

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM

BENEFICIAMENTO DE CARVÕES SUL BRASILEIROS -  
FLOTAÇÃO POR ESPUMA

por

ELBA CALESSO TEIXEIRA  
Químico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia dentro  
do Programa de Pós-Graduação

Porto Alegre, agosto de 1979

BENEFICIAMENTO DE CARVÕES SUL BRASILEIROS -  
FLOTAÇÃO POR ESPUMA

D I S S E R T A Ç Ã O

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM - como parte dos  
requisitos para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA METALÚRGICA

por

ELBA CALESSO TEIXEIRA

QUÍMICO

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientadores:

Dr. JORGE RUBIO  
Doutor em Química

Dr. Anildo Bristotti  
Doutor em Engenharia

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Anildo Bristotti  
PPGEMM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Benour C. Bittencourt  
I. Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dra. Joanna Nahuys  
Fundação Ciência e Tecnologia - CIENTEC - Porto Alegre

Dr. Jorge Rubio  
PPGEMM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METALURGIA E MATERIAIS

Coordenador: Dr. ARNO MÜLLER

A meus pais

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

Ao Professor Jorge Rubio, pela orientação e incen  
tivo a concretização deste trabalho.

Aos Professores Anildo Bristotti, Boris Alpern,  
Joanna Nahuys e a Eng<sup>a</sup> Yvonice Campos, pelo assessora  
mento técnico.

À IBRACOQUE e CIENTEC, pela possibilidade de rea  
lização desta pesquisa em seus laborat<sup>o</sup>rios.

À CAPES e FAPERGS, pelo suporte financeiro duran  
te o período de Pós-Graduação.

## R E S U M O

Consta o presente trabalho do estudo das características de flotabilidade de carvões da camada Barro Branco, SC, e da Jazida de Leão, RS.

São apresentadas as variáveis de flotação para o carvão da camada Barro Branco, avaliadas as condições que ofereceram a melhor eficiência na separação e estas foram aplicadas ao carvão de Leão.

Estudos petrográficos que consistiram na determinação do "Rank" e da distribuição e quantidade da matéria inorgânica disseminada na matéria orgânica, permitiram complementar a explicação das diferenças dos resultados de flotação obtidos para os dois carvões examinados.

## A B S T R A C T

The present study is addressed to study the characteristics in flotation response between two different coals; one from Camada Barro Branco, Santa Catarina and another from Leão mine, Rio Grande do Sul.

The influence of the various parameters regulating the flotation of the coal from Camada Barro Branco was determined and the best conditions applied to that coal from Leão.

Petrographic studies which allowed the determination of the Rank and distribution plus the amount of the inorganic material incorporated in the organic one, permitted to offer explanations of the distinct flotation behaviour of the two coals.



## Í N D I C E

I - Introdução .....	01
II - Revisão Bibliográfica .....	04
a. Conceitos Fundamentais de Flotação .....	04
b. Generalidades sobre Flotação de Carvão..	11
III - Procedimento Experimental .....	21
a. Materiais .....	21
b. Técnicas utilizadas .....	22
IV - Resultados e Discussão .....	52
a. Carvão da Camada Barro Branco .....	52
b. Carvão de Leão .....	54
V - Conclusões .....	60
VI - Sugestões para futuros Trabalhos .....	62
Bibliografia .....	63
Apêndice .....	67

## I - I N T R O D U Ç Ã O

O Beneficiamento do carvão é um termo que pode significar desde uma simples operação de cominuição primária até uma purificação por meios químicos, cujo exemplo é o processo "Meyers" utilizado para a dissolução do material pirítico presente regularmente no carvão.

A grande maioria dos métodos de beneficiamento de carvão adotada no mundo é baseada na diferença de densidades específicas entre o carvão e a matéria inorgânica inerte (cinza) que o acompanha. Os processos mais utilizados são: jigagem, processo fundamentado em aceleração diferencial e sedimentação impedida; sedimentação em meios densos artificiais, mesas vibratórias, hidrociclones, etc. A eficiência destes métodos para o material fino (<500 microns) é muito baixa e precisa-se de novos processos de beneficiamento para estes finos, os quais são jogados fora, como inaproveitáveis. Entre outros, a flotação por espuma talvez seja a melhor solução para o problema de beneficiamento dos finos e hoje está sendo incorporada em quase toda as plantas modernas de preparação do carvão. No caso brasileiro, a necessidade de beneficiar o carvão é imperiosa, antes da utilização final, em virtude de alguns aspectos desfavoráveis que os carvões brasileiros apresentam entre os quais:

- alta proporção de matéria inorgânica estéril (cinza)
- teores relativamente elevados de enxofre
- alta proporção de finos em algumas plantas beneficiadoras.

O Eng<sup>o</sup> Theo Schieder, da Bergbauforschung GMBH, especialista em beneficiamento e preparação de carvões disse: "após ter conhecimento dos carvões brasileiros, a única possibilidade de aumentar o rendimento do esquema de beneficiamento dos carvões seria a utilização do processo de flotação com espuma". Por este processo, são produzidos 14 milhões de toneladas anuais de carvão metalúrgico na Alemanha (1).

A flotação começa gradualmente a ser considerada em carvões catarinenses para recuperar os finos de lavra e cominuição ( $<0,3$  mm) para serem usados em:

- a) fabricação de coque de fundição em fornos "beehive";
- b) concentrar os finos, reduzindo seu teor de cinza e enxofre.

Entretanto, a flotação por espuma apresenta diversos problemas que afetam sua eficiência e existe, por conseguinte, uma grande necessidade de trabalhos sistemáticos de flotação nos distintos carvões nacionais.

O presente trabalho consta de um estudo das características de flotabilidade de carvões sul brasileiros.

Iniciou-se estudando o beneficiamento por flotação do carvão metalúrgico da Camada Barro Branco, pela Indústria Brasileira de Coque S/A. em Lauro Müller, S.C.

A Ibracoque beneficia o carvão bruto da Camada Barro Branco de aproximadamente 55,0% de cinzas, produzindo basicamente um carvão pré-lavado de 30,0% de cinzas e um carvão metalúrgico de 11,0% de cinzas. O carvão pré-lavado é comercializado pela USIMINAS e COSIPA e o carvão de 11,0% de cinzas é consumido pela própria empresa, na produção de coque de fundição 100% nacional.

A coleta de amostra de carvão da Camada Barro Branco foi realizada na alimentação da planta de flotação após ter sido beneficiada em "jig", ciclone, mesas concentradoras e peneiras vibratórias. Seu teor médio em cinzas é de 21,0%.

As variáveis do processo de flotação estudadas foram: granulometria, densidade de polpa, pH e seletividade dos coletores e espumantes.

Os resultados obtidos para o carvão da Camada Barro Branco possibilitaram otimizar o processo de flotação industrial, resultando em significante redução de custo do processo.

Efetuu-se este mesmo estudo para o carvão não metalúrgico de Leão, R.S., também pré-beneficiado em ciclone, com um teor de cinza de aproximadamente 17,0%. Identificaram-se os parâmetros de controle que, adaptados às condições de operação possibilitassem melhoria no processo.

De um modo geral, os resultados em rendimento e teor de matéria carbonosa nos concentrados obtidos com o carvão de Leão, R.S., foram inferiores aos do carvão da Camada Barro Branco.

Como uma forma de explicar esta diferença de comportamento recorreu-se a um estudo petrográfico, que consistiu basicamente na identificação e medida da distribuição de matéria orgânica pura, de matéria mineral pura e dos mistos (matéria orgânica, argila e pirita).

Os resultados obtidos mostraram que o carvão de Leão apresenta 47,8% de matéria orgânica pura e 42,9% de mistos, enquanto que o carvão da Camada Barro Branco possui 67,8% de matéria orgânica pura e 24,8% de mistos.

Conclui-se que as diferenças encontradas são os resultados de, pelo menos, dois fenômenos diferentes; um devido ao "Rank" e o outro à diferença em grau de liberação da matéria carbonosa.

## II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### a. - Conceitos Fundamentais de Flotação

De um modo geral o sistema de flotação pode ser analisado em dois aspectos fundamentais: o primeiro - refere-se às condições termodinâmicas ótimas que regulam a efetividade e seletividade do processo e o segundo refere-se à cinética do processo global.

#### 1º Aspectos Termodinâmicos

O fenômeno de união da bolha à superfície do sólido pode ser explicado pela equação de Young (2). Esta representa a condição de equilíbrio no contato sólido líquido e gás (figura 1)

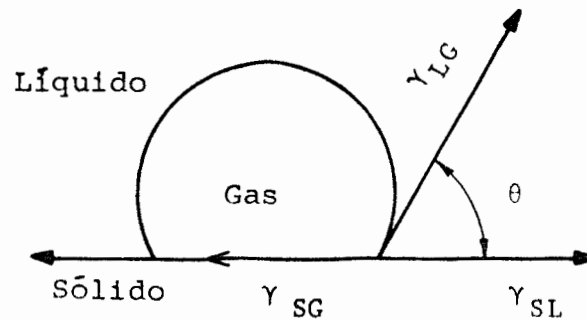


Figura 1

No equilíbrio de forças,  $\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \dots (1)$

Onde  $\gamma_{SG}$ ,  $\gamma_{SL}$  e  $\gamma_{LG}$  são as tensões interfaciais dos sólido - gás, sólido-líquido e líquido-gás, e  $\theta$  o ângulo de contato sólido-gás medido através do líquido.

A variação de energia livre por unidade de área na junção da bolha à superfície sólido é dada pela equação:

$\Delta G (\text{Flotação}) = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \dots (2a)$ , conforme figura 2.

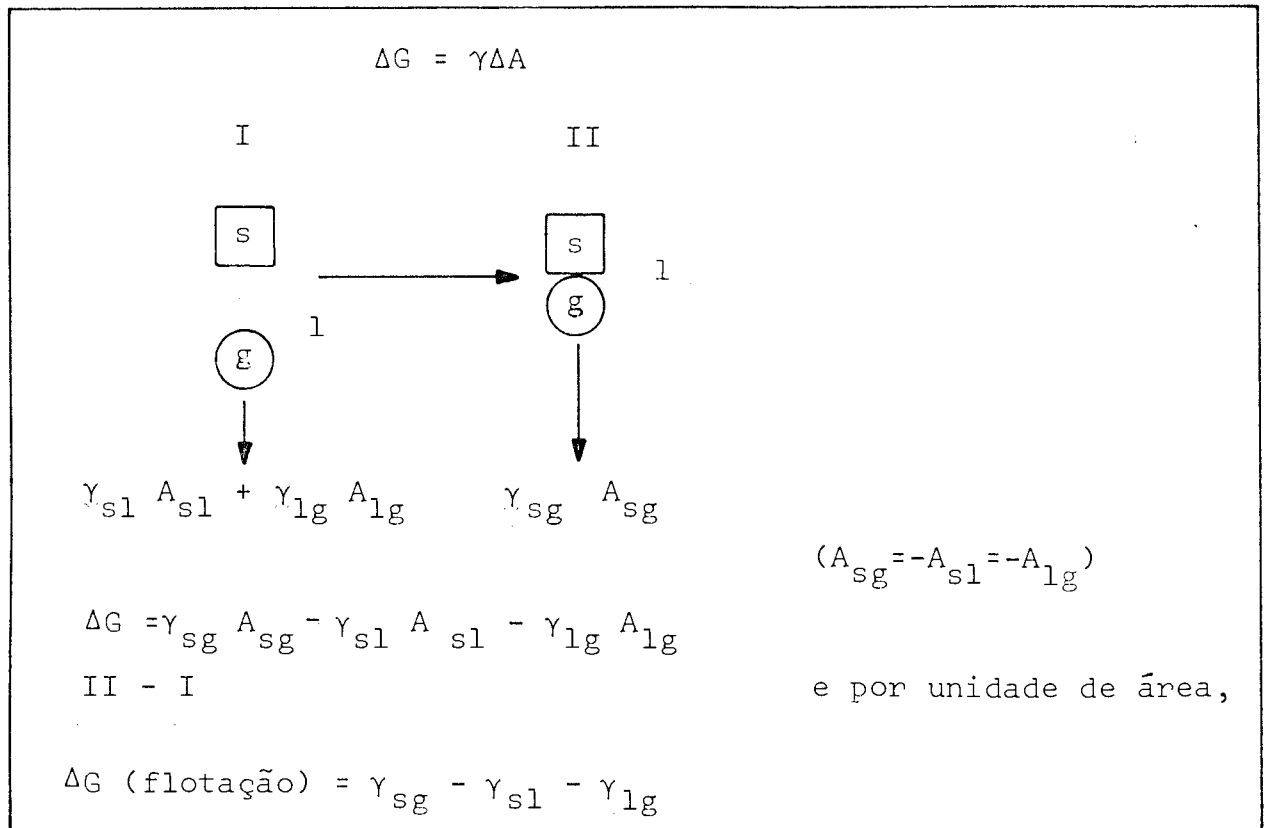


Figura 2 - Variação da energia livre no processo de adesão-bolha-partícula.

Aplicando-se a equação de Young (2) tem-se:

$$\Delta G = \gamma_{lg} (\cos \theta - 1) \dots (2b)$$

De acordo com esta equação, para qualquer valor finito de ângulo de contato tem-se um decréscimo de energia livre, na junção da partícula mineral à bolha de ar. Isto significa que este contato é termodinamicamente espontâneo e favorece o processo de flotação. Superfícies que mostram tais características são ditas hidrofóbicas. Por outro lado devido a natureza polar da maioria das superfícies dos minérios, eles são molhados preferencialmente pela água e por conseguinte o ângulo de contato (teórico) é zero (sólidos hidrofílicos). A tabela I apresenta exemplos de minerais hidrofóbicos e hidrofílicos junto a seus respectivos ângulos de contato. A molhabilidade dos sólidos pode ser controlada através da adsorção de coletores, os quais modificam as tensões in

terfaciais de modo que o ângulo de contato torna-se finito. A variação da tensão interfacial de qualquer interface é dada pela equação de Gibbs (3):

$$d\gamma_{(T,P)} = - \sum_i \Gamma_i d\mu_i \dots (3a)$$

onde  $\Gamma_i$  é o excesso superficial (densidade de adsorção) das espécies  $i$  em moles por centímetro quadrado e  $\mu_i$  o potencial químico das espécies  $i$ . Isto pode ser reescrito como:

$$d\gamma = - RT \sum_i \Gamma_i d \ln a_i \dots (3b) \text{ onde, } a_i \text{ é a atividade das espécies } i \text{ e } R \text{ é a constante dos gases.}$$

O controle de molhabilidade no sistema de flotação pode ser interpretado em termos das equações (1) e (3).

	Minérios	$\theta$ , grau
hidrófobos	talco	85
	molibdenita	40 - 60
	enxofre	88
	galena	30 - 50
	carvão	30 - 60
hidrofílicos	quartzo	5 - 10
	calcita	5 - 10
	alumina	0 - 10

Tabela I - Ângulos de contato sólido-líquido-ar para distintos minérios e carvões.

#### Fenômeno de Adsorção no Processo de Flotação

Supondo a equação seguinte como descrição do processo de adsorção do coletor na interface sólido-líquido (4):



no equilíbrio:  $K = \frac{[A \begin{array}{c} | \\ B \\ | \end{array}]}{[B]} \dots (5)$  como

$$\Delta G^{\circ} = - RT \ln K \dots (6)$$

$K = e^{-\Delta G^{\circ}/RT} \dots (7)$ , onde  $\Delta G^{\circ}$  é a variação da energia livre total do sistema no processo de adsorção ( $\Delta G^{\circ}_{\text{adsorção}}$ ).

As distintas contribuições das forças de interação - entre o adsorbato (coletor) e a interface sólido-líquido - podem ser as seguintes (4):

$$\Delta G^{\circ}_{\text{adsorção}} = \Delta G^{\circ}_{\text{eletrostático}} + \Delta G^{\circ}_{\text{químico}} + \Delta G^{\circ}_{\text{ligação hidrofóbica}} + \Delta G^{\circ}_{\text{solvatação}} + \Delta G^{\circ}_{\text{ligação hidrogênio}} + \dots (8)$$

Dependendo do sistema estudado, o  $\Delta G^{\circ}_{\text{adsorção}}$  dependerá geralmente de uma ou mais destas contribuições. Em geral os termos mais empregados no processo de adsorção de um coletor são  $\Delta G^{\circ}_{\text{eletrostático}}$  e  $\Delta G^{\circ}_{\text{químico}}$ . No caso do carvão,

$\Delta G^{\circ}_{\text{adsorção}}$  será dado principalmente pela contribuição de dois termos:

$$\Delta G^{\circ}_{\text{eletrostático}} \text{ e } \Delta G^{\circ}_{\text{ligação hidrofóbica}}$$

$\Delta G^{\circ}_{\text{eletrostático}}$  é um termo que é dependente da natureza da dupla camada elétrica (5). Em geral, a adsorção do coletor ocorre quando a superfície e o coletor são de cargas opostas.

No caso do carvão, ele apresenta normalmente uma carga negativa devido aos grupos ionizáveis (fenóis, carboxílicos). Portanto, um coletor do tipo catiônico será adsorvido por este tipo de interação. Por exemplo, aminas (coletores catiônicos) são conhecidas por terem ação coletora de carvões (6)



Por outro lado, o valor  $\Delta G^{\circ}$  ligação hidrofóbica é importante no caso do carvão porque ele é eminentemente hidrófobo e pode interagir com coletores de tipo oleoso como por exemplo óleo diesel e querosene. Este tipo de ligação apesar de ser fraco ( $\Delta G^{\circ}$  ligação hidrofóbica  $\sim 0,3$  Kcal/mol)(7) alcança valores consideráveis pela dimensão da cadeia de carbonos do coletor (normalmente 20 grupos de  $\text{CH}_2$ ). Na realidade a ligação hidrofóbica é a resultante de um efeito entrópico mais que uma ligação como tal. A água estrutura-se ao redor das entidades hidrófobas, seja sólido (carvão) ou líquido (querosene), tem uma entropia muito baixa. Quando as duas entidades hidrofóbicas juntam-se, a água libera-se aumentando a entropia geral do sistema (8).

## 2º Aspectos Cinéticos

A cinética de flotação está relacionada com a velocidade com que as partículas são transferidas da suspensão para o concentrado, que é o produto do processo.

Para analisar a cinética de flotação dois métodos básicos tem sido usados.

1º - Trata de estudar a velocidade das partículas dentro da célula, considerando esta como um processo integral.

Considerando a célula de flotação análoga ao reator químico, a reação química que, por analogia, pode representar tal situação seria (9):



e a equação de velocidade seria da seguinte forma:

$$\frac{dc}{dt} = - K C_b^m C^n \dots (10) \quad \text{onde}$$

$C_b$  e  $C$  são as concentrações do material flotável  
 $m$  e  $n$  são números inteiros

K é a constante de velocidade

t é o tempo

Quando a concentração da bolha é mantida constante a equação se reduz para:

$$\frac{dc}{dt} = - K' C^n \dots (11)$$

O expoente n representa a ordem da equação de velocidade.

Analogicamente à reação química, a ordem de equação de velocidade tem sido relacionado ao número de partículas aderindo simultaneamente à cada bolha de ar.

Existem 3 situações diferentes que explicam os diversos comportamentos cinéticos (10).

- a) "Flotação Livre" ocorre em polpa muito diluída, quando as bolhas de ar estão apenas escassamente recobertas de partículas minerais. Neste caso a velocidade de flotação dependeria principalmente da frequência de colisão partícula-bolha e consequentemente a equação de velocidade seria de 1ª ordem.
- b) "Flotação inibida" ocorre em polpa concentrada, 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 serem capazes de flutuar. A velocidade total de flotação seria simplesmente dependente da velocidade de aeração e se esta é mantida constante a velocidade de flotação seria de ordem zero com respeito à concentração de partículas.
- c) "Flotação Transicional" ocorre em qualquer condição entre esses dois extremos. Neste caso, a velocidade de flotação dependeria da concentração

de partículas flotáveis e da capacidade das bolhas em aceitar estas partículas. Neste caso a ordem da equação de velocidade não pode ser estabelecida previamente. Entretanto, é de se esperar diferir da relação de 1ª ou zero ordem.

2º Método trata da subdivisão do processo em estágios parciais, sendo que cada um destes é controlada por um número de variáveis identificáveis.

A inspeção da célula de flotação mostra a presença de duas zonas distintas, isto é, a polpa que ocupa o máximo de volume da célula e a espuma que está acima da polpa. A zona da polpa consiste de partículas em suspensão que postas em contato com as bolhas são coletadas seletivamente e transferidas para a zona da espuma. Uma vez tenham sido transferidas para a zona da espuma elas permaneceriam aí até serem removidas para o concentrado. Entretanto, partículas já na espuma podem retornar à polpa pelo mecanismo de drenagem e colapso da espuma (Froth drainage and collapse) (11, 12,13)

Os estágios que devem ser seguidos em ordem para transferir a partícula da polpa para a espuma são:

- a) Bolhas e partículas devem se aproximar intimamente. Este estágio é chamado de "colisão"(11,14,15)
- b) Uma vez que a colisão tenha acontecido, forças superficiais tornam-se ativas e aumenta (ou impede) a destruição da película líquida restante, ainda-separando a partícula da bolha. Este estágio é chamado de "adesão".
- c) Uma vez que a adesão tenha acontecido, partículas são capazes de permanecerem nesta condição até - que a bolha alcance a zona da espuma. Este estágio é chamado de "levitação" (11).

## b. - Generalidades sobre Flotação de Carvão

O processo de flotação por espuma\* como operação - unitária destinada a recuperação de finos (<500 microns) é uma prática muito antiga, mas sua utilização a grande escala é recente (16). O fato de incorporar a flotação no circuito de beneficiamento de carvões obedece a razões circunstanciais no plano econômico, também como a razões estabelecidas por organizações de proteção ecológica (redução de enxofre e aproveitamento de finos). No processamento de carvões metalúrgicos a flotação é praticamente uma necessidade. Para o caso do "carvão vapor" uma redução do conteúdo de cinzas por flotação trás muitas vantagens. Tecnicamente o processo de flotação é muito eficiente em carvões com baixa quantidade de matéria inorgânica e muito complexo em carvões de baixo "Rank", oxidados e com alto conteúdo de cinzas (16). Dentro de muitos fatores que influenciam a eficiência da separação carvão-matéria inorgânica por flotação destacam-se os seguintes: "Rank", oxidação superficial, pH, conteúdo de cinzas, tipos e quantidades de reagentes (coletores e espumantes). Analizaremos brevemente a influência destes (e outros) fatores na flotação de carvões.

### "Rank"

O carvão comparativamente a outros minerais é mais fácil de flotar, em virtude de sua flotabilidade natural. Este conceito está ligado ao conceito de hidrofobicidade que implica uma baixa afinidade pela água.

Em geral, todo material (sólido ou líquido) contendo hidrocarbonetos não apresenta uma interação manifesta com a água.

Segundo Brady e Gauger (17) a hidrofobicidade natural é diferente para carvões de distinto "Rank". Estes

\* o termo flotação por espuma, refere-se à flotação clássica e não às derivações modernas como são: flotação aglomerante ou por emulsão.

autores usaram o ângulo de contato na interface sólido/líquido/ar como meio de avaliação da hidrofobicidade. Experimentos subsequentes indicaram que o ângulo de contato e a flotação de carvão variam regularmente com o conteúdo de carbono em base seca, livre de matéria mineral (18,19). Esta relação é mostrada na figura 3.

O ângulo de contato máximo é apresentado para os betuminosos baixo voláteis, decrescendo para os antracitos. O linhito e os carvões pouco evoluídos tem um caráter fortemente hidrofílico em virtude de sua associação com a matéria inorgânica. Na transição de linhito e "brown coal" para betuminoso, a estrutura química do carvão muda devido a eliminação dos grupos polares e decréscimo de matéria inorgânica, aumentando desta forma a hidrofobicidade do carvão. Brown(18) assinala que os carvões de máxima flotabilidade são aqueles que contem 89% de carbono. Acima de 89% de carbono existe uma maior ordenação dos átomos, o que leva a uma diminuição da flotabilidade.

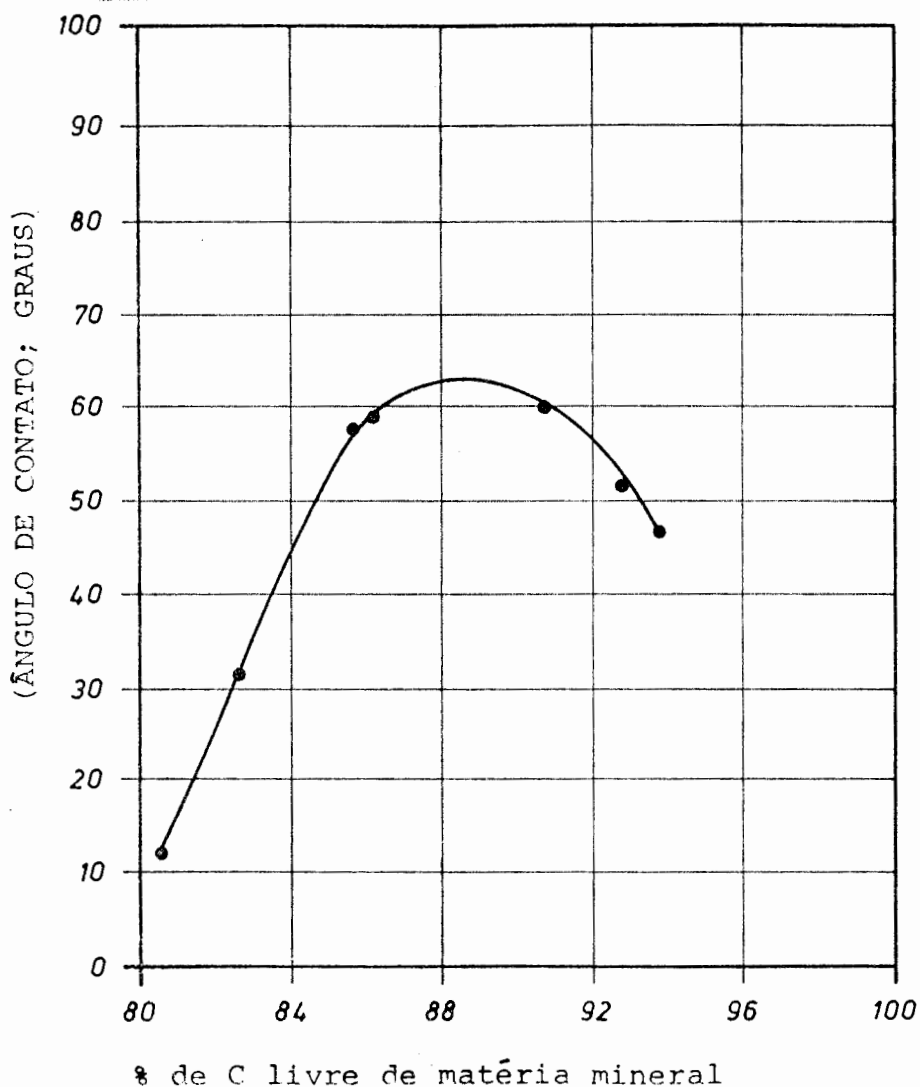


Figura 3 - Variação do ângulo de contato com o conteúdo de carbono do carvão

### Reagentes

São substâncias químicas que se utilizam com objetivos distintos, mas que em conjunto facilitam a adsorção seletiva do coletor e a remoção da fração flotada.

### Coletores

Tal como foi citado anteriormente a função do coletor é de promover o contato da partícula à bolha através de modificações nas características de molhabilidade. Os coletores usados para a flotação de carvão são reativos apolares, entre os quais os mais utilizados são hidrocarbonetos de aproximadamente 20 átomos de carbono (baixa viscosidade). Entre os mais usados comercialmente, podem citar-se: óleo diesel, que rosene e fuel oil. Como estes reativos são apolares, eles tem uma baixa solubilidade em água. Isto limita o uso de uma alta concentração de coletor. Alguns autores resolveram o problema adicionando o coletor orgânico na forma de emulsão(20). O mecanismo de reação dos coletores apolares nas diferentes interfaces é eminentemente devido a interações do tipo físico, como são as forças de van der Waals e as hidrofóbicas. Consequentemente, os coletores como os citados deveriam, em princípio, ser seletivos para os sólidos hidrófobos. Isto constitui o fundamento de separação do carvão (hidrófobo) e matéria inorgânica (hidrofílica).

### Espumantes

O principal objetivo do espumante é estabilizar a ligação bolha de ar à partícula. Os espumantes são reagentes químicos que operam diminuindo a tensão superficial da água permitindo a estabilização da espuma contendo o material a ser flotado. Os espumantes mais utilizados são: Metil Isobutil Carbinol (M.I.B.C.), óleo de pinho e ácido cresílico. Pelo fato de serem substâncias com poder tensoativo existem distintas opiniões quanto às propriedades coletoras dos espumantes (adsorção interface sólido-líquido). MIBC, óleo de pinho e ácido cresílico tem propriedades coletoras para certos tipos de carvões (16).

O Sun (21) pesquisou a eficiência de diversos espumantes na flotação do carvão, através das medições de índices da espuma. Utilizando o hexanol como padrão, concluiu que o MIBC foi o mais efetivo em relação ao óleo de pinho e ácido cresílico. Outras conclusões do trabalho foram a grande variação - entre os distintos óleos de pinho e ácidos cresílicos testados. As melhores condições encontradas para óleo de pinho foram para pH neutro ou alcalino (21).

#### Modificadores

Os modificadores são substâncias químicas que influenciam a separação, por flotação, atuando no processo de adsorção seletiva do coletor. Se os modificadores impedem a adsorção do coletor no material estéril, (material não desejado) denominam-se reagentes depressores. No caso de flotação do carvão é possível depressar o material silicoso com silicato de sódio ou hexametáfosfato de sódio. Se o objetivo é a flotação reversa, ou seja, depressar o carvão e flotar o material silicoso, o carvão pode ser depressado eficientemente por meio de amidas, dextrinas e colóides naturais (22). Sais inorgânicos, como cloreto estânico (23), permanganato de potássio, etc. são eficientes depressores do carvão atuando através do processo de oxidação (16). Experiências feitas com amostras puras de carvão com um teor muito baixo de cinza, verificaram que a oxidação da superfície das partículas do carvão, embora insignificantes, reduz consideravelmente a eficiência do processo - (24,25).

Por outro lado, se os modificadores promovem a adsorção do coletor no material desejado denominam-se agentes ativadores. No caso da flotação do carvão os sais inorgânicos, como cloreto de sódio (altas concentrações) atuam como ativadores da adsorção de coletores apolares na superfície do carvão e como consequência aumentando a quantidade do material flotado (flotação salina) (26).

O mecanismo da flotação salina é fundamental na redução do potencial de repulsão que se estabelece como consequência

da existência de uma dupla camada elétrica na interface sólido-líquido. A redução do potencial eletrocinético das partículas pelos eletrólitos inorgânicos é muito conhecido e constitui o fundamento do processo de coagulação de colóides(26) Como resultado da redução do potencial interfacial a eficiência das colisões bolha-partícula é marcadamente superior.

A variação do pH da solução em muitos sistemas, onde a variação do  $\text{OH}^-$  ou  $\text{H}^+$  influenciam a magnitude da dupla camada (ou a química das soluções dos adsorbatos), constitui um fator fundamental no processo de adsorção de um determinado coletor. Especificamente, no caso do carvão, a variação do pH no sistema é fundamental na flotação porque os  $\text{H}^+$  ou  $\text{OH}^-$  são íons determinantes de potencial. Por exemplo, altos valores de pH aumentam a eletronegatividade do carvão e reduzem a flotação (18).

#### Oxidação superficial

Basicamente a oxidação tem um efeito prejudicial sobre a hidrofobicidade de carvão. Brown (18) indica que todos os litotipos são oxidados quando expostos à atmosfera, sendo o vitrênio mais reativo, provavelmente seguido pelo clarênio, durênio e fusênio.

Segundo Aplan (16) antracito e linhito são pouco afetados em sua superfície pela oxidação, mas a recuperação de carvões betuminosos decresce com o aumento do grau de oxidação. Coletores catiônicos, tais como amina, tem sido usado para a flotação de carvões oxidados.

Estudos feitos por Wen e Sum (27), com amostras oxidadas durante vários períodos de um carvão Alto Volátil americano, permitiram concluir que, conforme evolui a oxidação, aumenta o potencial eletrocinético do vitrênio em valor negativo como é mostrado na figura 4.

Estes mesmos autores estabeleceram uma correlação entre ângulo de contato e potencial eletrocinético (uma medida da magnitude da dupla camada) de carvão oxidado conforme a figura 5. Os resultados mostram que o ângulo de contato decresce-



com o aumento da oxidação e diminui progressivamente com o aumento negativo do potencial eletrocinético.

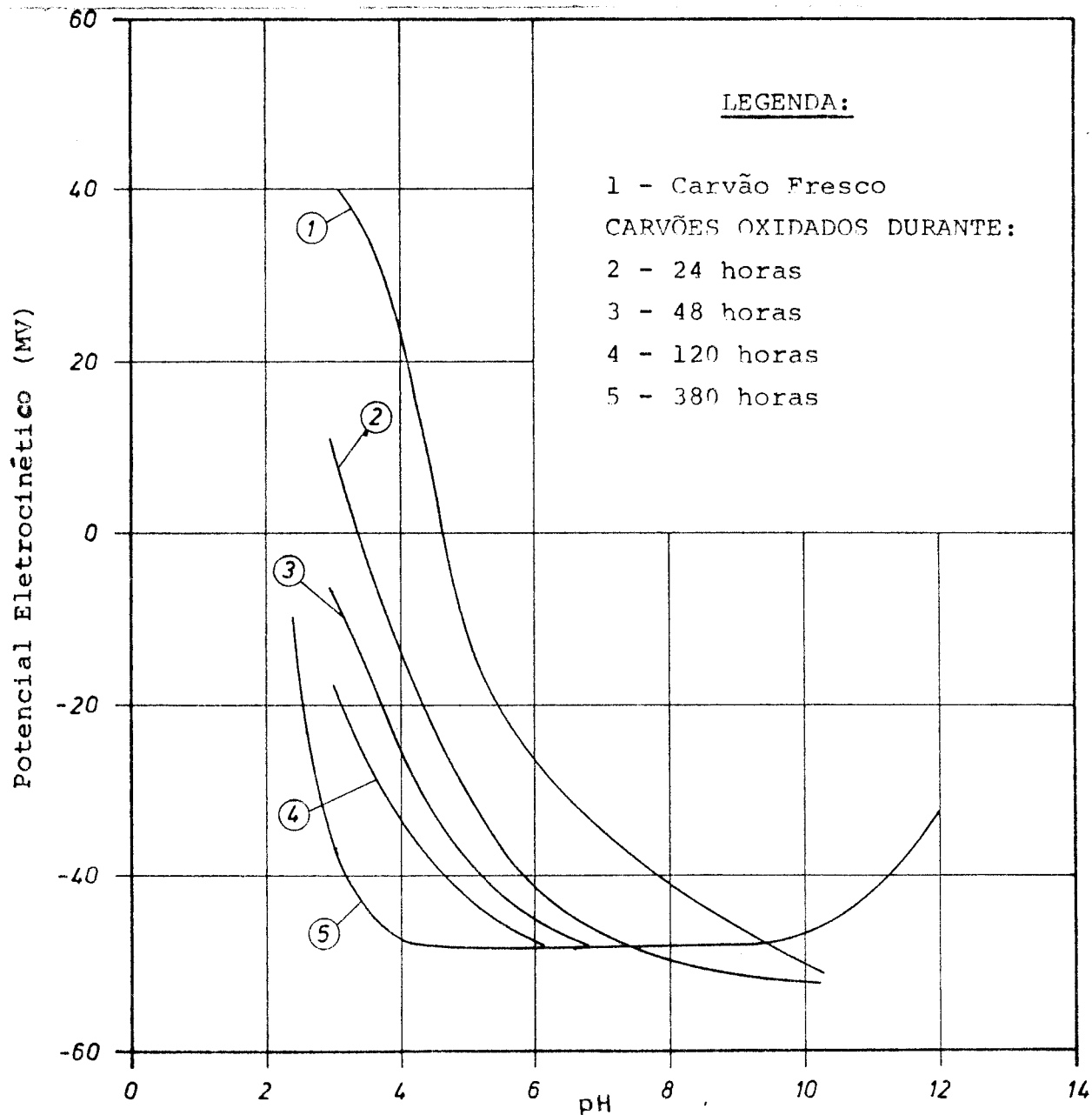


Figura 4 - Efeito da oxidação sobre o potencial eletrocinético

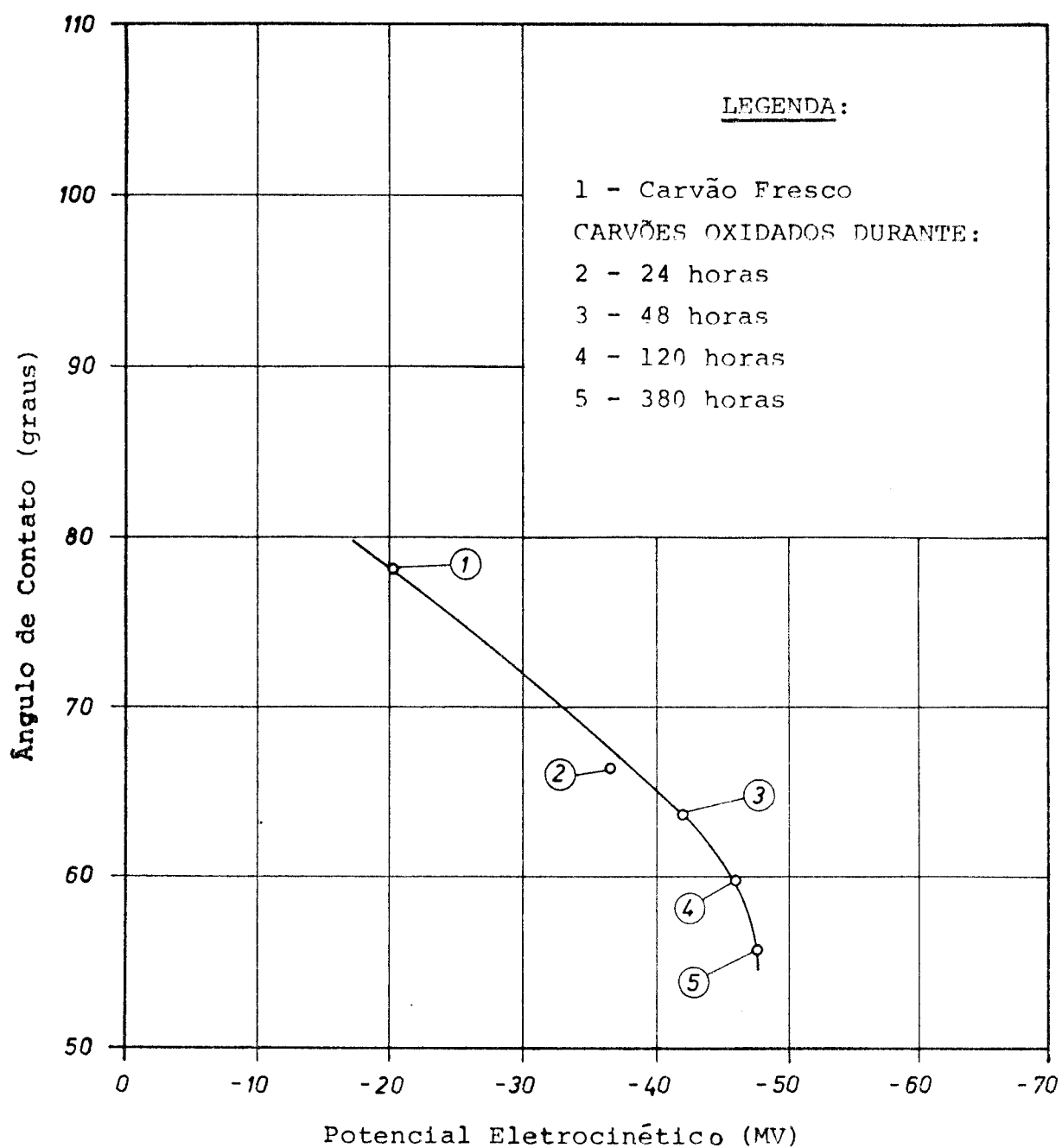


Figura 5 - Correlação entre ângulo de contato e potencial eletrocinético de carvões oxidados.

## Parâmetros Físicos

### Tamanho da Partícula

O tamanho das partículas do minério ou carvão e também a sua distribuição granulométrica são de grande importância no processo de flotação porque influenciam tanto a cinética como a eficiência do processo.

Para partículas grandes o limite superior, é óbvio, e está relacionado com o peso do conjunto partícula-bolha. No caso do carvão, pelo fato de ser de densidade baixa, o limite superior é consideravelmente mais alto que os minerais em geral. Sun e Zimmerman (28) demonstraram que o tamanho máximo da partícula (carvão) flotado em célula de laboratório, foi de 3 x 6 malha (Tyler). Para partículas pequenas a limitação geralmente é do tipo cinético influenciando a eficiência nas colisões partícula-bolha. Em geral, a flotação é ineficiente para partículas minerais menores que 10 microns. No caso de minérios hidrófobos (incluindo carvão) a flotação pode ir - até tamanhos menores mas a eficiência será relativamente baixa para partículas menores que 2 a 5 microns (29). Outro fator que se relaciona com a influência da granulometria na eficiência da separação do carvão por flotação, tem relação com a proporção do material fino presente na alimentação. Se a proporção for grande, um alto consumo de coletor é esperado pela fração fina devido a alta área específica. Como consequência deste fenômeno a fração de granulometria pequena flotar<sub>á</sub> muito mais do que a fração grande. Com o objetivo de resolver este problema, alterações no circuito de flotação de veriam ser introduzidas (flotação estagiada) (29).

### Densidade de Polpa

A percentagem de sólidos que se emprega na flotação de minérios é em torno de 20-25%. Considerando que o carvão tem densidade aproximadamente a metade da dos minerais usuais, - para manter a mesma percentagem de sólidos em volume devia-se ter aproximadamente 12%. De fato Crawford (30) em 1938 rela

tou que as melhores condições de flotação do carvão em relação ao conteúdo de cinzas foram obtidos com 12% de sólidos em peso. Entretanto para Brown (18) a percentagem de sólidos da polpa varia na prática de 6 a 25%, dependendo do "Rank" tipo e conteúdo de cinzas do carvão.

#### Condicionamento

O processo de condicionamento prévio, na flotação, é importante no sentido da obtenção de uma distribuição homogênea eficiente do coletor oleoso no circuito, com o objetivo de otimizar a adsorção na interface carvão-água. Por conseguinte, as condições hidrodinâmicas (tempo e quantidade de agitação) devem ser eficientemente controladas na prática. Um segundo fator a ser considerado no condicionamento relaciona-se com o mecanismo de interação do coletor apolar com o carvão. É muito conhecido hoje, o fato de que o processo de adsorção física pela ligação hidrofóbica, precisa vencer uma alta barreira energética para ele ocorrer. (31,32). Isto vai acompanhado de um baixo valor de energia de ligação para este tipo de adsorção. Conseqüentemente, uma otimização da agitação (e tempo) com o objetivo de aumentar a proporção de encontros efetivos e aumentar a energia total do sistema é imperiosa na flotação de carvão. Evidentemente, este processo de condicionamento, depende do carvão a ser tratado. Por exemplo, na flotação de alguns carvões americanos, um tempo breve de condicionamento com o espumante já é suficiente (16).

#### Aeração

Segundo Rastogi e Aplan (33) a aeração é fundamental na flotação. A relação entre a velocidade de flotação,  $k$ , de um carvão americano (Pittsburgh), utilizando o MIBC como espumante e a velocidade de aeração,  $Q$ , é:

$k \text{ (sec}^{-1}\text{)} = K Q^{0,79} \dots (12)$ , onde a velocidade de flotação aumenta proporcionalmente com a de aeração, dentro de certos

limites. Entretanto, a relação não serve para aquelas velocidades de aeração onde a célula de flotação não pode difundir eficientemente o ar. Burdon (34) mostrou que, embora a eficiência da flotação do carvão aumenta com a velocidade de aeração, a utilização efetiva do ar (em termos de recuperação por unidade de ar) diminui.

## III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

a. MATERIAIS

## Reagentes

Coletores: Os coletores utilizados foram óleo die sel, querosene e o reagente "Walker 405 Century Flotation". Estes reagentes são produtos comerciais e foram usados sem prévia purificação.

Espumantes: Empregaram-se óleo de pinho e Metil Isobutil Carbinol (MIBC), ambos produtos comerciais.

Modificadores de pH: Soluções de NaOH p.a e HCL em concentrações de 10% em peso.

## Carvões

- 1) Carvão da Camada Barro Branco: Amostra da Camada Barro Branco foi coletado na planta de beneficiamento ao longo de 5 meses com coleta diária de 30 em 30 minutos. Amostragem do produto foi feita na granulometria menor que 0,5 mm, fração resultante do após beneficiamento pelo "jig", peneiras vibratórias, ciclones e mesas concentradoras. Após serem coletadas, as amostras foram secadas em secadores a lâmpadas a uma temperatura de 70° C. O quartamento foi feito usando um divisor tipo Jones. Para os ensaios granulométricos utilizou-se um conjunto de peneiras normalizadas de abertura de malha variando de 0,420 mm a 0,074 mm. Uma análise granulométrica média de todas as amostras preparadas para os testes é amostrada a seguir:

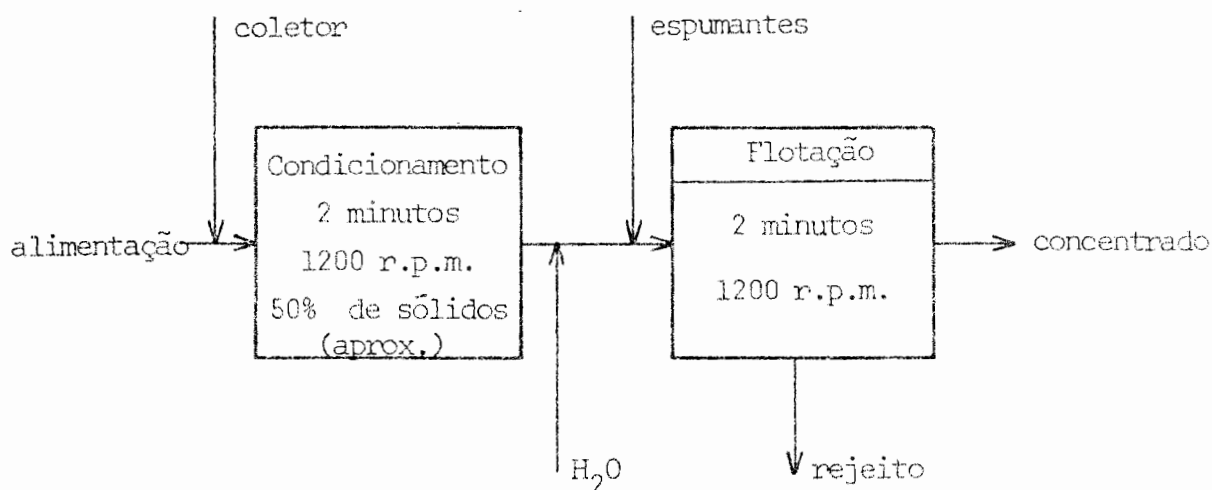
GRANULOMETRIA (mm)	PESO %
Retido em 0,420	19,0
0,420 X 0,250	27,7
0,250 X 0,149	38,9
0,149 X 0,074	9,4
< 0,074	5,0

- 2) Carvão de Leão: A amostra do Carvão de Leão foi coletada no "underflow" do ciclone, em intervalos de 30 em 30 minutos durante 18 horas. Esta amostra foi secada em um secador a lâmpadas a uma temperatura de 70°C. Para o quarteamento utilizou-se também um divisor tipo Jones. Os ensaios granulométricos foram feitos usando um conjunto de peneiras de abertura de malha variando de 0,420 mm a 0,074 mm para a amostra da alimentação e de 0,420 mm a 0,105 mm para o concentrado. A análise granulométrica representativa é abaixo descrita:

GRANULOMETRIA (mm)	PESO %
Retido em 0,420	12,5
0,420 x 0,250	35,0
0,250 x 0,149	27,5
0,149 x 0,074	15,0
< 0,074	10,0

#### b. TÉCNICAS UTILIZADAS

- 1) Flotação: As flotações foram conduzidas em uma célula de laboratório de fabricação Denver modelo SUB-A com capacidade de 10 litros. Os ciclos de condicionamento e flotação foram controlados com cronômetro e o pH da polpa foi medido usando um pHmetro de marca "Metronic". O condicionamento foi feito em alta percentagem de sólidos (ao redor de 50% em peso) na presença do coletor durante 2 minutos com uma agitação de 1200 revoluções por minuto (r.p.m.). Após condicionamento, o volume da célula (10 L) foi completada com adição de água. A continuação adicionou-se o espumante para logo abrir a válvula de admissão de ar. A transferência das partículas em suspensão para o concentrado foi realizado em um estágio durante 2 minutos ("Batch"). A figura a seguir mostra o esquema do circuito de flotação empregado nos testes.



"Flowsheet" do circuito de flotação escolhido

A separação dos sólidos das distintas frações foi feita por filtração a vácuo. Os filtrados foram secados a uma temperatura de 70°C e a determinação dos teores de cinza no concentrado e rejeito foram feitos pela norma ABNT MB-15 (35).

Os resultados de flotação obtidos são apresentados em forma de balanços metalúrgicos para os quais definem-se os seguintes parâmetros de separação:

$$\text{Teor em matéria carbonosa (fração*)} = \frac{\text{massa de mat. carbonosa na fração}}{\text{massa total da fração}} \times 100$$

$$\text{Teor de cinzas (fração*)} = \frac{\text{massa de cinza na fração}}{\text{massa da fração}} \times 100$$

$$\text{Recuperação em mat. carbonosa (fração*)} = \frac{\text{massa de mat. carbonosa na fração}}{\text{massa de mat. carb. na alimentação}} \times 100$$

$$\text{Recuperação em cinzas (fração*)} = \frac{\text{massa de cinza na fração}}{\text{massa de cinza na alimentação}} \times 100$$

\* Fração refere-se ao concentrado e rejeito.



O índice de eficiência define-se como:

$$E = \frac{\text{Recuperação (\% peso)} \times \% \text{ cinza do rejeito}}{\% \text{ cinza do concentrado}}$$

O índice E foi escolhido por representar muito bem a eficiência de separação por flotação. Além de descrever eficientemente a separação técnica, o índice E varia linearmente com o retorno financeiro descrito como:

$$F = \frac{\text{Recuperação (\% peso)}}{100} \times \frac{\text{Preço do concentrado}}{\text{Preço do contrato}} \quad (36)$$

As expressões E e F podem ser também normalizadas para incluir penalidades por excessos de conteúdo de cinzas (ou enxofre) do produto, bem como o valor térmico, composição maceral, etc.

- 2) Análise de Distribuição da Matéria Mineral na Matéria Orgânica - Utilizam-se para esta análise um microscópio binocular metalográfico "Leitz", especial para petrografia de carvão, com dispositivo para luz refletida, bem como uma lâmina micrométrica com diâmetro de campo 220 microns. O aumento total foi de 600 vezes. As áreas dos corpos de prova foram de aproximadamente 6 cm<sup>2</sup>. O espaço percorrido de um grão a outro e de um perfil a outro, com auxílio de um contador de pontos "Swift", foi de 0,3 mm e 0,5 mm respectivamente.

Percorreu-se o corpo de prova em sentido vertical, medindo-se a matéria orgânica pura, matéria mineral pura e os microconstituintes: matéria orgânica, pirita e argila dos mistos.

RESULTADOS DE FLOTAÇÃO DO  
CARVÃO DA CAMADA BARRO BRANCO

TABELA II

## CARVÃO DA CAMADA BARRO BRANCO - FLOTAÇÃO POR ESPUMA

1. Efeito da densidade de polpa na flotação usando óleo diesel ( $0,41 \text{ Kg. ton.}^{-1}$ ) e óleo de pinho ( $0,12 \text{ Kg. ton.}^{-1}$ ); tempo de flotação 2,5 min.; agitação 1200 r.p.m.; pH=6.

% Sólidos em peso	Produtos	Peso %	Teor		Recuperação		E
			MC %	CZ %	MC %	CZ %	
5,0	Alimentação	100	80,8	19,2	-	-	223
	Concentrado	62,9	90,1	9,9	70,0	32,3	
	Rejeito	37,1	64,9	35,1	30,0	67,7	
7,5	Alimentação	100	80,7	19,3	-	-	227
	Concentrado	66,9	89,2	10,8	74,0	37,4	
	Rejeito	33,1	63,3	36,7	26,0	62,6	
10,0	Alimentação	100	80,3	19,7	-	-	240
	Concentrado	68,0	89,1	10,9	75,5	37,6	
	Rejeito	32,0	61,5	38,5	24,5	62,4	
12,5	Alimentação	100	80,0	20,0	-	-	250
	Concentrado	70,5	88,6	11,4	78,0	40,0	
	Rejeito	29,5	59,5	40,5	22,0	60,0	
18,0	Alimentação	100	78,8	21,2	-	-	236
	Concentrado	67,9	88,2	11,8	76,0	37,7	
	Rejeito	32,1	58,9	41,1	24,0	62,3	
25,0	Alimentação	100	78,5	21,5	-	-	230
	Concentrado	72,3	86,6	13,4	80,0	45,1	
	Rejeito	27,7	57,4	42,6	20,0	54,9	
35,0	Alimentação	100	79,3	20,7	-	-	236
	Concentrado	79,1	85,3	14,7	85,0	56,0	
	Rejeito	20,9	56,2	43,8	15,0	44,0	
50,0	Alimentação	100	79,2	20,8	-	-	236
	Concentrado	90,2	82,0	18,0	93,0	78,0	
	Rejeito	9,8	53,0	47,1	7,0	22,0	

2. Influência do pH na flotação usando óleo diesel (0,41 Kg.ton.<sup>-1</sup>) e óleo de pinho (0,12 Kg.ton.<sup>-1</sup>); tempo de flotação 2 min.; - percentagem de sólidos 10% em peso; agitação 1200 r.p.m.

pH	Produtos	Peso	Teor		Recuperação		E
			MC	CZ	MC	CZ	
			%	%	%	%	
4	Alimentação	100	78,8	21,2	-	-	145
	Concentrado	42,2	91,2	8,8	49,0	17,5	
	Rejeito	57,8	69,7	30,3	51,0	82,5	
5	Alimentação	100	78,8	21,2	-	-	147
	Concentrado	35,4	92,2	7,8	41,0	13,0	
	Rejeito	64,6	71,5	28,5	59,0	87,0	
6	Alimentação	100	80,5	19,5	-	-	226
	Concentrado	59,6	90,8	9,2	67,3	27,7	
	Rejeito	40,4	65,1	34,9	32,7	72,3	
7	Alimentação	100	79,9	20,1	-	-	127
	Concentrado	52,1	88,1	11,9	57,0	30,8	
	Rejeito	47,9	71,0	29,0	43,0	69,2	
8	Alimentação	100	79,2	20,8	-	-	137
	Concentrado	49,9	88,9	11,1	56,0	26,4	
	Rejeito	50,1	69,5	30,5	44,0	73,6	
9	Alimentação	100	78,9	21,1	-	-	133
	Concentrado	52,5	87,8	12,2	58,0	30,3	
	Rejeito	47,5	69,1	30,9	42,0	69,7	

3. Influência do pH na flotação usando querosene (1,14 Kg.ton.<sup>-1</sup>) e óleo de pinho (0,12 Kg.ton.<sup>-1</sup>); tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso; rotação 1200 r.p.m.

pH	Produtos	Peso	Teor		Recuperação		E
			MC	CZ	MC	CZ	
			%	%	%	%	
4	Alimentação	100	79,2	20,8	-	-	103
	Concentrado	44,2	88,1	11,9	49,0	25,0	
	Rejeito	55,8	72,2	27,8	51,0	75,0	
5	Alimentação	100	78,9	21,1	-	-	109
	Concentrado	45,4	88,1	11,9	51,0	25,6	
	Rejeito	54,6	71,3	28,7	49,0	74,4	
6	Alimentação	100	81,6	18,4	-	-	179
	Concentrado	59,3	89,9	10,1	65,3	32,6	
	Rejeito	40,7	69,5	30,5	34,7	67,4	
7	Alimentação	100	78,8	21,2	-	-	153
	Concentrado	56,7	87,8	12,2	63,0	32,6	
	Rejeito	43,3	67,0	33,0	37,0	67,4	
8	Alimentação	100	78,5	21,5	-	-	141
	Concentrado	57,8	86,6	13,4	64,0	36,0	
	Rejeito	42,2	67,3	32,7	36,0	64,0	
9	Alimentação	100	78,9	21,0	-	-	133
	Concentrado	53,3	87,6	12,4	59,0	31,3	
	Rejeito	46,7	69,0	31,0	41,0	68,7	

4. Efeito da Concentração do Reagente "Walker 405 Century Flotation"; tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso; pH=6; agitação 1200 r.p.m.

Concentração Kg.ton. <sup>-1</sup>	Produtos	Peso %	Teor		Recuperação		E
			MC %	CZ %	MC %	CZ %	
0,15	Alimentação	100	79,0	21,0	-	-	146
	Concentrado	42,3	91,3	8,7	49,0	17,6	
	Rejeito	57,7	69,9	30,1	51,0	82,4	
0,24	Alimentação	100	78,0	22,0	-	-	177
	Concentrado	50,0	90,3	9,7	58,0	22,0	
	Rejeito	50,0	65,6	34,4	42,0	78,0	
0,31	Alimentação	100	76,2	23,8	-	-	201
	Concentrado	67,5	85,5	14,5	76,0	41,1	
	Rejeito	32,5	56,8	43,2	24,0	58,9	
0,36	Alimentação	100	-	22,3	-	-	229
	Concentrado	73,9	85,7	14,4	82,0	47,5	
	Rejeito	26,1	55,2	44,8	18,0	52,5	
0,48	Alimentação	100	77,7	20,0	-	-	263
	Concentrado	82,5	85,6	14,4	88,0	60,0	
	Rejeito	17,5	54,0	46,0	12,0	40,0	
0,60	Alimentação	100	79,7	20,3	-	-	260
	Concentrado	87,6	83,7	16,3	92,0	70,4	
	Rejeito	12,4	51,6	48,4	8,0	29,6	
0,73	Alimentação	100	79,4	20,6	-	-	262
	Concentrado	92,0	82,1	17,9	95,0	80,0	
	Rejeito	8,0	48,9	51,1	5,0	20,0	
0,85	Alimentação	100	77,9	22,1	-	-	256
	Concentrado	93,5	80,1	19,9	96,0	84,2	
	Rejeito	6,5	45,4	54,6	4,0	15,8	
0,97	Alimentação	100	77,2	22,8	-	-	248
	Concentrado	93,5	79,4	20,6	96,2	84,6	
	Rejeito	6,5	45,2	54,8	3,8	15,4	
1,21	Alimentação	100	77,5	22,5	-	-	248
	Concentrado	95,0	79,2	20,8	97,1	88,0	
	Rejeito	5,0	45,6	54,4	2,9	12,0	

5. Flotação usando óleo diesel ( $0,42\text{Kg.ton.}^{-1}$ ) e MIBC( $0,08\text{Kg.ton.}^{-1}$ ); tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso; pH=6; agitação 1200 r.p.m.

Produto	Peso %	Teor		Recuperação		E
		MC %	CZ %	MC %	CZ %	
Alimentação	100	79,9	20,1	-	-	
Concentrado	92,6	81,9	18,1	94,9	83,6	228
Rejeito	7,4	55,4	44,6	5,1	16,4	

6. Flotação usando querosene ( $1,14\text{Kg.ton.}^{-1}$ ) e MIBC( $0,08\text{Kg.ton.}^{-1}$ ); - tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso; pH=6; agitação 1200 r.p.m.

Produto	Peso %	Teor		Recuperação		E
		MC %	CZ %	MC %	CZ %	
Alimentação	100	81,7	18,3	-	-	
Concentrado	94,6	83,6	16,4	96,8	84,7	299
Rejeito	5,4	48,2	51,8	3,2	15,3	

TABELA IV

Rendimento em função da granulometria para os experimentos descritos na tabela II-2 (pH=6); II-3 (pH=6); II-5; II-6.- Carvão da Camada Barro Branco.

Reagentes: óleo diesel e óleo de pinho. (II-2)

Granulometria Frações (mm)	Peso alimentação (Gramas)	Peso concentrado (Gramas)	Recuper. em massa (% Peso)
Retido em 0,420	180,0	108,5	60,3
0,420 x 0,250	260,0	159,7	61,4
0,250 x 0,149	460,0	279,0	60,6
0,149 x 0,074	60,0	29,2	48,7
< 0,074	40,0	19,6	49,0

Reagentes: querosene e óleo de pinho (II-3)

Granulometria Frações (mm)	Peso alimentação (Gramas)	Peso concentrado (Gramas)	Recuper. em massa (% Peso)
Retido em 0,420	220,0	129,9	59,0
0,420 x 0,250	250,0	145,3	58,1
0,250 x 0,149	450,0	268,0	59,6
0,149 x 0,074	45,0	27,9	62,0
< 0,074	35,0	21,9	62,6



Reagentes: Óleo diesel e MIBC (II-5)

Granulometria Frações (mm)	Peso alimentação (Gramas)	Peso concentrado (Gramas)	Recuper. em massa (% Peso)
Retido em 0,420	190,0	174,0	91,6
0,420 x 0,250	270,0	250,0	92,6
0,250 x 0,149	440,0	405,0	92,0
0,149 x 0,074	60,0	64,0	100
< 0,074	40,0	33,0	82,5

Reagentes: querosene e MIBC (II-6)

Granulometria Frações (mm)	Peso alimentação (Gramas)	Peso concentrado (Gramas)	Recuper. em massa (% Peso)
Retido em 0,420	225,0	216,0	96,0
0,420 x 0,250	265,0	251,0	94,7
0,250 x 0,149	405,0	378,5	93,3
0,149 x 0,074	65,0	62,5	96,1
< 0,074	40,0	38,0	95,0

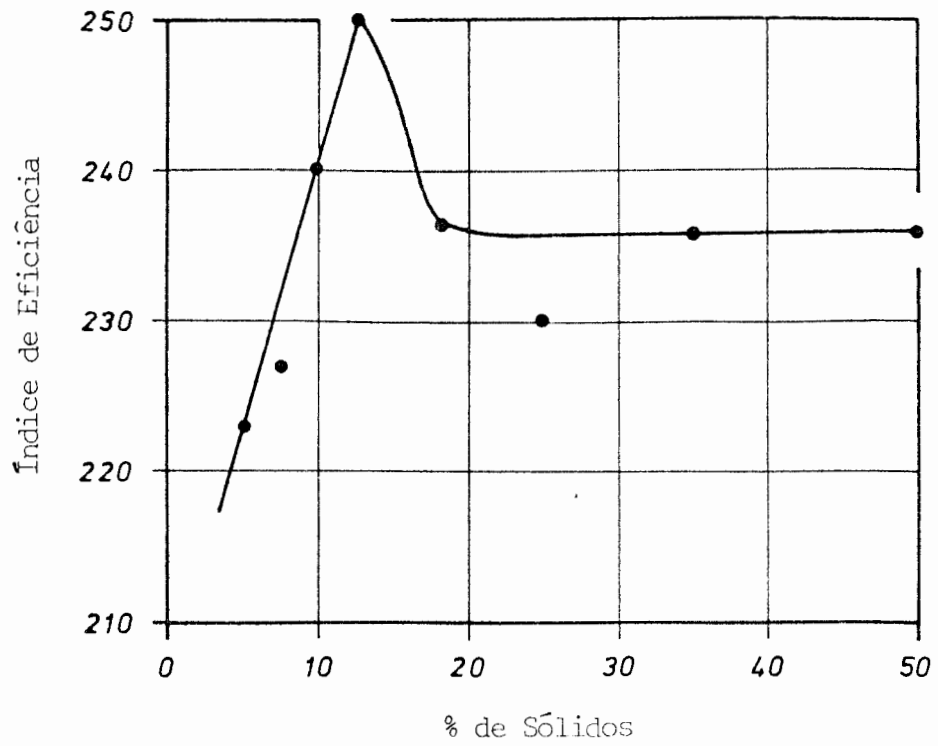


Figura 6 - Carvão da Camada Barro Branco - Índice de eficiência em função da porcentagem de sólidos. Reagentes: óleo diesel e óleo de pinho. pH=6; agitação 1200 r.p.m.

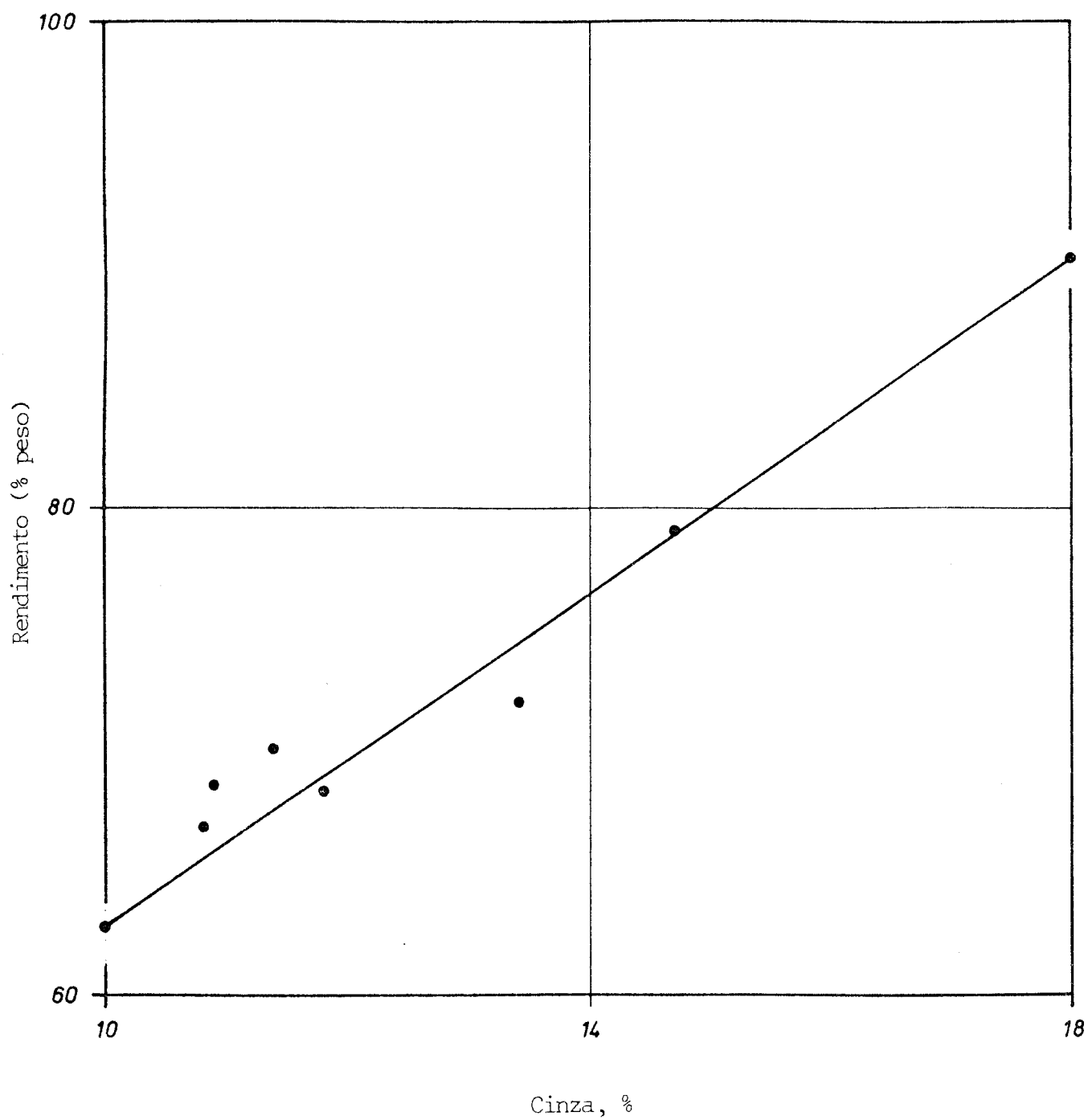


Figura 7 - Rendimento (% peso) versus teor de cinza para distintas percentagem de sólidos (Tabela II - 1)

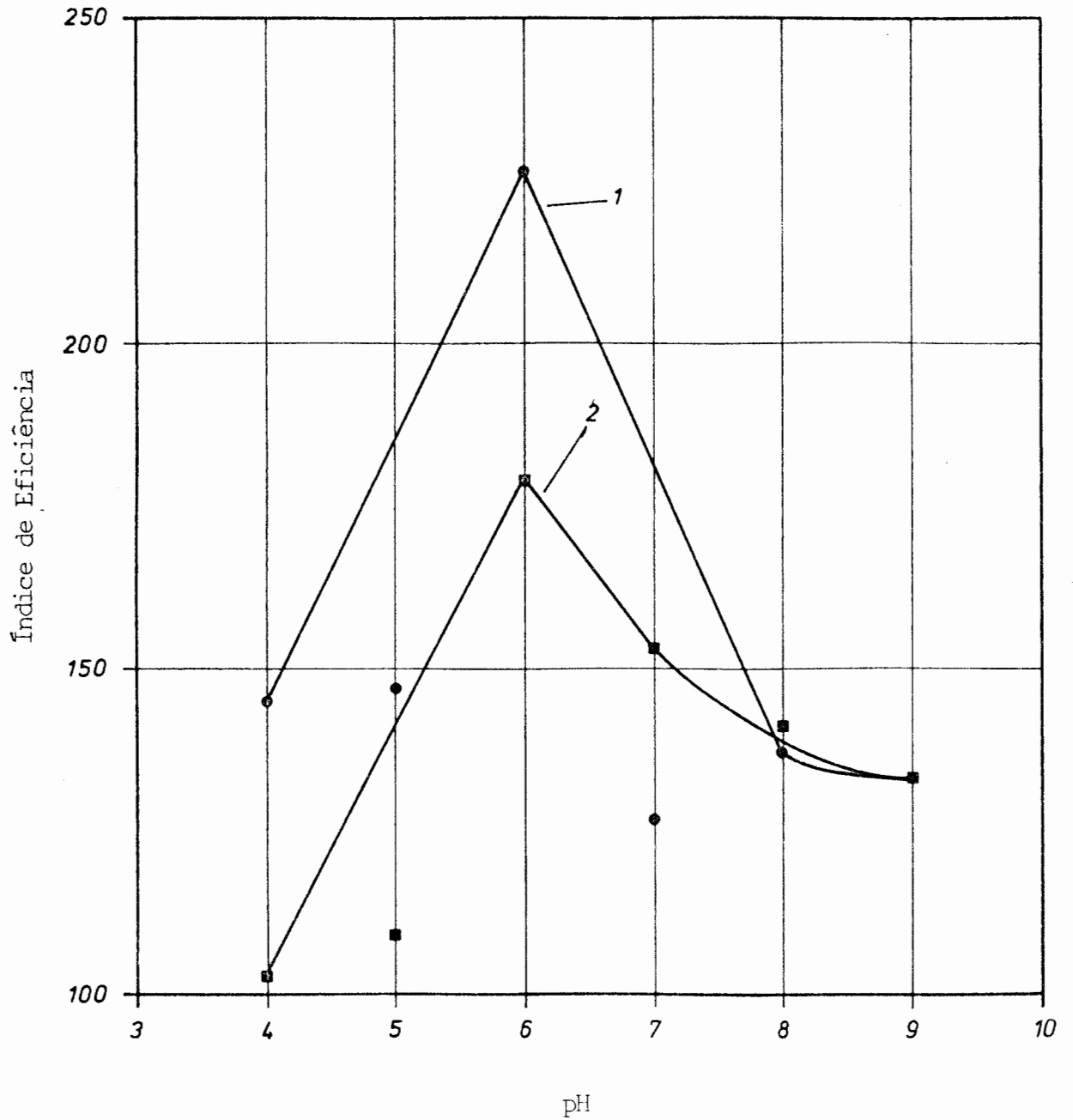


Figura 8 - Carvão da Camada Barro Branco - Índice de eficiência em função do pH. Reagentes: óleo diesel e óleo de pinho (1), querosene e óleo de pinho (2). Percentagem de sólidos, 10% em peso; agitação 1200 r.p.m.

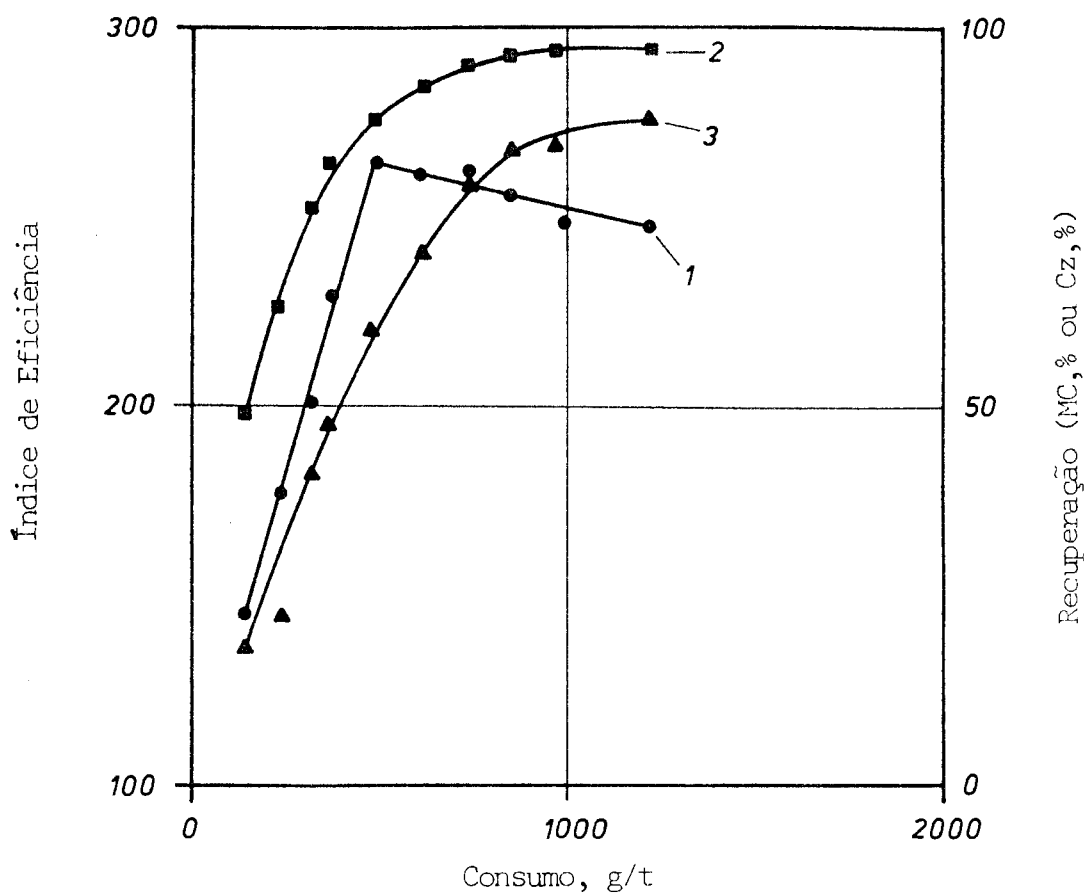


Figura 9 - Carvão da Camada Barro Branco - Índice de eficiência em função da concentração de reagente "Walker 405 - Century Flotation" (1). Recuperação de matéria carbonosa em função da concentração de reagente "Walker-405 Century Flotation" (2). Recuperação de cinzas em função da concentração de reagente "Walker 405 Century Flotation" (3). Percentagem de Sólidos, 10% em peso; pH6; agitação 1200 r.p.m.

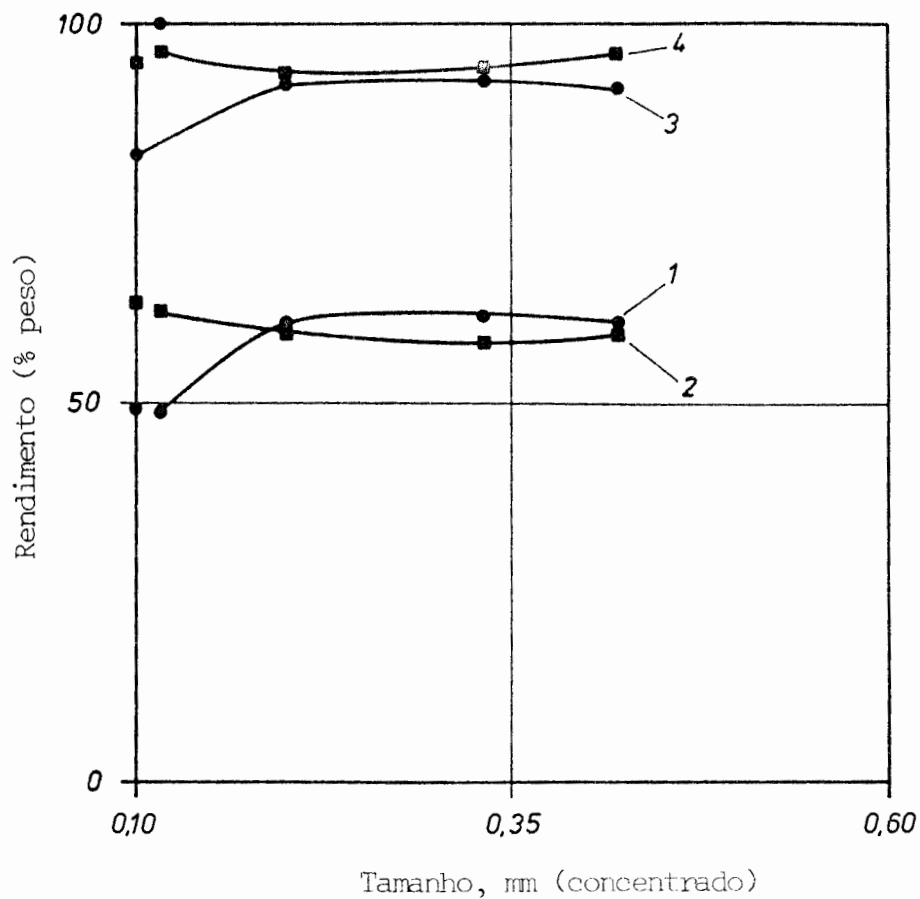


Figura 11 - Carvão da Camada Barro Branco  
Recuperação em massa (% peso)  
em função da granulometria.

- Curva 1 - óleo diesel e óleo de pinho
- Curva 2 - querosene e óleo de pinho
- Curva 3 - óleo diesel e MIBC
- Curva 4 - querosene e MIBC

RESULTADOS DE FLOTAÇÃO DO  
CARVÃO DE LEÃO

TABELA III

## CARVÃO DE LEÃO - FLOTAÇÃO POR ESPUMA

1. Efeito da concentração do Reagente "Walker 405 Century Flotation"; tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso; pH=6; agitação 1200 r.p.m.

Concentração (Kg.ton. <sup>-1</sup> )	Produtos	Peso %	Teor		Recuperação		E
			MC %	CZ %	MC %	CZ %	
0,85	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	48
	Concentrado	21,9	91,3	8,7	24,0	11,3	
	Rejeito	78,1	81,1	18,9	76,0	88,7	
1,43	Alimentação	100	83,6	16,4	-	-	81
	Concentrado	36,3	90,8	9,2	39,5	20,1	
	Rejeito	63,7	79,4	20,6	60,5	79,9	
1,85	Alimentação	100	83,2	16,8	-	-	98
	Concentrado	46,4	89,5	10,5	50,0	29,2	
	Rejeito	53,6	77,8	22,2	50,0	70,8	
2,74	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	122
	Concentrado	56,0	89,0	11,0	60,0	36,9	
	Rejeito	44,0	76,1	23,9	40,0	63,2	
2,86	Alimentação	100	83,2	16,8	-	-	167
	Concentrado	67,6	88,6	11,4	72,0	45,8	
	Rejeito	32,4	71,9	28,1	28,0	54,2	
3,57	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	190
	Concentrado	73,8	88,2	11,8	78,0	52,1	
	Rejeito	26,2	69,5	30,5	22,0	47,9	



2. Efeito da Concentração do MIBC na flotação usando óleo diesel como coletor ( $0,83\text{Kg.ton.}^{-1}$ ); tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso; pH=6; agitação 1200 r.p.m.

Concentração (Kg.ton. <sup>-1</sup> )	Produtos	Peso %	Teor		Recuperação		E
			MC %	CZ %	MC %	CZ %	
0,11	Alimentação	100	83,2	16,8	-	-	17
	Concentrado	10,0	89,8	10,2	11,0	6,1	
	Rejeito	90,0	82,5	17,5	89,0	93,9	
0,15	Alimentação	100	83,4	16,6	-	-	43
	Concentrado	26,0	88,8	11,2	28,0	17,5	
	Rejeito	74,0	81,5	18,5	72,0	82,5	
0,32	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	71
	Concentrado	43,0	87,8	12,2	45,0	31,1	
	Rejeito	57,0	79,8	20,2	55,0	68,9	
0,43	Alimentação	100	83,4	16,6	-	-	71
	Concentrado	46,5	87,1	12,9	49,0	36,1	
	Rejeito	53,5	80,2	19,8	51,0	63,9	

3. Efeito da Concentração do MIBC na flotação usando querosene - como coletor ( $1,65 \text{ Kg. ton.}^{-1}$ ); tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso; pH=6; agitação 1200 r.p.m.

Concentração (Kg. ton. <sup>-1</sup> )	Produtos	Peso %	Teor		Recuperação		E
			MC %	CZ %	MC %	CZ %	
0,11	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	20
	Concentrado	11,4	90,2	9,8	12,0	6,6	
	Rejeito	88,6	82,4	17,6	88,0	93,4	
0,15	Alimentação	100	83,2	16,8	-	-	42
	Concentrado	24,2	89,3	10,7	26,0	15,5	
	Rejeito	75,8	81,3	18,7	74,0	84,5	
0,32	Alimentação	100	83,5	16,5	-	-	73
	Concentrado	44,0	88,0	12,0	46,0	32,1	
	Rejeito	56,0	80,0	20,0	54,0	67,9	
0,43	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	73
	Concentrado	44,7	87,6	12,4	47,0	32,9	
	Rejeito	55,3	79,7	20,2	53,0	67,1	

4. Flotação usando óleo de pinho como espumante (0,12 Kg. ton.<sup>-1</sup>)  
 tempo de flotação 2 min.; percentagem de sólidos 10% em peso;  
 pH=6; agitação 1200 r.p.m.

Coletor	Produtos	Peso %	Teor		Recuperação		E
			MC %	CZ %	MC %	CZ %	
óleo diesel <sup>-1</sup> 0,83kg.ton.	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	26
	Concentrado	15,9	89,1	10,9	17,0	10,2	
	Rejeito	84,1	82,2	17,8	83,0	89,8	
querosene <sup>-1</sup> 1,65kg.ton.	Alimentação	100	83,3	16,7	-	-	18
	Concentrado	12,2	88,2	11,8	13,0	8,4	
	Rejeito	87,8	82,6	17,4	87,0	91,6	

TABELA V

Rendimento em função da granulometria para os experimentos descritos na Tabela III-1 ( $1,43 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ ) ; III-2- ( $0,15 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ ); III-3 ( $0,15 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ ) - Carvão de Leão.

Reagente: Walker 405 Century Flotation". (III-1)

Granulometria Frações (mm)	Peso alimentação (Gramas)	Peso concentrado (Gramas)	Recuper.em massa (% Peso)
Retido em 0,420	125,0	14,2	11,4
0,420 x 0,250	350,0	75,9	21,7
0,250 x 0,177	200,0	80,9	40,5
0,177 x 0,105	175,0	81,7	46,7
< 0,105	150,0	110,3	73,5

Reagentes: óleo diesel e MIBC (III-2)

Granulometria Frações (mm)	Peso alimentação (Gramas)	Peso concentrado (Gramas)	Recuper.em massa (% Peso)
Retido em 0,420	125,0	9,9	7,9
0,420 x 0,250	350,0	21,6	6,2
0,250 x 0,177	200,0	12,7	6,3
0,177 x 0,105	175,0	35,1	20,0
< 0,105	150,0	180,7	100

Reagentes: querosene e MIBC (III-3)

Granulometria Frações (mm)	Peso alimentação (Gramas)	Peso concentrado (Gramas)	Recuper.em massa (% Peso)
Retido em 0,420	125,0	11,3	9,0
0,420 x 0,250	350,0	17,2	4,9
0,250 x 0,177	200,0	16,9	8,4
0,177 x 0,105	175,0	49,0	28,0
< 0,105	150,0	147,6	98,4

Tabela VI

1. Comparação das razões  $\frac{\text{dosagem (Kg. ton.}^{-1})}{\text{recuperação (\%MC ou \%CZ)}}$  para os carvões em estudo (Tabela II-4 e III-1).

Concentração (Kg. ton. <sup>-1</sup> )	Leão		Camada Barro Branco	
	MC %	CZ %	MC %	CZ %
1,43	3,6	7,2	0,25	0,76
1,85	3,7	6,4	0,32	0,76
2,14	3,6	5,8	0,37	0,79
2,86	4,0	6,2	0,39	0,78

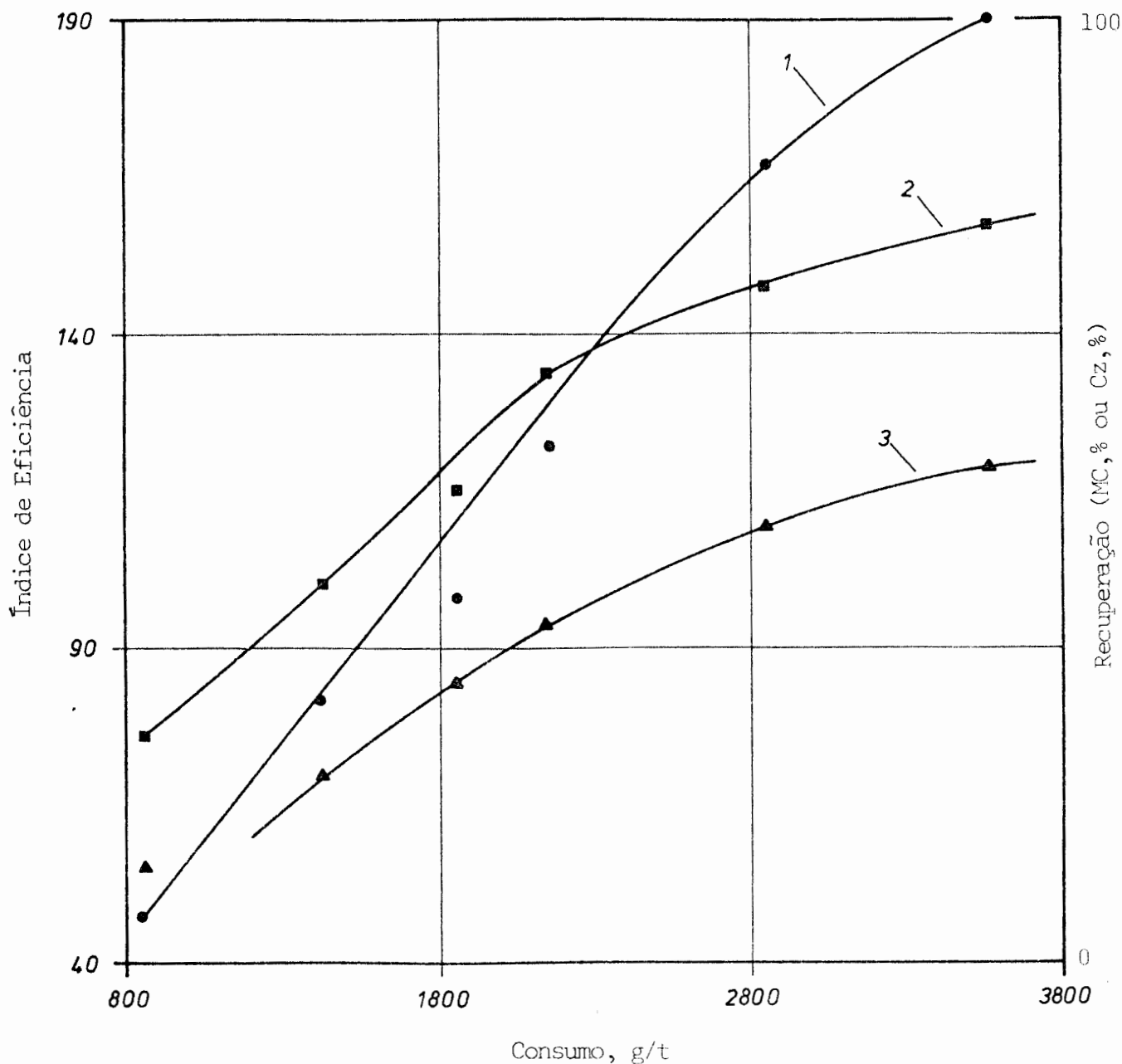


Figura 10 - Carvão de Leão - Índice de eficiência em função da concentração de reagente "Walker 405 Century Flotation" (1). Recuperação de matéria carbonosa em função da concentração de reagente "Walker 405 Century Flotation" (2). Recuperação de cinzas em função da concentração de reagente "Walker 405 Century Flotation" (3). Percentagem de sólidos, 10% em peso; pH6; agitação 1200 r.p.m.

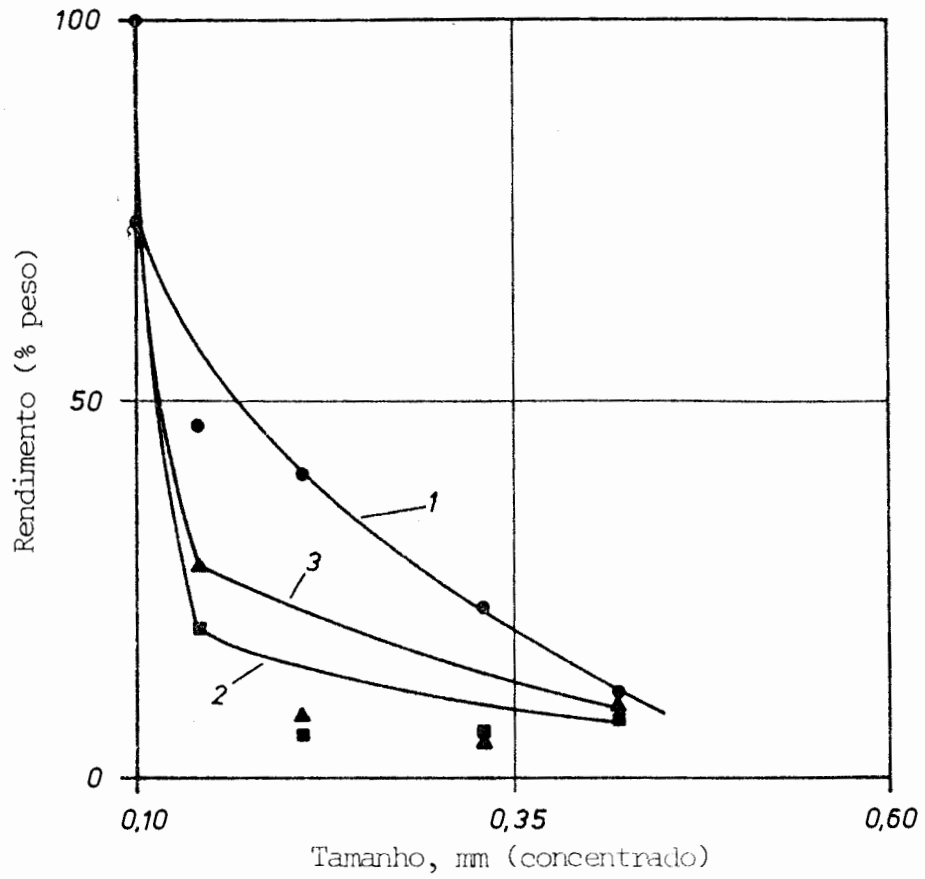


Figura 12 - Carvão de Leão - Recuperação em massa (% peso) em função de granulometria.

Curva 1 - "Walker 405 Century Flotation"

Curva 2 - óleo diesel e MIBC

Curva 3 - querosene e MIBC



C A R A C T E R I Z A Ç Ã O D O S C A R V Õ E S  
E M E S T U D O

TABELA VII

1. Análise Imediata e Poder Calorífico dos carvões utilizados no presente estudo

Procedência	Umidade %	Cinzas bs %	M.Voláteis bs %	C. Fixo bs %	Poder Calorífico cal/ g
Camada Barro Branco	1,2	16,6	34,3	49,1	7087
Leão	6,2	21,1	34,3	44,6	5992

2. Análise Elementar e Refletância média dos carvões utilizados no presente estudo

Procedência	C bp %	H bs %	O bs %	S bs %	N bs %	Refletância média %
Camada Barro Branco	86,7	4,7	4,6	1,4	1,6	0,90
Leão	79,7	4,0	10,9	0,6	1,0	0,51

bs - base seca

bp - base pura

TABELA VIII

Análise de Distribuição da Matéria Mineral na Matéria Orgânica.

Os resultados do total de grãos analisados, a percentagem de matéria orgânica (MO), de matéria mineral (MM) e de mistos, a medida média de matéria orgânica, de matéria mineral e de mistos, por perfil, são apresentados a seguir:

1. Carvão da Camada Barro Branco

Perfil	Total de grãos analisados por perfil	MO %	MM %	Mistos %	Medida média MO ( $\mu$ )	Medida média MM ( $\mu$ )	Medida média mistos ( $\mu$ )
1	48	58,3	6,3	35,4	95	56	100
2	45	73,3	-	26,7	99	-	125
3	47	59,6	10,6	29,8	94	102	134
4	47	55,3	8,5	36,2	113	51	128
5	50	68,0	10,0	22,0	99	43	143
6	48	70,8	6,3	22,9	98	65	144
7	46	67,4	8,7	23,9	105	78	158
8	40	77,5	5,0	17,5	104	31	149
9	51	70,6	9,8	19,6	115	71	127
10	52	73,1	7,7	21,2	104	88	137
11	51	72,6	9,8	17,7	105	36	122

## 2. Carvão de Leão

Perfil	Total de grãos analisados por perfil	MO %	MM %	Mistos %	Medida MO (μ)	Medida MM (μ)	Medida média mistos (μ)
1	57	47,4	10,5	42,1	116	131	151
2	54	51,9	5,6	42,6	126	111	128
3	50	52,0	10,0	38,0	100	75	150
4	49	61,2	10,2	28,6	117	124	143
5	53	50,9	11,3	37,7	122	94	143
6	48	52,1	8,3	39,6	128	133	132
7	47	36,2	6,4	57,5	105	59	165
8	53	58,5	7,6	34,0	130	105	157
9	52	32,7	9,6	57,7	103	128	160
10	52	36,5	13,5	50,0	143	87	145

#### IV - Resultados e Discussão

##### a. Carvão da Camada Barro Branco

Separação por flotação: Os efeitos de concentração de sólidos, concentração de reagentes, pH e granulometria na eficiência da flotação, são apresentados nas Tabelas II, IV e figuras 6, 7, 8, 9 e 11.

A separação do carvão da matéria inorgânica, por flotação (utilizando o óleo diesel como coletor), em função da densidade de polpa, é descrito na Tabela II-I e figura 6. O máximo valor do índice de eficiência, E, foi obtido para um conteúdo de sólidos ao redor de 12,0% em peso. Entretanto, em termos de fabricação direta do coque, a partir destes concentrados de flotação, o máximo valor de cinzas aceitável (fixado em 11,0%) é obtido para um conteúdo de sólidos menor (10,0% em peso) e uma recuperação também menor (68,0%). Este valor de percentagem de sólidos foi o escolhido para todos os experimentos que seguiram. Qualquer dos dois valores estão de acordo com os resultados já publicados (16). Do ponto de vista prático, é interessante analisar a figura 7, que mostra a variação entre o rendimento em massa (% peso) e a percentagem de cinzas no concentrado para os distintos valores de densidade da polpa da alimentação. A resultante desta relação é uma reta, cuja equação é  $y = 3,33 x + 30$  onde y representa o rendimento (% peso) e x o teor de cinza. Esta expressão permite a determinação dos rendimentos possíveis quando se deseja um carvão beneficiado com determinado teor de cinza, contida dentro do intervalo estudado.

A influência do pH na eficiência da flotação é bem marcada, como se pode apreciar na tabela II-2, II-3 e figura 8. O valor mais alto do índice de eficiência foi obtido com pH 6, que concorda com resultados anteriormente publicados (36). - Uma possível explicação é fundamentada em termos do grau de ionização dos grupos polares (carboxílicos e fenólicos) presentes na interface carvão-água. O pH 6, é um valor do ponto

isolétrico de ácidos orgânicos e proteínas (37). Do mesmo modo o valor do potencial eletrocinético negativo do carvão é muito baixo a este valor de pH. Como consequência a hidrofobicidade alcançaria um valor máximo e a repulsão impedindo a adsorção do coletor seria mínima. O fato de que a influência do pH seja a níveis das propriedades interfaciais do carvão exclusivamente, não afetando a química das soluções dos reagentes empregados, é demonstrado na mesma figura 8, onde os valores máximo do rendimento (% peso) foram independentes do tipo de coletor utilizado.

A influência da concentração do MIBC na flotação, usando óleo diesel e querosene como coletores, é descrita na Tabela II-5 e II-6. O rendimento em massa (% peso) foi marcadamente maior em comparação com os resultados obtidos com o óleo de pinho como espumante. Não obstante, a seletividade da flotação foi muito menor, aumentando consideravelmente a flotação do material inorgânico. Como os coletores foram os mesmos utilizados anteriormente, uma conclusão aparentemente óbvia para o presente caso, é que o MIBC apresenta características coletoras não seletivas. O fato de que atue como coletor da matéria inorgânica (cinzas), poderia explicar-se em termos de ligação de hidrogênio entre os grupos silanoles do material silicoso (cinzas) e o grupo carbinol do álcool (MIBC) (38). Em termos de índice de eficiência, os resultados utilizando MIBC foram bastantes altos porque, tal como foi estabelecido anteriormente, este índice não discrimina entre carvão metalúrgico e não metalúrgico. Se o carvão flotado fosse um não metalúrgico, o concentrado teria um valor comercial muito grande, devido a alta recuperação da matéria carbonosa fina.

O efeito da concentração do reagente "Walker 405 Century Flotation" na flotação é mostrado na tabela II-4 e figura 9. Em termos de recuperação em matéria carbonosa, a flotação é praticamente completa após uma adição de  $0,73 \text{ Kg.ton.}^{-1}$  deste coletor. Entretanto, a flotação do material inorgânico também aumenta com a concentração do reagente "Walker" alcançando um "pseudo-plateau" às concentrações superiores a  $1 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ .

Comparativamente com óleo diesel ou querosene, a performance deste coletor é significativamente melhor em termos de recuperação da matéria carbonosa, mas em termos de rejeição de cinzas é bastante menor. A co-flotação da matéria inorgânica foi marcada especialmente para altos consumos de reagente. O valor do índice de eficiência mostrou um pico com concentrações de reagente ao redor de  $0,50 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ , onde as diferenças em recuperação entre a matéria carbonosa e matéria inorgânica alcançaram seu máximo valor. Para o valor máximo do índice de eficiência ( $E = 263$ ) a recuperação, em matéria carbonosa, foi da ordem de 88,0%, com um teor de cinza de 14,4% (figura 9). A situação presente é típica nos processos metalúrgicos extrativos. Um alto valor de recuperação quase sempre está acompanhado de um alto valor de material não desejado. No caso presente, a flotação do carvão da camada Barro Branco pode discutir-se em termos do seu valor como material metalúrgico ("coke making") ou em termos de recuperação de um material combustível fino e, por conseguinte, muito difícil de recuperar por métodos clássicos. Se o maior índice é o escolhido, a performance da flotação utilizando o reagente Walker, seria menos eficiente que com o óleo diesel. Isto porque o valor máximo de cinzas (no concentrado) admissível foi de 11,0%. Por outro lado, sempre existe a possibilidade econômica de utilizar o concentrado em forma direta com outras finalidades. A recuperação em matéria carbonosa com o reagente "Walker - 405 Century Flotation" foi de 20,0%, mais alta que a obtida com o óleo diesel, para concentrações relativamente similares. Os índices de eficiência foram: 263 para o Walker e 226 para o óleo diesel.

#### b. Carvão de Leão

A performance da flotação do carvão de Leão, em função de alguns parâmetros físicos e químicos, são descritos nas tabelas III, V e figuras 10, 12.

A flotação na presença do reagente "Walker Century Flo

tation" é apresentada na tabela III-1 e na figura 10. A recuperação da matéria carbonosa e de cinzas aumenta quase que linearmente com a concentração do coletor. As concentrações requeridas para a obtenção de concentrados de níveis razoáveis foram, comparativamente, com o carvão da Camada Barro Branco, muito maiores. O índice de eficiência aumentou também linearmente com a concentração do coletor. Valores comparativos obtidos com o carvão da Camada Barro Branco, foram alcançados empregando concentrações 10 vezes mais alta. Comparando as razões  $\frac{\text{dosagem (Kg. ton.}^{-1})}{\text{recuperação (\%MC e \%CZ)}}$  para os carvões em estudo, os

valores obtidos foram constante em quase todos os casos, para distintas concentrações (ver tabela VI). O mais interessante foi o fato de que, para os dois carvões, o valor obtido para as cinzas foi quase sempre o duplo do valor da matéria carbonosa. Por outro lado, os valores das razões entre os dois carvões foram de ordem 10:1, quando se compara o carvão da Camada Barro Branco em relação ao carvão de Leão. Análise comparativa entre estes carvões, certamente é muito importante. Tal como foi citado anteriormente, as diferenças parecem ser devido as variações no "Rank". A priori, o carvão de Leão deveria apresentar características de flotação menores do que o carvão da Camada Barro Branco. Conforme a tabela VII-2 o carvão da Camada Barro Branco apresenta refletância média 0,90% e o de Leão 0,51%. Estes valores definem os carvões estudados em Betuminoso Alto Volátil (carvão da Camada Barro Branco) e Sub-betuminoso (carvão de Leão). Em termos do teor de carbono em base pura, os resultados mostraram um valor de 86,7% para o carvão da Camada Barro Branco e 79,7% para o carvão de Leão. Como foi citado anteriormente, estes parâmetros estão relacionados com o grau de hidrofobicidade (16) Na figura 3 é mostrado a relação entre ângulo de contato (diretamente proporcional à hidrofobicidade) e a percentagem de carbono livre de matéria mineral (16). Interpolando os valores obtidos no presente estudo, o carvão da Camada Barro Branco teria um alto ângulo de contato (ao redor



de 63 graus) e um valor muito baixo (menor que 10 graus) para o carvão de Leão. Como a flotação está relacionada com o grau de hidrofobicidade (ver Generalidades Sobre Flotação - de Carvão), o carvão da Camada Barro Branco apresenta melhores condições termodinâmicas para a flotação que o carvão de Leão. As diferenças em hidrofobicidade encontradas certamente explicariam em parte, os distintos resultados na flotação, obtidos no presente trabalho.

A baixa eficiência da flotação do carvão de Leão, comparativamente, com o carvão metalúrgico da Camada Barro Branco, pode ser melhor apreciada nos resultados encontrados com óleo diesel e querosene (para concentrações menores que  $1,65 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ ). A tabela III-4 mostra que as recuperações foram muito baixas (inferiores a 16,0%). Um aumento considerável obtem-se com a adição de MIBC, citado anteriormente como um espumante com propriedades coletoras (ver tabela III-2-3). A recuperação em massa aumentou linearmente com a concentração dentro do intervalo estudado ( $0,11 - 0,43 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ ). A magnitude do acréscimo foi similar para os dois coletores, óleo diesel e querosene, alcançando valores de recuperação em torno de 47,0% e teores de cinza de 12,3% (tabela III-2-3).

Um segundo fato que pode estar influenciando notoriamente a eficiência da flotação, é a liberação da matéria-carbonosa. Com o objetivo de quantificar esta variável, analisou-se a variação da flotação dos dois carvões com óleo diesel e querosene, em função da granulometria da alimentação. Nas figuras 11 e 12 é mostrada a relação entre o rendimento em massa (% peso) e a granulometria do concentrado. No caso do carvão da Camada Barro Branco a recuperação foi praticamente independente do tamanho, isto é, a flotação foi similar nas distintas faixas granulométricas (figura 11). Entretanto, a recuperação por flotação do carvão de Leão foi altamente dependente da granulometria. A recuperação do material mais fino ( $\sim 100$  microns) foi muito melhor que a fração maior (figura 12). Certamente os resultados indicam

uma baixa liberação da matéria carbonosa.

Com o objetivo de quantificar a influência da liberação, na flotação, recorreu-se a um estudo petrográfico de análise da associação da matéria mineral com a carbonosa.

Para o carvão da Camada Barro Branco foram analisados 11 perfis, onde se obteve um total de 525 grãos (tabela-VIII-1), sendo:

- 67,8% constituído de matéria orgânica pura
- 20,8% constituído de matéria orgânica + argila
- 4,0% constituído de matéria orgânica + pirita
- 7,4% constituído de matéria mineral pura.

Para o carvão de Leão foram analisados 10 perfis, onde se obteve um total de 515 grãos (tabela VIII-2), sendo:

- 47,8% constituído de matéria orgânica pura
- 41,9% constituído de matéria orgânica + argila
- 1,0% constituído de matéria orgânica + pirita
- 9,3% constituído de matéria mineral pura.

Estes resultados permitem concluir que a matéria mineral (argila), associada com a matéria orgânica, está em maior quantidade no carvão de Leão do que no da Camada Barro Branco, pois este apresentou maior teor de matéria orgânica liberada. O carvão de Leão mostrou uma quantidade maior de argila finamente distribuída no interior da matéria orgânica, do que na periferia do mesmo. No carvão da Camada Barro Branco esta disseminação foi bem menor.

As figuras 13, 14, 15 e 16 mostram alguns tipos de distribuição da argila na matéria orgânica, que foram encontradas em ambos os carvões. Nas figuras 13 e 15 tem-se os tipos de distribuição que foram encontradas com mais frequência no carvão de Leão e as figuras 14 e 16 no carvão da Camada Barro Branco.

No processo de beneficiamento é de fundamental importância a maneira pela qual a matéria mineral está disseminada na matéria orgânica, pois dependendo do tipo de distri

buição, é que se pode julgar a possibilidade de liberação - ou não da matéria mineral pela moagem. Para se conseguir resultados eficientes no processo de flotação, a matéria mineral deve estar liberada até uma granulometria conveniente. - Esta será tanto menor quanto mais intensa for a concreção de matéria mineral na orgânica. Quando a matéria mineral está regularmente distribuída em todo o grão, é praticamente impossível conseguir a liberação desta (figuras 13 e 16). Entretanto, melhorias podem ser esperadas quando a distribuição é do tipo mostrado na figura 14 (39).

Conclui-se, do estudo petrográfico que, a liberação - da matéria carbonosa, para a presente granulometria é mais completa no carvão da Camada Barro Branco. A diferença em matéria carbonosa, não liberada, foi de duas vezes maior para o carvão de Leão o que justifica em parte, a distinção - encontrada na flotação. Do mesmo modo, explicaria a flotação ser melhor para o material mais fino, no caso do carvão de Leão.

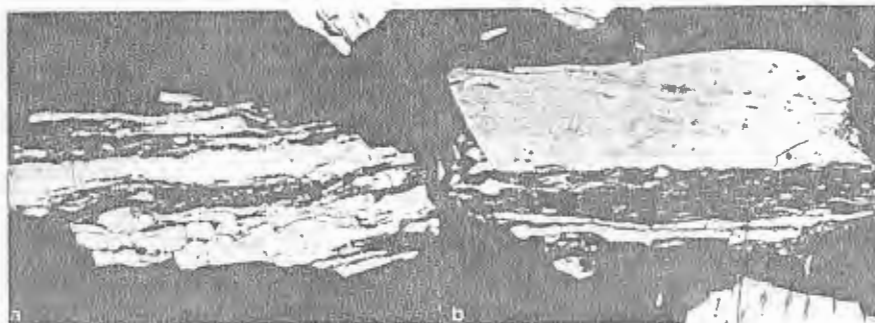


Figura 13

Figura 14



Figura 15

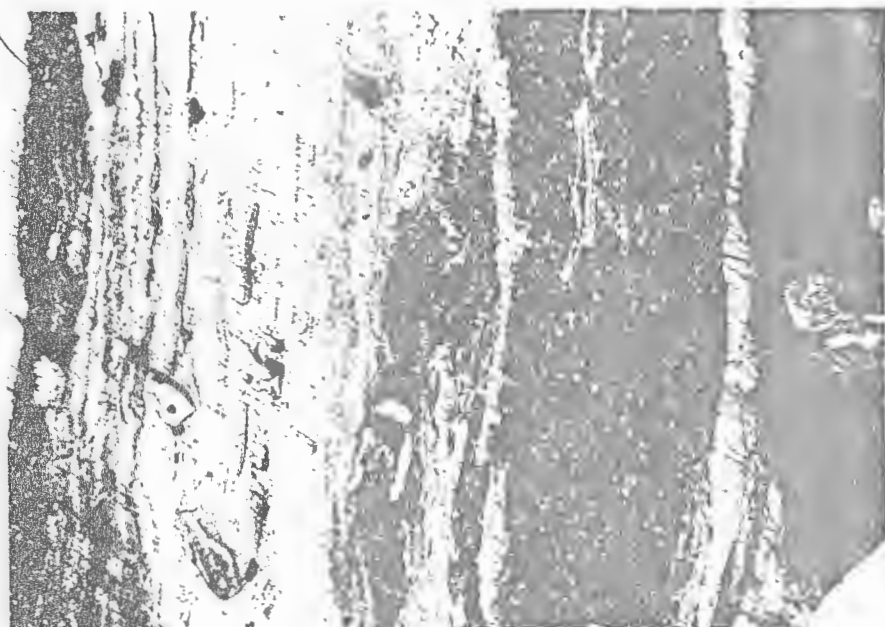


Figura 16

## V - Conclusões

1. Na flotação por espuma de carvões sul brasileiros de diferentes procedência, foram estudados e analisados os possíveis parâmetros que influenciam a eficiência do processo. As diferenças encontradas em termos de magnitude da separação são atribuíveis às diferenças em "Rank" e ao grau de liberação. A diferença em "Rank" foi demonstrada através das determinações de refletância média. O carvão da Camada Barro Branco apresentou um valor de aproximadamente o dobro do valor obtido pelo carvão de Leão. Segundo as classificações aceitas o carvão da Camada Barro Branco é um Betuminoso Alto Volátil e o carvão de Leão um Sub-betuminoso. Conseqüentemente, o carvão da Camada Barro Branco (Betuminoso) é comparativamente mais "hidrofobo" que o de Leão (Sub-betuminoso). Por outro lado, o carvão de Santa Catarina (Camada Barro Branco) apresentou uma boa liberação de matéria carbonosa para a granulometria ensaiada. Ao contrário, o carvão de Leão mostrou uma liberação muito baixa.

2. A flotação do carvão metalúrgico da Camada Barro Branco é factível economicamente. O uso de óleo diesel juntamente com o óleo de pinho conduz a obtenção de concentrados da ordem de 67,3% de recuperação de matéria carbonosa, com um conteúdo de cinzas ao redor de 9,2% e um índice de eficiência de 226. Estes valores foram obtidos, fixando o pH do meio em 6, percentagem de sólidos de 10,0% em peso e uma concentração ideal do coletor (óleo diesel) de 0,41 Kg. ton.<sup>-1</sup>.

3. A flotação do carvão de Leão, em termos de eficiência global (rendimento em massa), com o reagente "Walker 405 Century Flotation", foi razoável somente a concentrações muito elevada de reagente. No caso de óleo diesel ou querosene as recuperações foram comparativamente inferiores ao do carvão da Camada Barro Branco.

4. O espumante Metil Isobutil Carbinol (M.I.B.C.) aumentou a recuperação global dos dois carvões estudados. Esta ação coletora foi não seletiva e dependente da concentração. Altas concentrações de MIBC ( $0,43 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ ) aumentaram a flotação da matéria carbonosa e das cinzas (carvão de Leão) ao redor de 3 vezes. Entretanto, uma baixa concentração de MIBC ( $0,08 \text{ Kg.ton.}^{-1}$ ) foi suficiente para a obtenção de uma flotação quase que completa no caso do carvão da Camada Barro Branco.

## VI - Sugestões para futuros trabalhos

1. Deveria ser considerado um estudo sistemático das distintas variáveis que podem influir na flotação do carvão-vapor de Leão. Entre outras, o estudo compreenderia malha de liberação, pH, granulometria, concentração e natureza dos reagentes, etc.

2. O estudo de otimização da flotação baseado em modificações do circuito e aplicação de desenhos fatoriais em distintos carvões é fundamental nos estudos futuros, especialmente dos carvões do Rio Grande do Sul.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - Carvão de Pedra. Editora Geociência, 5, Agosto a Dezembro de 1978.
- 02 - YOUNG, T., Miscellaneous Works. Vol. I.6. Peacock, Morray London, 418, (1955).
- 03 - GIBBS, J. W. "The Collected Works of J. W. Gibbs", Longmans, Green, New York, Vol. I, 1931.
- 04 - FUERSTENAU, D. W. and HEALY, T. W., "Principles of Mineral Flotation", em Adsorptive Bubble Separation Techniques, Ed., Academic Press, Inc., New York and London, Chapter 6, 97, 1972.
- 05 - KRUYT. H. R., "Colloid Science", Elsevier, New York, 1952.
- 06 - SUN, S. C. "Effects of Oxidation of Coals on their Flotation Properties", Trans. AIME, 199, 396-401, (1954).
- 07 - SOMASUNDARAM, P., HEALY, T. W. and FUERSTENAU, D. W., J. Phys. Chem. 68, 3562, (1964).
- 08 - TANFORD, C., "The Hydrophobic Effect : Formation of Micelles and Biological Membranes", Wiley - Interscience Publication, 1973.
- 09 - JOWETT, A., "The Development of Studies in Froth Flotation Kinetics", De Ingenieur, 81, M11-M17, (1969).
- 10 - ANFRUNS, J. P., "The Flotation of Small Particles", Ph.D. Dissertation, Imperial College of Science and Technology, University of London, London, 1976.
- 11 - TOMLINSON, H. S. and FLEMING, M. G., "Flotation Rate Studies", 6 th, Int. Mineral Procng. Congress, Cannes, English Ed., 581-593, 1963.
- 12 - FLINT, L. R., "Factors Influencing the Design of Flotation Equipment", Ming. Sci. Eng., 5, 232-241, (1973).



- 13 - JOWETT, A., "Flotation Kinetics. Gangue Mineral Contamination of Froth", Brit. Chem. Eng., 2, 330-333, (1966).
- 14 - LASKOWSKI, J. and ISKRA, J. "Role of Capillary Effects in Bubble Particle Collision in Flotation". Trans. Inst. Min. Met. (Sect.c), 79, C6-C10, (1970).
- 15 - LASKOWSKI, J. "Particle Bubble Attachment in Flotation", Min. Sci. Eng., 6, 223-235, (1974).
- 16 - APLAN, F. F., "Coal Flotation", Flotation, A. M. Gaudin - Memorial Vol. 2, ed., AIME, New York, 1235-1264, - 1976.
- 17 - BRADY, G. A. and GAUGER, A. W., "Properties of Coal Surfaces", Industrial and Engineering Chemistry, 32, 1599-1604, (1940).
- 18 - BROWN, D. J., "Coal Flotation", Froth Flotation - 50 th Anniversary Volume, ed., AIME, New York, 518-538, 1962.
- 19 - HORSLEY, R. M. and SMITH, H. G., "Principles of Coal Flotation", Fuel, 30, 54-63, (1951).
- 20 - BENSLEY, C. N., SWANSON, A. R. and NICOL, S. K., "The Effect of Emulsification on the Selective Agglomeration of Fine Coal", International Journal of Mineral Processing, 4, 173-184, (1977).
- 21 - SUN, S. C., "Frothing Characteristics of Pine Oils in - Flotation". Trans. AIME, 193, 65-71, (1952).
- 22 - HAUNG, H. H., CALARA, J. V., BAUER, D. L. and MILLER, J. D., "Recent Developments in Separation Science", CRC, 1979.
- 23 - MITCHELL, D. W., discussion to paper by Gandrud, B. W. - and Riley, H. L., Trans. AIME, 177, 315, (1948).
- 24 - ISKRA, J., LASKOWSKI, J., "New Possibilities for Investigating Air-Oxidation Of Coal Surfaces at Low Temperatures", Fuel (London), 36, 5, (1957).
- 25 - LASKOWSKI, J., Discussion, Trans. AIME, 250, 225, (1971).

- 26 - LASKOWSKI, J., "Fundamentos Fisico Quimicos de la Flotacion", Fundamentos Fisico Quimicos de la Mineralurgia, Fernando Concha, Editor, Universidad de Concepcion, 484-622, 1974.
- 27 - WEN, W. W. and SUN, S. C., "An Electrokinetics Study on the Amine Flotation of Oxidized Coal", SME-AIME Fall Meeting & Exhibit, Denver, Colorado, 1976.
- 28 - SUN, S. C. and ZIMMERMAN, R. E., "The Mechanism of Coarse Coal and Mineral Froth Flotation", Trans. Aime, 187, 616-622, (1950).
- 29 - FIRTH, B. A., SWANSON, A. R. and NICOL, S. K., "The Influence of Feed Size Distribution on the Staged Flotation of Poorly Floating Coals", The Australian Institute of Mining and Metallurgy, 267, 49-53, (1978).
- 30 - CRAWFORD, J. T., "Importance of Pulp Density Particle Size and Feed Regulation in Flotation of Coal", Trans. AIME, 119, 150-162, (1936)
- 31 - WARREN, L. J., "Some Properties of Slime Coatings in Coal-Gangue Systems", Trans. Instn. Min. Metall, 84, C99 - C104, (1975).
- 32 - WARREN, L. J., "Flotation of Ultrafine Scheelite in Sodium Oleate Solution", J. Colloid interface Sci, 50, 307-318, (1975).
- 33 - RASTOGI, R. C., HIRT, W. C. and APLAN, F.F., "The Influence of Aeration, Agitation and Frother Concentration on The Rate of Coal Flotation and Pyrite Rejection", em preparação.
- 34 - Burdon, R. Q., "Some Factors Influencing the Rate of Flotation of Coal", Proceedings, 4 th International Coal Preparation Congress, Paper D-6, Harrogate, Great Britain, 273-285, 1962.
- 35 - BITTENCOURT, B. C. e NAHUYS, J. "Metodologia para estudo e Análise de Carvão Brasileiro", Porto Alegre, ITERS, Boletim nº 52, 1970.

- 36 - SWANSON, A. R., FIRTH, B. A. and NICOL, S. K. "A Convenient Index for the Assessment of Coal Cleaning Processes", The Broken Hill Proprietary Company Limited Central Research Laboratories, 1977, (em preparação).
- 37 - ADAMSON, A. W., "Physical Chemistry of Surfaces", 3<sup>rd</sup> - Ed, John Wiley of Sons, New York, 1976.
- 38 - ILLER, R. K., "Colloid Chemistry of Silica and Silicates, Cornell Univ. Press, New York, 1955.
- 39 - STACH, E. et alli Coal Petrology Gerbrüder Borntraeger Berlin Stuttgart, 280, 1975.

## A P Ê N D I C E

As tabelas seguintes descrevem as medidas dos microconstituintes, matéria orgânica, argila e pirita dos mistos, para todos os perfis analisados no carvão da Camada Barro Branco e da Jazida de Leão, onde

MO - matéria orgânica

MM - matéria mineral

A - argila

P - pirita

C A R V ã O D A C A M A D A B A R R O B R A N C O



Perfil 2

																medida total ( $\mu$ ) por grão		
NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	NO	MM
	20	32															32	20
																	194	26
																	156	54
18	2	8	8	12	2	18	6	18	2	6	20						80	40
								60	2	50	8						118	78
10	6	10	12														20	18
80	20	86	34														106	54
46	18	12															58	18
8	4	24	4	8	2	12	6	16	18								68	34
56	4	10	6	4													48	4
	6	56	8	56	6	12	8										70	10
																	104	28

Perfil 3

																medida total (μ) por grão			
NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	P	NO	A	NO	A	NO	AM
2	2	2	2	6	2	8	4	70	4	14	12	2	8	4	8	6	26	154	40
4	10	36	2	64	4	16	10											120	26
	16	24	4	12														36	20
	94	6	2	4	10	6	16	32										48	126
														44	10	20		64	10
10	2	34	4	28	4	52	4		4	80								204	16
44	28	50	20	50														144	48
									16	14								34	24
	10	90	16	30	8	6	50	1										126	81
58	18	50	18															108	36
2	4	10	4	6	8	22	20											40	36
40	30	54																94	50
48	16	16																64	16
														22	16	88		110	16



Perfil 4														medida total (U) por Grao				
MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	P	MD	A	MO	MM
54	18	58															112	18
20	16																20	16
44	42	44															88	42
46	10	4	2	36	4	6	16	14									106	32
	4	6	40	14	12	4	16	12									36	72
	46	14	2	8	6	2	6	16	10	8	12	8	2				56	84
	14	14	4	50	6	30											94	24
	18	18	2	2	4	24											40	24
																	94	26
																	180	40
	10	6	2	2	8	48	12										56	32
24	20	20	8	28	4	22	2	4	4								98	38
10	14	20	2	6	2	2	14	24	16	6	102						170	50
30	20	48	16														78	36
110	20																110	20
102	6	4	12	38													144	18
92	32	12	4														104	36

Perfil 5

																medida total (μ) por grão	
ND	A	ND	A	ND	A	ND	A	ND	A	ND	A	ND	A	ND	A	NO	MM
14	2	4	2	4	10	16										38	14
54	28	28	10													82	38
60	14	52	24													112	38
50	52	58	6	16	4	36	2	8	28			50	20	8	12	30	52
52	38	60															72
48	12																58
18	58	4	68	14	6												72
10	8	12	14	8	4	58	4	32	12	6	12	8	14	20			58
36	10	38	14														68
												82	8	4	4	20	72
																6	14
																20	24
																132	98

Perfil 6

												medida total (u) por grão						
MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	P	MD	P	MD	P	MD	MM	
68	34																68	34
12	14	20	18	14	6	28	4	18									92	42
20	16	38	14					172	38	10							182	38
112	78																58	30
								114	16	20	10	52					112	78
								56	30								186	26
44	14	50	16														56	30
	6	18	12	12	6	18											94	30
								12	8	64	12	94					48	24
80	22	48	20														170	20
																	128	42





Perfil 9

Perfil 9														medida total (u) por grão		
NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	A	NO	NO	NN
120	20	8	2	14	26										142	18
82	26														82	26
80	36	30						98	4	4	6	14	24	10	110	36
										8	72	22	6		146	54
18	6	6	4	4	4	4	2	2	8	2	2	4	2		78	50
								52	8	12	8	8	14		40	50
6	4	10	6	74	10	10									58	24
40	20														110	50
								106	18	24	2	10	20	10	40	20
															150	40

Perfil 10														medida total (u) por grão		
MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	NO	MM	NN
176	54														176	54
				14	8	12									26	8
				70	30	10									80	30
	10	12	4	14	50										26	64
				10	30	106									116	30
				70	10	30	8	22	10	8	16	46			176	41
				60	20	46									106	20
44	40	40													84	40
80	38	38	20												118	38
84	28														84	28
100	36	14													114	36





C A R V Ã O D E L E Ã O

Perfil 1

		Perfil 1																medida total (=) por grau				
MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	A	MD	MM	
10	8	6	8	2	60	10	2	60	10	4	2	60	10	4	2	60	10	4	2	60	10	50
40	2	6	18	6	8	32	4	10	6	8	30	12	10	20	110	110	50	50	50	50	50	50
10	20	6	84	42	32	8	18	154	66	154	66	154	66	154	66	154	66	154	66	154	66	154
6	8	4	2	4	6	12	4	16	10	4	18	50	51	104	56	104	56	104	56	104	56	104
18	50	10	40	8	14	10	2	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	14	2	12	12	26	4	10	4	16	16	14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6	10	8	28	2	18	2	20	4	4	8	4	8	4	6	116	54	70	24	78	32	48	70
20	14	2	6	2	22	2	6	2	14	8	4	2	6	8	116	58	164	56	58	72	70	150
2	4	40	4	2	2	4	2	6	2	14	8	4	2	6	8	116	58	164	56	58	72	70
18	4	16	32	14	34	150	90	68	152	58	122	164	56	58	72	70	150	90	68	152	58	122
16	30	14	56	8	30	164	56	58	72	70	150	90	68	152	58	122	164	56	58	72	70	150
50	26	40	30	74	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56
36	38	18	10	4	24	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104	56	104
116	70	34	180	90	68	152	58	122	164	56	58	72	70	150	90	68	152	58	122	164	56	58
30	60	8	80	12	12	18	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	4	6	8	42	20	64	6	8	20	16	14	38	4	12	4	6	152	68	12	6	18	26
80	56	84	14	12	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	6	2	6	12	6	18	6	18	6	18	6	18	6	18	6	18	6	18	6	18	6	18
12	18	6	8	18	26	34	18	26	34	18	26	34	18	26	34	18	26	34	18	26	34	18

Perfil 2

MO	Perfil 2										medida total (u) por grau		
	A	MO	A	MO	A	MO	A	MO	A	MO	MO	MM	
	14	76	2	8	12							84	28
74	8	28	12	8	2	38	2	2	6			150	50
26	42	50	8	58	2	2	10	18				154	62
56	8	2	2	8	4	6						72	44
30	8	2	10	2	2	2	2	2	14	6	6	76	82
	16	10	24	20	26	12	2	10	26	8	16	94	126
30	20	20	22	36								86	42
12	32	12	38									24	70
6	4	2	2	6	6	18	8	14	16			48	56
24	4	6	8	86	12	63	4	10				194	26
26	2	8	14	4	28							38	44
20	36	40										110	56
8	10	14	16	16	2	6	4	14				58	52
30	20	30	20	18								78	10
10	6	2	8	16	6	24	6	6	2	2	24	4	16
	16	10	10									10	26
72	18											78	48
90	30	12	12									132	44
16	6	6	14	2	2	18	16					72	68
18	12											18	12
14	10	26	8	6	10	6	4	16	2	2	4	78	38
78	26	20	26	60								158	52
134	50											134	50















Perfil 9

														medida total (u) per grão				
MD	A	P	MO	A	P	MO	A	P	MO	A	P	MO	A	P	MO	A	MO	MM
28			6	8		2	2		72	4		98					178	42
4	8		2	4		14											20	12
110		30	80														190	30
34	2		2	2		2	4					12	4				124	46
16		10	10		20	70						10	6	58	16		96	50
20	2		8	8		12	2		28	10		10	6	58	16		146	44
100	50																100	50
60	26		50	30		54											164	56
16	6		8	2		24	8		42	14		8	20	16	4		166	56
23	4		40	2		6	2		6	2		14	12	20	4		166	46
1		16	6		24	50		8	152		16	54					156	64
13	10		8	4		4	2		10	2		8	2	4	18		102	38
6	2		22	4		12	38		8	6		4	20				52	70
70	20		24														94	20
8	2		10	4		6	2		14								58	8
24	4		4	2		58	18		6	2		18	2	4	4		114	32
18	6		4	2		76	30										98	38
28		4	28		30	10		8	2	2		4	4	4	26		50	98
56	18		50	18													106	36
62		16	24		18	22											168	34
2	2		16	4		2	2		2	4		8	20	2	2	22	56	56
50	26		52	26		50											152	52
30	6		4	20		16	18		8	10		4	32	10	26	4	76	144
110		44	66														44	176
6	4		4	8		4	2		14	2		2	2	4	6	66	120	34
24	8		4	4		22	12		58	2		6	18	52			166	44
20	8		24	4		4	10		36	12							84	34
4	22		6	4		2	8		6	2		6	4	4	2	6	48	72
48	22		26	2		18	2		14	6		14	50	16	6	18	152	58
18	10		4	2		6	4		6	2		12	2	24	4	10	98	32

