGURA 27 - CINÉTICA DE FLOTAÇÃO DOS FINOS DE COMINUIÇÃO (ENSAIOS 4 e 5)

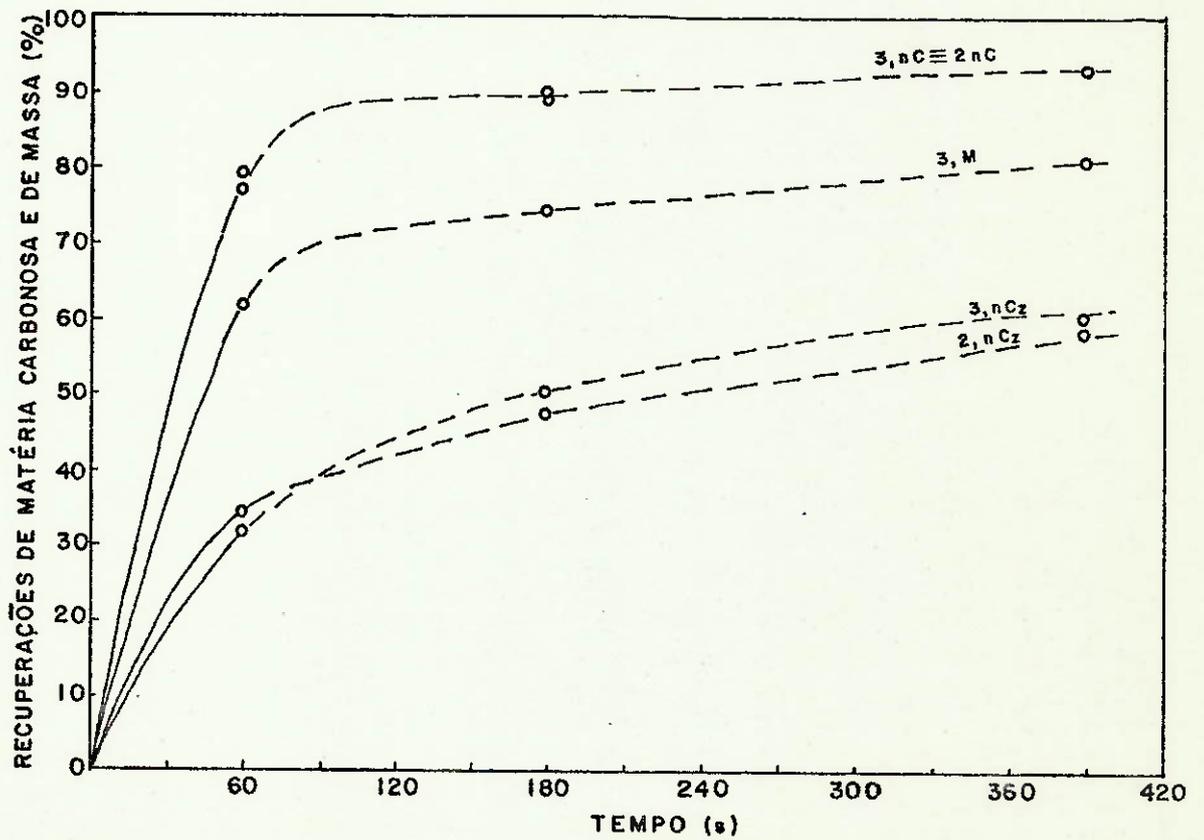


FIGURA 28 - CINÉTICA DE FLOTAÇÃO DOS FINOS NATURAIS (ENSAIOS 2 e 3).

O método gráfico é enormemente afetado pela escala escolhida para o traçado. As conclusões assim obtidas são pois sempre passíveis de questionamento. Também o cálculo das constantes cinéticas é afetado pelos erros individuais de cada etapa do ensaio e podem levar a uma dispersão que não traduz a natureza do fenômeno mas sim o erro inerente ao trabalho realizado.

As figuras 27 e 28 mostram o desenrolar de algumas das experiências executadas. Em abcissas, em escala linear, é mostrada a quantidade de matéria carbonosa removida (expressa em porcentagens sobre a matéria carbonosa presente na alimentação) e em ordenadas são mostrados os tempos. Estes gráficos permitem apenas uma avaliação qualitativa do processo, pois as condições de flotação foram modificadas durante o decorrer do ensaio. Mas, tendo-se em conta isso, podemos constatar que: inicialmente há uma elevação acentuada, seguida por um trecho de inclinação bem menor. Isto significa que o processo se inicia com velocidade elevada e que esta se atenua bastante conforme decorre o tempo. Os dois gráficos se distinguem na maneira como se faz a transição de um trecho para outro: no caso dos finos naturais ela é abrupta, ao passo que nos finos de cominuição ela é suave e gradativa.

Os ensaios, conforme executados por nós não permitem estabelecer a ordem da equação cinética. Assim, o estudo terá forçosamente que se limitar à análise de como variou a recuperação da matéria carbonosa em função da velocidade de flotação no primeiro período e na avaliação do efeito das variáveis de controle sobre essa velocidade.

8.1.1. Finos Naturais

A tabela 30 apresenta as constantes cinéticas calculadas para a matéria mineral e para a matéria carbonosa, como se esta fosse de primeira ordem, sobre os ensaios realizados com os finos naturais. A figura 29 apresenta em diagrama mono-log as quantidades de cinzas e matéria carbonosa remanescentes na célula ao final do primeiro estágio de flotação.

TABELA 30 - FINOS NATURAIS - TRATAMENTO CINÉTICO DOS RESULTADOS

Ensaio	FLOTADO I, $\Delta t = 60$ s			
	$\bar{n}C$	$\bar{n}Cz$	la. ordem mat. carb. $-k_1$	cinzas $-k'_1$
1	19,81	64,20	0,027	0,007
2	23,77	66,03	0,024	0,007
3	20,75	68,94	0,026	0,006
4	27,86	73,62	0,021	0,005
4-B	33,78	77,94	0,018	0,004
4(35x200)	39,79	80,05	0,015	0,004
5	24,56	69,63	0,023	0,006
5-B	25,79	69,00	0,023	0,006
5(35x200)	35,60	69,59	0,017	0,006
6	27,07	69,11	0,022	0,006
7	22,25	70,31	0,025	0,006
8	27,68	73,33	0,021	0,005
9	15,50	60,43	0,031	0,008
9-B	18,30	63,76	0,028	0,008

Como já foi mencionado, não possuímos informações suficientes para estabelecer a ordem da flotação dos materiais estudados. Portanto a tabela 30 e a figura 29 não afirmam que esta ordem seja primeira. Apenas a tratam como se fosse, pela facilidade de comparação que essa simplificação traz. Os valores apresentados só podem pois ser comparados entre si, não sendo válida a comparação com quaisquer outros valores.

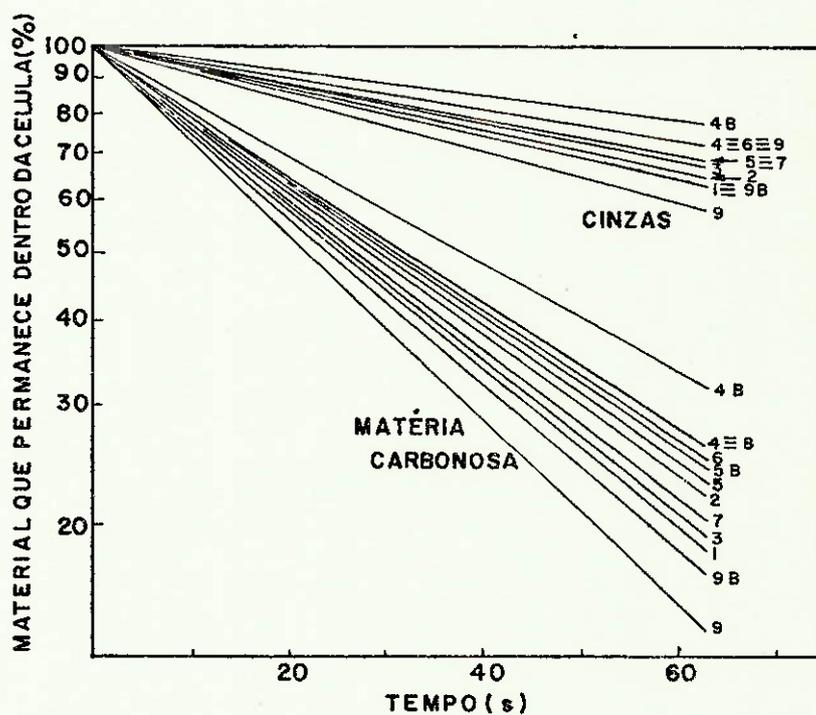


FIGURA 29 - FINOS NATURAIS - CINÉTICA DA FLOTAÇÃO - 1º FLO-TADO

É marcada a diferença entre as velocidades das cinzas e da matéria carbonosa (cerca de quatro vezes). Os ensaios que apresentam maiores constantes cinéticas são os ensaios 9, 9B e 1, sendo elevados tanto os valores das cinzas como os da matéria carbonosa. As menores constantes, também para ambos os constituintes, são verificadas nos ensaios 4, 4B e 8. Comparando os valores mostrados aqui com

os valores apresentados na tabela 10, ressalta de imediato que:

- os ensaios 9, 9B e 1 tem elevadas recuperações de matéria carbonosa e teores de cinzas nos concentrados altos;
- os ensaios 4, 4B e 8 tem teores de cinzas no concentrado baixos e apresentam recuperações menores.

É evidente portanto que as condições que levam a velocidades de flotação mais baixas aumentam a seletividade do processo, o inverso se dando com as velocidades mais elevadas. Não pudemos identificar condições em comum nos ensaios de cinética maior, mas os ensaios de velocidade mais baixa foram todos realizados com a máxima diluição de polpa (6% de sólidos) e com a mínima adição de coletor (200 g/t) ensaiadas.

8.1.2. Finos de Cominuição

O mesmo tratamento feito no item 8.1.1. é apresentado na tabela 31 e na figura 30, sendo válidos os comentários feitos no item anterior sobre a sua significação.

Nota-se a mesma diferença entre as constantes da matéria carbonosa e da matéria mineral, que aqui são da ordem de três vezes. Nota-se ainda que os resultados experimentais apresentaram variações bastante mais significativas que no caso dos finos naturais o que deve indicar que o material agora tratado responde melhor às condições de ensaio que os finos naturais.

Os ensaios 1, 9 e 5 apresentam velocidades maiores para ambos os constituintes. Novamente isto se traduz por recuperações mais elevadas e por uma seletividade menor do processo (teores de cinzas no concentrado maiores) - vide tabela 22.

TABELA 31 - FINOS DE COMINUIÇÃO: TRATAMENTO CINÉTICO DOS RESULTADOS

Ensaio	$\bar{n}C$	$\bar{n}Cz$	FLOTADO I, $\Delta t=60$ s	
			Mat. Carb. $-k_I$	la. ordem cinzas $-k'_I$
1	16,22	49,86	0,030	0,012
2	36,79	63,25	0,017	0,008
3	36,43	71,63	0,017	0,006
4	27,70	70,45	0,021	0,006
5	28,13	56,10	0,021	0,010
5 (35x200)	23,02	44,86	0,024	0,013
6	43,02	69,77	0,014	0,006
7	46,45	76,87	0,013	0,004
7 (35x200)	42,30	74,79	0,014	0,005
8	22,47	62,37	0,025	0,008
9	18,61	49,68	0,028	0,012

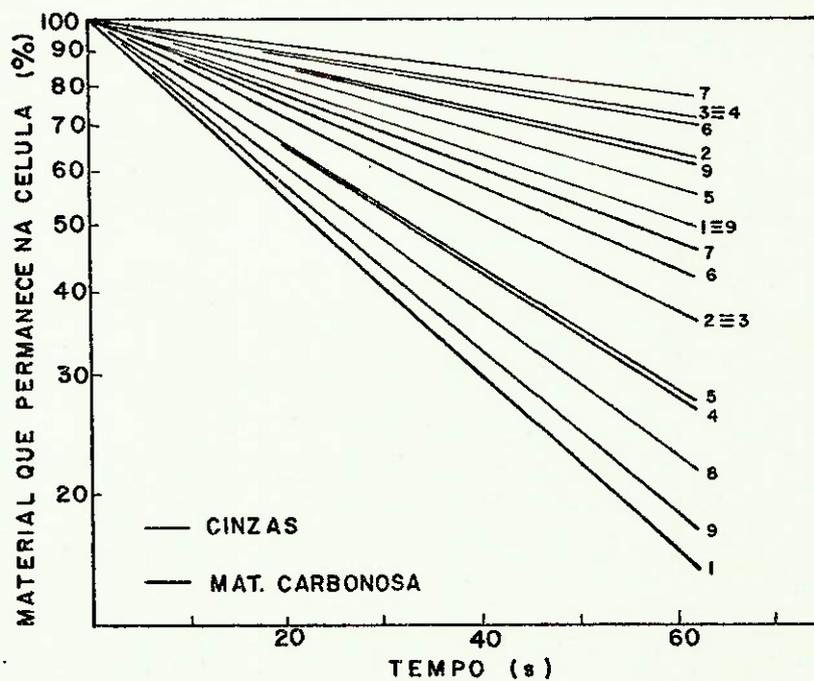


FIGURA 30 - FINOS DE COMINUIÇÃO - CINÉTICA DE FLOTAÇÃO 1º FLOTADO

Os ensaios 7, 3, 4 e 6 se caracterizam por terem as constantes cinéticas das cinzas menores, sem consideração às constantes da matéria carbonosa. Este fato corresponde a recuperações mais baixas, tanto de massa como de matéria carbonosa e a teores de cinzas menores nos concentrados. Os ensaios 7 e 6 tem ainda as constantes cinéticas para a matéria carbonosa baixas, o que resulta numa baixa recuperação de massa e de matéria carbonosa.

8.1.3. Conclusões e Critérios

À vista do exposto cremos poder concluir que apesar de incompleto, o estudo cinético do processo conforme feito apresenta interesse e pode levar a conclusões importantes. É válido estudar apenas os primeiros sessenta segundos, pois após esse período é de se esperar que o fenômeno se afaste demasiado dos modelos estabelecidos. Outrossim, em termos práticos, após esse tempo a quantidade de cinzas arrastada pela espuma é tão grande que o processo deixa de apresentar interesse como processo de beneficiamento de carvão.

Apresenta-se agora o problema de interpretar o efeito das variáveis operacionais sobre os resultados experimentais. Os critérios a serem utilizados basear-se-ão na comparação das constantes cinéticas medidas e terão valor apenas comparativo, pois a ordem de reação é desconhecida.

8.2. EFEITO DAS VARIÁVEIS

O efeito das variáveis será analisado de acordo com o mesmo artifício de se agrupar os resultados de ensaios executados segundo condições comuns, conforme feito no capítulo 8, agora em termos cinéticos.

8.2.1. Efeito do coletor e do espumante

A figura 31 exibe, em papel mono-log, os primeiros períodos dos ensaios realizados com os finos naturais, todos eles já descritos no capítulo 6, item 6.1.3., ensaios A e B e as médias dos ensaios descritos também no capítulo 6, realizados com adições de 200, 600 e 1000 g de coletor por tonelada de alimentação. Estes ensaios são resumidos na tabela 32.

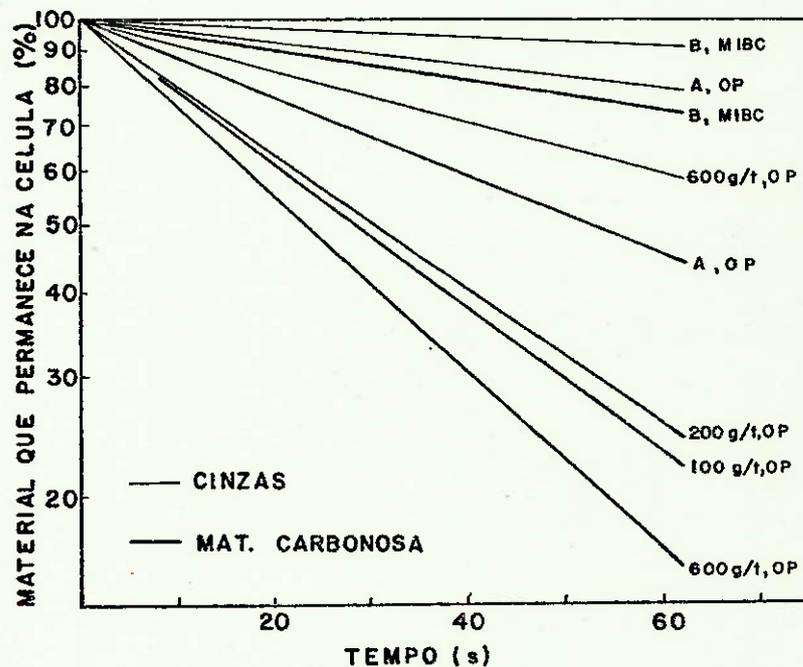


FIGURA 31 - FINOS NATURAIS: EFEITO DO COLETOR E DO ESPUMANTE SOBRE A CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

TABELA 32 - FINOS NATURAIS: EFEITO DO COLETOR E DO ESPUMANTE

Ensaio	Espumante	Coletor (g/t)	Mat. Carb.* 60 s	Cinzas 60 s
A	Óleo de pinho	-	45,17	79,59
B	MIBC	-	74,71	92,01
Média	Óleo de pinho	200	25,87	-
9	Óleo de pinho	600	16,90	60,43
Média	Óleo de pinho	1000	23,46	-

* remanescente na célula

Verifica-se que os ensaios realizados com adição de coletor tem uma velocidade de flotação da matéria carbonosa maior que os ensaios em que só se utilizou espumante. O ensaio com adição de 1000 g/t tem cinética menor que o com 600 g/t. Dos espumantes utilizados, o óleo de pinho apresenta velocidades de flotação (da matéria carbonosa e das cinzas) mais elevadas que o metil-isobutil-carbinol. Note-se entretanto que as velocidades de flotação são mais elevadas tanto para a matéria carbonosa como para a matéria mineral, o que talvez explique a menor seletividade deste reagente, já constatada no capítulo 6.

Considerando que o óleo de pinho tem propriedades coletoras, o que não acontece com o MIBC, podemos fazer a hipótese de que este reagente atue na flotação como os coletores empregados, e que essa ação coletora se efetue sobre partículas de carvão menos flotáveis, oxidadas, ou intercaladas de matéria mineral aumentando a velocidade de flotação em relação ao MIBC.

A figura 32 compara, ainda em papel monolog, os ensaios realizados com finos de cominuição. Tratam-se das médias dos ensaios realizados com 200, 600 e 1000 g/t e já descritos no item 6.2. Nota-se o mesmo comportamento observado para os finos naturais de a velocidade de flotação da matéria mineral aumentar quando se aumenta de 200 para 600 g/t a adição de coletor e em seguida diminuir ao se passar para 1000 g/t.

Note-se entretanto que a velocidade de remoção da matéria mineral (cinzas) apresenta exatamente a mesma tendência, o que talvez permita entender o comportamento dos ensaios realizados com 600 g/t e que não havíamos compreendido à luz do tratamento estatístico.

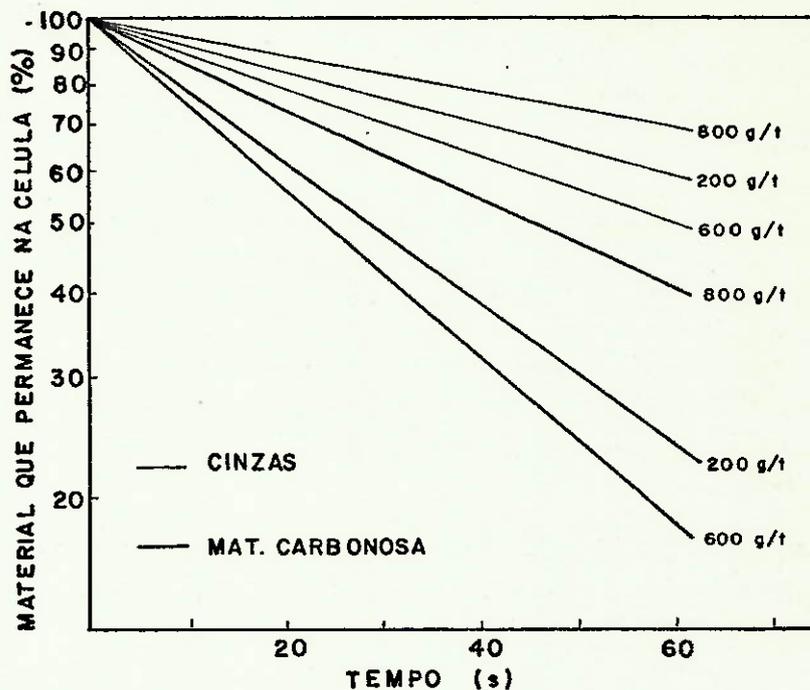


FIGURA 32 - FINOS DE COMINUIÇÃO: EFEITO DA ADIÇÃO DO COLE-TOR SOBRE A CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

8.2.2. Efeito do depressor da pirita

As figuras 33 e 34 mostram o comportamento das médias dos ensaios, respectivamente de finos naturais e de cominuição realizados com cada valor de adição de depressor de pirita. Não se nota nenhuma tendência consistente, o que deve ser atribuído à ação mais enérgica de outras variáveis de controle, o que viria corroborar as conclusões já obtidas de que este reagente exerce pouca ou nenhuma ação sobre a flotação da matéria carbonosa.

Entretanto, com ambos os materiais a adição de 350 g/t correspondeu a um aumento considerável da velocidade de flotação da matéria carbonosa em relação à adição menor ou nula. Não houve variação tão significativa da velocidade de flotação das cinzas. Como o que interessa para a seletividade do processo é a diferença relativa entre as duas velocidades, talvez possa ser encontrada aqui

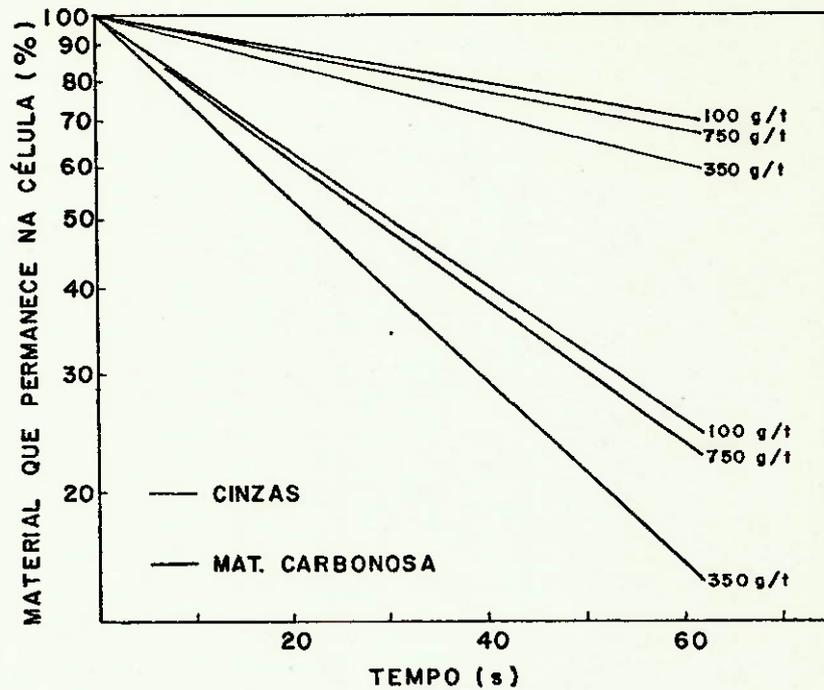


FIGURA 33 - FINOS NATURAIS: EFEITO DA ADIÇÃO DO DEPRESSOR SOBRE A CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

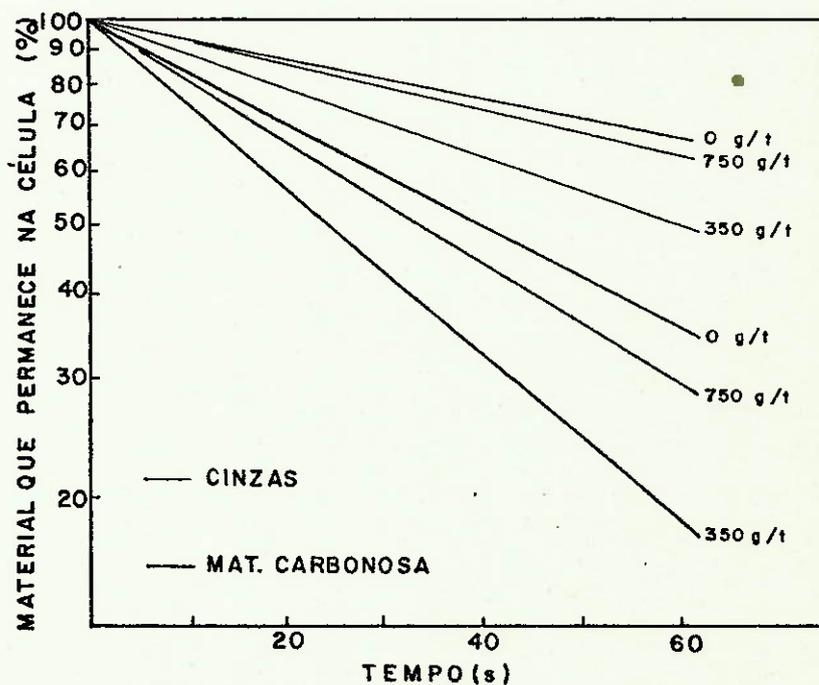


FIGURA 34 - FINOS DE COMINUIÇÃO: EFEITO DA ADIÇÃO DO DEPRESSOR SOBRE A CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

a explicação do efeito do depressor.

Note-se também que a diferença relativa das velocidades é muito mais acentuada com os finos naturais que com os finos de cominuição, o que justificaria a constatação feita no capítulo 6 de que a ação do depressor é mais sensível sobre este material que sobre os finos de cominuição.

8.2.3. Efeito da granulometria

A figura 35 construída a partir dos resultados apresentados nas tabelas 14 e 26, apresenta os resultados dos ensaios realizados a diferentes granulometrias para efeito de comparação. Nota-se com os finos naturais um comportamento nítido no sentido de que os ensaios realizados com a fração 35x200 malhas apresentarem velocidades maiores em ambos os casos.

Com os finos de cominuição os resultados apresentam o comportamento exatamente oposto, o que não permite estabelecer qualquer conclusão.

8.2.4. Efeito da diluição

O efeito da diluição de polpa é apresentado na figura 36. Nota-se que todas as velocidades de flotação passam por um máximo no ensaio realizado com 12% de sólidos. Nota-se ainda que as velocidades de flotação da matéria carbonosa dos finos naturais são maiores que as dos finos de cominuição e que o inverso ocorre com as cinzas. Isto talvez explique o fato já estabelecido que a seletividade da flotação dos finos naturais é muito maior que a dos finos de cominuição.

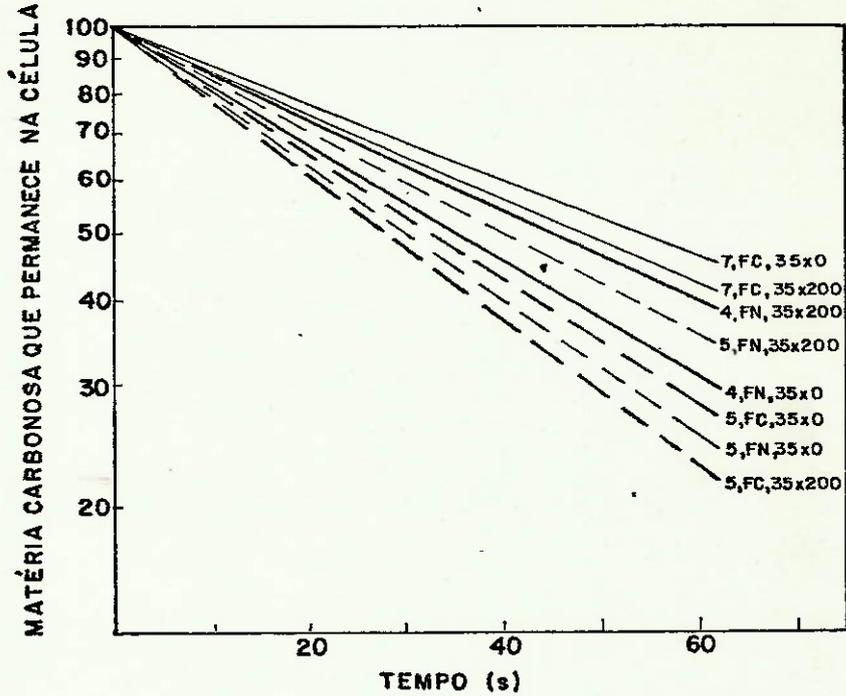


FIGURA 35 - FINOS DE COMINUIÇÃO E NATURAIS: EFEITO DA GRANULOMETRIA SOBRE A CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

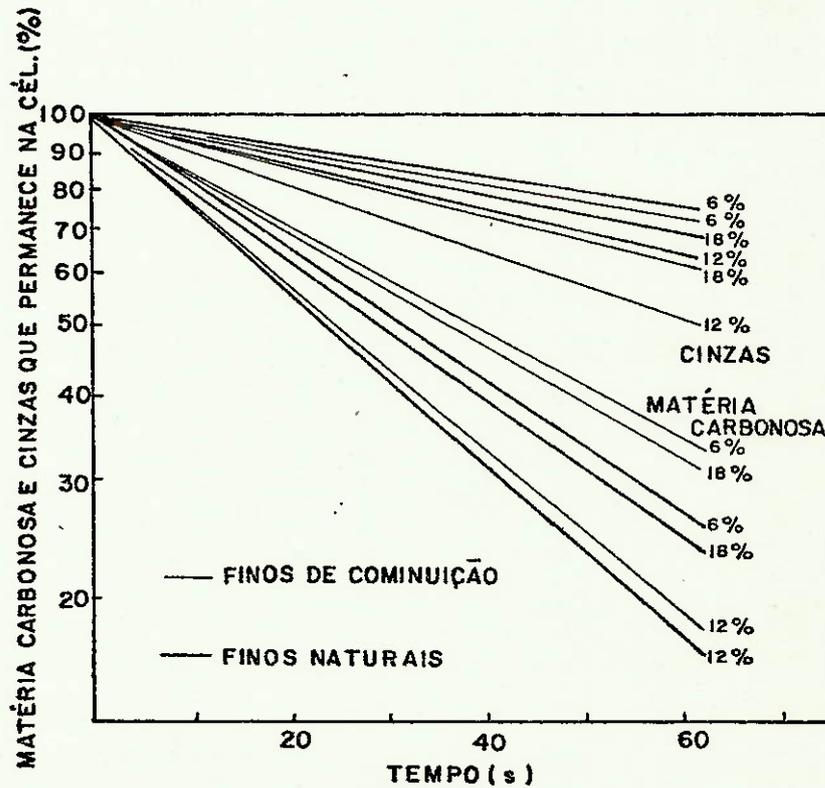


FIGURA 36 - FINOS DE COMINUIÇÃO E NATURAIS: EFEITO DA DILUIÇÃO DE POLPA SOBRE A CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

8.2.5. Conclusões

O tratamento cinético efetuado é válido, embora restrito ao primeiro período de ensaio da flotação estagiada. Isto porque as velocidades de flotação observadas com este carvão são extremamente rápidas e o processo realmente se completa dentro daquele período de tempo.

Este tratamento permite interpretar os resultados obtidos no capítulo 6 : as diferenças observadas podem ser compreendidas com base nas diferenças de velocidade acarretadas pela natureza dos dois materiais ensaiados e pela ação individualizada das variáveis de controle sobre as velocidades de flotação das cinzas ou da matéria carbonosa.

Ficou evidenciado mais uma vez, pelas velocidades de flotação diferentes, que finos naturais e de cominuição são matérias primas intrinsecamente diferentes. As constantes cinéticas verificadas com os finos naturais para as cinzas e para a matéria mineral são bastante diferenciadas, o que já não ocorre com os finos de cominuição. Já os efeitos das variáveis de controle sobre a velocidade de flotação são muito mais pronunciados com os finos de cominuição que com os finos naturais.

A ação de coletores e espumantes sobre o carvão pode ser totalmente explicada em termos cinéticos: a presença do coletor aumenta a velocidade de flotação tanto da matéria carbonosa como das cinzas. Em consequência, as recuperações da massa e de matéria carbonosa são aumentadas e a seletividade do processo (expressa pelo teor de cinzas do flotado) é prejudicada.

O metil-isobutil-carbinol acarreta velocidades de flotação, tanto para as cinzas como para a matéria carbonosa, menores que o óleo de pinho, o que justifica a

sua maior seletividade. Este comportamento pode ser atribuído à ação coletora de algumas das substâncias constituintes do óleo de pinho.

O cloreto férrico, adicionado como depressor da pirita, no nível de 350 g/t aumentou a velocidade de flotação da matéria carbonosa em relação à da matéria mineral. Este efeito é mais notado com os finos naturais. Esta constatação merece mais atenção pois talvez possa explicar a ação depressora do cloreto férrico.

O efeito da diluição de polpa é no sentido de aumentar as velocidades de flotação, até 12% de sólidos, passando a diminuir para valores maiores.

9. CONCLUSÕES

Foi impossível aplicar a técnica do "timed release analysis" aos carvões brasileiros. Isto porque essa técnica foi desenvolvida para carvões europeus e condições totalmente diferentes das nossas. Ela não prevê o uso de coletores e nem de depressores, não prevê o controle do pH e rapidamente se perdia do controle da diluição de polpa. Tivemos pois que adaptar um procedimento simplificado que mantivesse as características fundamentais desejadas.

Não obtivemos sucesso em flotar a fração granulométrica das amostras compreendida entre 28 e 35 malhas Tyler. Em decorrência o limite superior da granulometria ensaiado passou a ser de 35 malhas.

Era nosso intuito inicial considerar o pH da polpa como variável de controle. Entretanto, a extrema acidês das polpas demanda elevados consumos de álcalis, gerando em consequência quantidades substanciais de sais, cujo efeito sobre a flotação não conhecemos.

Os finos naturais tratados por nós tinham 38,11% de cinzas e descartando-se a fração 200# x 0 esse teor caía para 35,41%. O pH da polpa estava sempre entre 4,6 e 4,8. Os finos de cominuição tinham menos cinza e menos enxofre, decorrência do processo de preparação (que numa de suas etapas eliminou as frações mais pesadas). Seu teor de cinzas era de 29,22%, descendo para 27,85% com a eliminação da fração 200# x 0 e gerando polpas de pH entre 5,4 e 5,8.

Os teores de enxofre dos finos naturais eram de 5,89% na fração 35# x 0 e 5,63% na fração 35x200#. O dos finos de cominuição (35# x 0) era de 3,75%.

Os melhores resultados de depressão da matê

ria mineral obtidos com os finos naturais e com os finos de cominuição corresponderam a ensaios realizados com máxima diluição de polpa. Os piores, a ensaios com mínima diluição.

O nível de adição de coletor, pelo menos na faixa ensaiada, não exerce ação sobre os finos naturais. Já sobre os finos de cominuição seu efeito pode ser notado. O depressor de pirita aparentemente não atua sobre a seletividade do processo.

A ação da diluição de polpa é marcante, embora os resultados experimentais não permitam uma conclusão definitiva.

A presença da lama nos finos naturais aumenta o teor de cinzas no flotado e prejudica a recuperação de matéria carbonosa. Já com os finos de cominuição as diferenças são mínimas.

A análise estatística das interações entre estas variáveis mostrou serem elas desprezíveis.

Ensaio comparativos realizados com os finos naturais sem a adição de coletor mostraram ser perfeitamente viável a sua flotação nestas condições, e que o efeito deste reagente é de aumentar a recuperação da matéria carbonosa. Dos espumantes considerados na flotação espontânea dos finos naturais constatou-se ser o MIBC mais seletivo que o óleo de pinho, o que pode ser atribuído à ação coletora deste último.

As condições que favorecem a seletividade em relação à matéria mineral tendem a ser as mesmas que favorecem a seletividade em relação à pirita. Com os finos naturais, os melhores resultados de depressão direta da pi-

rita levaram a uma rejeição de 80,53% do enxofre total contido na alimentação e a um teor de 2,45% de enxofre no flotado. Com os finos de cominuição os teores obtidos foram mais baixos (1,89% a 2,79% de enxofre no flotado) e as melhores condições foram as mesmas constatadas para os finos naturais (baixa adição de coletor, máxima adição de depressor e alta diluição de polpa).

A flotação em duplo estágio levou a resultados comparáveis com os da depressão simples da pirita em termos de recuperação, mas bastante melhores em termos do teor dos concentrados. Foi possível estabelecer um modelo matemático para o enriquecimento de enxofre do flotado.

O tratamento cinético mostrou que finos naturais e de cominuição apresentam velocidades bastante diferentes tanto para a matéria mineral como para a matéria carbonosa.

Ficou evidenciado que os efeitos das variáveis de controle podem ser interpretados em termos do aumento ou diminuição da velocidade de flotação que acarretam.

Os melhores resultados experimentais obtidos com os finos naturais no que se refere à eliminação da matéria mineral correspondem a uma recuperação da matéria carbonosa de 81% se fixado o teor de 20% de cinzas no flotado, ou, alternativamente, a um teor de 17% de cinzas no flotado, se estabelecida uma recuperação da matéria carbonosa de 75%. Estes resultados correspondem a adições de coletor de 1000 g/t e a diluições de 6% de sólidos, independentemente da adição do depressor de pirita.

A rejeição de enxofre nessas condições está entre 61,7 e 63,5%, o que corresponde a teores de enxofre no concentrado entre 3,6 e 3,7%. Em termos de depressão de

enxofre, os melhores resultados obtidos levaram a um teor no concentrado de 1,95%, correspondente a uma rejeição de 76,7%. As condições ótimas de flotação devem se situar em torno destes valores. Comparando com a flotação em duplo estágio, no que se refere à eliminação do enxofre, temos que os melhores resultados comparam com os anteriores em termos de recuperação da matéria carbonosa, mas são superiores em termos de rejeição de enxofre, tendo levado a rejeições de 94,0%, recuperações de matéria carbonosa de 77,7% e teor de enxofre no concentrado de 2,97%.

Com os finos de cominuição os melhores resultados no que toca à eliminação da matéria mineral correspondem a uma recuperação da matéria carbonosa de 88,5% para um teor fixado de 20% de cinzas no flotado, ou, a um teor de 15% de cinzas no flotado se fixada uma recuperação da matéria carbonosa de 75%. Estes resultados foram obtidos com 200 g/t de coletor, 6% de sólidos e independeram também aqui do nível de adição do depressor de pirita.

O teor de enxofre do flotado obtido nessas condições está entre 1,9 e 2,3%, teores correspondentes a rejeições de enxofre entre 59,6 e 69,8%. O melhor resultado com vistas à eliminação da pirita levou a um teor de 1,95% de enxofre no flotado e a 76,7% de rejeição de enxofre.

A figura 37 compara os melhores resultados de cada série de ensaios de flotação com as curvas de lavabilidade do material correspondente. Notam-se diferenças entre os pontos correspondentes a 100% de recuperação devidos a as curvas de lavabilidade se referirem ao material deslamado e os ensaios de flotação não (para os finos naturais é apresentado um ensaio realizado com material deslamado). A seletividade das curvas de lavabilidade é sensivelmente superior em todos os casos à seletividade da flotação.

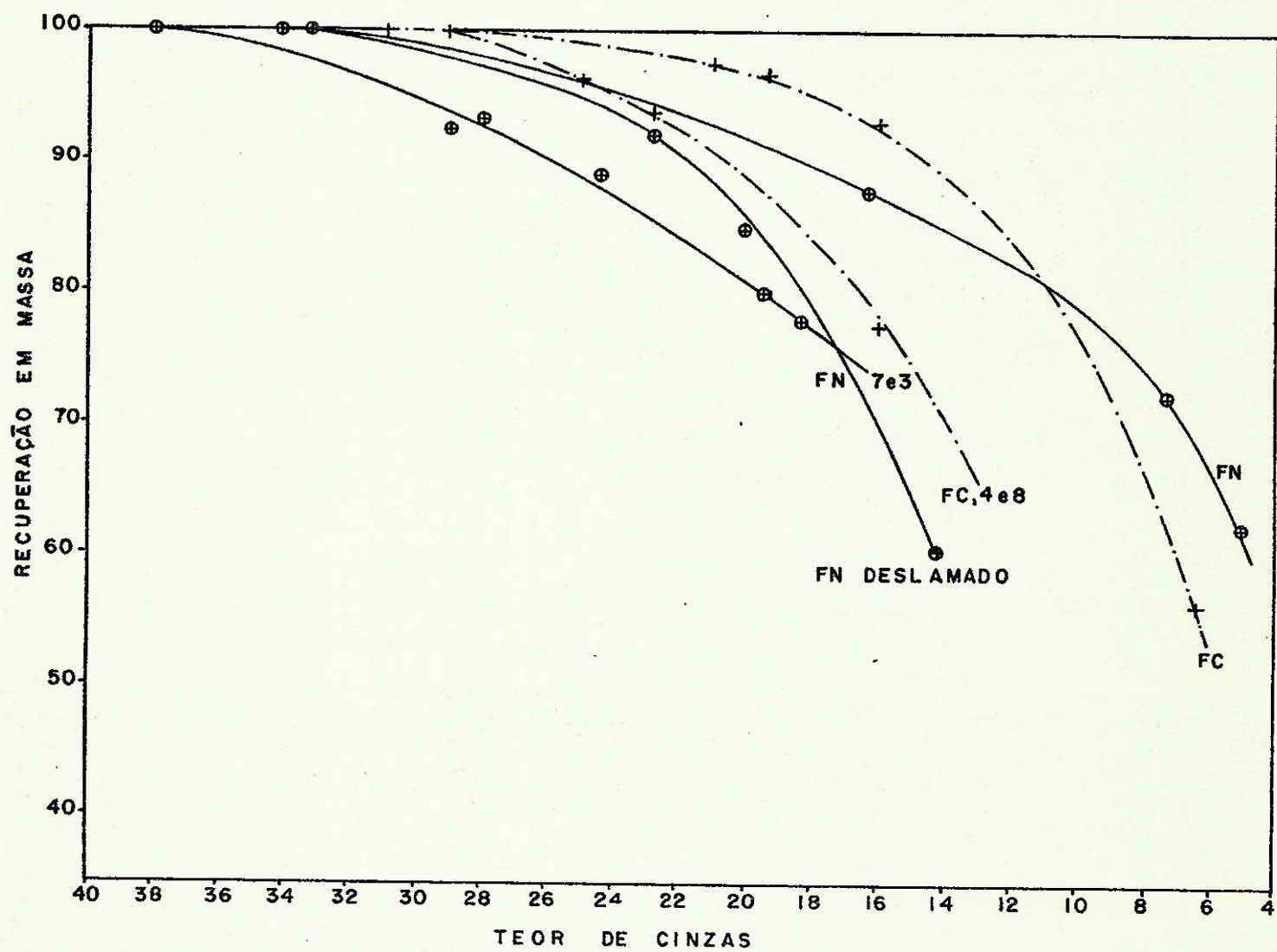


FIGURA 37 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE FLOTAÇÃO E AS LAVABILIDADES DOS MATERIAIS ESTUDADOS

BIBLIOGRAFIA

- 1 - DOWNARD, R.L. Coal Flowsheets. In: INTERNATIONAL TRAINEMENT MEETING, Salt Lake City, Envirotech, 1976.
- 2 - APLAN, F.F. Coal Flotation. In: FLOTATION, Nova York, AIME, 1976, vol. II.
- 3 - BROWN, D.J. Coal Flotation. In: FROTH FLOTATION, Nova York, AIME, 1962.
- 4 - APLAN, F.F. et al. Recent Advances in Coal Flotation, Nova York, 1967.
- 5 - ARBITER, N. e HARRIS, C.C. Flotation Kinetics. In: FROTH FLOTATION, Nova York, AIME, 1962.
- 6 - GEN, L.T. e GAREWAL, K.S. The Coal Industry of India. World Coal, 4 (n.4): 1978, p.58.
- 7 - SOUZA, G.F.S. Perfil Analítico de Carvão, Rio de Janeiro, DNPM, 1973. Série Perfis.
- 8 - Brasil. Ministério das Minas e Energia. Balanco Energético Nacional, Brasília, 1977.
- 9 - HENNIES, W.T. e SALGADO, O.R. Contribuição da Mineração do Carvão para o Abastecimento Energético. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 79, Porto Alegre, Agosto 1977.
- 10 - FABRICIO, J.A.C. Projeto Carvão de Santa Catarina-Retório Integrado - CPRM, Porto Alegre, 1973.
- 11 - KRAHE, P.R. et al. Alternativas de Utilização dos Carvões Brasileiros, FINEP, Rio de Janeiro, 1975.
- 12 - PUTZER, H. The Brazilian Hard Coal Deposits and Optimal Methods of Exploration. In: NATURAL RESOURCES AND DEVELOPMENT, Alemanha, Inst.Sc.Coop., 1976, vol. 4, p.113.
- 13 - NOVOA, R.V. Beneficiamento dos Carvões do Sul do Brasil. In: SIMPÓSIO DO CARVÃO NACIONAL, 39, Curitiba, 1969. Carvão de Pedra, 2 (11,12): 40.
- 14 - NOVOA, R.V. O Lavador de Capivari e sua Função no Beneficiamento do Carvão de Santa Catarina. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE MINERALURGIA, 19, São Paulo, 1970.

- 15 - NOVOA, R.V. Estudo das Possibilidades de Beneficiamento do Carvão de Siderópolis a Diversos Tamanhos Máximos de Britagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METAIS, 239, ABM, Rio de Janeiro, 1968.
- 16 - COSTA, O.A. Crise Energética no Brasil e no Mundo. In: SEMINÁRIO SOBRE ECONOMIA DE ENERGIA, IRS, São Paulo, abril 1978.
- 17 - THIESSEN, G. Composition and Origin of the Mineral Matter in Coal. In: CHEMISTRY OF COAL UTILIZATION, Nova York, J. Willey, 1945, V.I., p.485.
- 18 - SILVA, A.T. Curso de Preparação de Minérios - Concentração por Flutuação (mimeografado) - Grêmio Mineiro-metalúrgico Louis Ensck, Belo Horizonte, 1969.
- 19 - GAUDIN, A.M. Flotation, Nova York, McGraw, 1956.
- 20 - SUTULOV, A. Flotación de Minerales, Concepcion, Un., 1963
- 21 - BAKER, A.F. e MILLER, K.J. Hydrolized Metal Ions as Pyrite Depressants in Coal Flotation: a Laboratory Study. Bureau of Mines, RI 7518, 1971.
- 22 - CAMPBELL, J.A.L. e SUN, S.C. Bituminous Coal Electrokinetics. AIME TRANSACTIONS, 247, 1970, p.111.
- 23 - CAMPBELL, J.A.L. e SUN, S.C. Anthracite Coal Electrokinetics. AIME TRANSACTIONS, 247, 1970, p.120
- 24 - GLEMBOTSKY, V.A. et al. Flotation. Nova York, Primary Sources, 1972.
- 25 - CHAVES, A.P. Estrutura e Comportamento dos Carvões, São Paulo, 1972 (Dissertação de Mestrado).
- 26 - LOISON, R., FOCH, P. e BOYER, A. Le Coke, Principes de la Fabrication, Recherche de la Qualité. Paris, Dunod, 1970.
- 27 - GOMEZ, M. e DONAVEN, D.J. Prediction of Low Temperature Carbonization Properties of Coal in Advance of Mining. Bureau of Mines, RI 7561, 1971.
- 28 - MASON, B. Princípios de Geoquímica. São Paulo, Ed. USP/Polígono, 1971.
- 29 - YANCEY, H.F. e GEER, M.R. The Cleaning of Coal. In: CHEMISTRY OF COAL UTILIZATION, Nova York, J. Willey, 1945.

- 30 - WEN, W.W. e SUN, S.C. An Eletrokinetic Study on the Amine Flotation of Oxidized Coal. AIME Transaction, 262, (2), 1977, p. 174.
- 31 - NAHUYS, J. Resultado obtido da Aplicação dos Princípios da Petrografia Moderna ao Estudo dos Carvões Brasileiros. Porto Alegre, ITERS, Boletim nº 40, 1967.
- 32 - ALPERN, B. e NAHUYS, J. Étude Petrographique et Chimique des Charbons du Brésil. In: CONGRÉS INTERNATIONAL DE STRATIGRAPHIE ET DE GEOLOGIE DU CARBONIFÈRE, 5º, Paris, 1963.
- 33 - GRAY, R.J., RHOADES, A.H. e KING, D.T. Detection of Oxidized Coal and the Effect of Oxidation on the Technological Properties. AIME Transactions, 260, (4), 1976, p.334.
- 34 - EK, C. Contribution a l'Etude de la Cinétique de la Flottation. Faculté des Sciences Appliquées, Liège, 1967.
- 35 - IMAIZUMI, T. e INOUE, T. Kinetic Consideration of Froth Flotation. In: INTERNATIONAL MINING CONGRESS, 5º, Cannes, 1963. Proceedings Pergamon, p.581, 1965.
- 36 - TOMLINSON, H.S. e FLEMING, M.G. Flotation Rate Studies. In: INTERNATIONAL MINING CONGRESS, 5º, Cannes, 1963. Proceedings Pergamon, p.563, 1965.
- 37 - SUN, S.C. e ZIMMERMAN, R.E. The Mechanism of Coarse Coal and Mineral Froth Flotation. AIME Transactions, 187, p.616, 1950.
- 38 - MILLER, K.J. Desulfurization of Various Midwestern Coals by Flotation. Bureau of Mines, RI 8224, 1977.
- 39 - CAVALLARO, J.A. e DEURBROUCK, A.W. Froth Flotation Washability Data of Various Appalachian Coals Using the Timed Release Analysis Technique. Bureau of Mines, RI 6652, 1965.
- 40 - MINING CHEMICAL HANDBOOK. Mining Chemical Handbook. American Cyanamid Co., 1976.
- 41 - ZIMMERMAN, R.E. Froth Flotation. In: COAL PREPARATION, Nova York, AIME, 1968.

- 42 - India. Central Fuel Research Institute. Annual Report. Danbhad, 1975.
- 43 - GAYLE, J.B., PERRY, R.E. e EDDY, W.H. Kerosine Flotation of Coal. Bureau of Mines, RI 5528, 1959.
- 44 - CHERNOSKY, F.J. Evaluation of Coal Flotation Frothers on a Yield-selectivity-cost Basys. AIME Transactions, 1963 p.24.
- 45 - BELUGOU, P. Aspects Pratiques des Recherches du Cherchar sur le Traitements des Schlamms par Flottation. Annales des Mines de Belgique, número especial, pg. 143, junho de 1956.
- 46 - MILLER, K. J. Flotation of Pyrite from Coal: Pilot Plant Study. Bureau of Mines, RI 7822, 1973.
- 47 - MASSACCI, P. Sulla Flottazione del Carbone in Acqua di Mare: Studio Sperimentale. Resoconti del' Associazione Mineraria Sarda, 73 (4): 1968.
- 48 - MILLER, K.J. Coal Pyrite Flotation: a Modified Technique Using Concentrated Second Stage Pulp. Bureau of Mines, TPR 91, 1975.
- 49 - GRAY, R.J., SCHAPIRO, N. e DALE COE, G. Distribution and Forms of Sulphur in a High Volatile Pittsburgh Seam Coal. AIME Transactions, p.113, 1963.
- 50 - MILLER, K.J. e BAKER, A.F. Flotation of Pyrite from Coal. Bureau of Mines, TPR 51, 1972.
- 51 - MILLER, K.J. Coal Pyrite Flotation. AIME Transactions, 258 (1) 1975, p.30.
- 52 - DEURBROUCK, A.W. Improved Coal Preparation Techniques Produce Cleaner Coals at Higher Yields. Coal Age, 8 (8), 1975. p.138.
- 53 - MANWARING L.W. e DEURBROUCK, A.W. Coal Preparation. Mining Engineering, 24 (2), 1972, p.111.
- 54 - DAVIS, H. The Changing Scene in Preparation. Coal Age, 83 (1) 1978, p.58.
- 55 - MILLER, K.J. Desulfurization of Various Midwestern Coals by Flotation. Bureau of Mines, RI 8262, 1978.

- 56 - MILLER, K.J. Flotation in Combination with Hydrocyclones and Other Devices. Mining Congress Journal, 1969, p.28.
- 57 - GY, P. Echantillonnage des Gisements de Charbon de Charqueadas, Leão et Candiota (Rio Grande do Sul). PAA, São Paulo. Relatório interno, 1976.
- 58 - GY, P. Theorie et Pratique de L'Echantillonnage des Matières Morcelées, Cannes, Ed. PG, 1975.
- 59 - OTTEY, D.J. Gy's Sampling Slide Rule. Separata de Revue de L'Industrie Minerale'.
- 60 - CAMPOS, A.R., ALMEIDA, S.L.M. e SANTOS, A.T. Flotação de Carvões Brasileiros. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 19, Poços de Caldas, 1977.
- 61 - MORONEY, M.J. Comprendre L'Estathistique. Marabout, Paris, 1968.