

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALURGICA E DOS MATERIAIS

COMPORTAMENTO DO CARVÃO DE CANDIOTA DURANTE A
DESLAMAGEM EM HIDROCICLONES

por

Carlos Otávio Petter

Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Laboratório de Beneficiamento
Gravimétrico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, UFRGS.

Porto Alegre, 1990.

**COMPORTAMENTO DO CARVÃO DE CANDIOTA DURANTE A
DESLAMAGEM EM HIDROCICLONES**

DISSERTAÇÃO

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

MESTRE EM ENGENHARIA

Area de Concentração: Metalurgia Extrativa

por

Carlos Otávio Petter - Engenheiro de Minas

1990

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA, Area de Concentração: Metalurgia Extrativa, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFRGS

Co-orientador: Dr. André Jablonski
PPGEMM - UFRGS/CNPq

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Bergmann
Departamento de Engenharia dos Materiais - UFRGS

Dra. Elba Calesso Teixeira
Secretaria da Saúde e Meio Ambiente - RS

Químico Peter Humphrey
AKW do Brasil

Dr. André Jablonski
PPGEMM - UFRGS/CNPq

Dr. Carlos Hoffmann Sampaio
Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFRGS

Coordenador de PPGEMM:

Dr. Ildon Brochadt
Doutor em Ciências

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Carlos Hoffmann Sampaio, orientador e amigo, por sua dedicação em mostrar o caminho, e principalmente pela maneira ética e sábia de lidar com seus colaboradores.

Ao Prof. André Jablonski, coorientador e amigo, pelo auxílio na concepção deste trabalho.

Ao engenheiro Gorki D'Avila pelo auxílio na realização dos testes de ciclonagem.

A Cientec por permitir a utilização de seus equipamentos.

A Companhia Riograndense de Mineração pelo fornecimento de carvão para os testes de ciclonagem.

Ao engenheiro Cesar Carraro pelo fornecimento de informações relativas à Mina de Candiota.

A Empresa AKW do Brasil, em especial ao Sr. Peter Humphrey e ao Eng. Yoshimy Yamamoto.

As Químicas Ana Tavares, Eliane Cauduro e Tatiana Saint Pierre pela realização das análises de laboratório.

Aos alunos Marcos Cunha e Jacques Bellus pelo auxílio na preparação de amostras e ensaios de laboratório.

Ao aluno Marco Aurélio Parisi pelo desenvolvimento de software de apoio ao trabalho.

Ao geólogo Gérson Miltzarek pelo trabalho petrográfico.

A aluna de arquitetura Larissa Fagundes pelo auxílio na "Arte Final".

Ao Prof. Jorge Rúbio pelo fornecimento de artigos técnicos ligados ao assunto desta dissertação.

Ao engenheiro e colega Diosnel Rodriguez pelo auxílio na realização dos ensaios em Cachoeirinha.

Ao engenheiro Ivo André Schneider pelo exemplo de dedicação à pesquisa.

Aos colegas de Laboratório Erwin, Leandro, Klein, Solange, Elzivir, Miriam, Irineu, Silvia, Marçal, Gerson, Konnie, Caco', Milk, Grande Miro, Ezelina, Beal, Márcia, Angela, Julio, Julio, Giaane, Tanísia, Erny, Maarta, Isabela, Luíse e Adriane, pela agradável convivência que tivemos neste período.

As meninas do PPGEMM, Verônica, Rose, Lourdes, Beatriz, Verinha e Suzie pela eficiência.

Ao Eng. Marcelo Tavares, que com sua inteligência e desprendimento colaborou imensamente na realização desta dissertação.

Meu agradecimento especial ao aluno e futuro colega Luis Augusto Colembergue Klujszo pela dedicação nestes dois anos de trabalho.

A minha esposa Anália

SUMARIO

Indice das Figuras	x
Indice das Tabelas	xiii
Indice das Fotos	xv
Resumo	xvii
Abstract	xix
1. Introdução	001
2. Revisão Bibliográfica	005
2.1. Carvão de Candiota	005
2.1.1. A Mina de Candiota	005
2.1.1.1. Localização	005
2.1.1.2. Reservas	005
2.1.1.3. Geologia	008
2.1.1.4. Método de Lavra e Produção	010
2.1.2. Propriedades e Composição do Carvão	010
2.2. Teoria de Hidrociclones	014
2.2.1. Padrão Interno de Fluxo	014
2.2.2. Distribuição das Velocidades no Ciclone	016
2.2.2.1. Velocidade Tangencial	016
2.2.2.2. Velocidade Vertical	017
2.2.2.3. Velocidade Radial	017
2.2.3. Forças de Separação que Atuam	020
2.2.4. Eficiência dos Ciclones	022
2.2.4.1. Curva de Eficiência Reduzida	025

2.2.5. Fatores que Afetam a Performance do Ciclone .	026
2.2.6. Aplicações dos Hidrociclones	038
2.3. Hidrociclone de Fundo Plano	045
2.3.1. Princípio de Funcionamento	045
2.3.2. Aplicações	050
3. Experimental	051
3.1. Material e Reagentes	051
3.1.1. Carvão	051
3.1.2. Reagentes	051
3.2. Equipamentos	052
4. Metodologia	053
4.1. Preparação do Material	053
4.2. Testes de Ciclonação	054
4.2.1. Circuito Fechado	054
4.2.2. Circuito Aberto	054
4.3. Petrografia	055
4.4. Afunda-Flutua	055
5. Resultados e Discussões	057
5.1. Testes em Circuito Fechado	057
5.1.1. Ciclone Convencional	057
5.1.2. Ciclone de Fundo Plano	061
5.1.3. Desempenho dos Equipamentos	064
5.2. Teste em Circuito Aberto	066
5.2.1. Balanço de Massas e Cinzas do Processo	069

5.2.2. Eficiência do Equipamento	070
5.3. Petrografia	071
5.3.1. Circuito Fechado	072
5.3.2. Circuito Aberto	073
5.4. Ensaio Afunda-Flutua	074
6. Conclusões	078
7. Sugestões	081
8. Bibliografia	083
9. Anexos	086

INDICE DAS FIGURAS

Figura 1 - Circuito proposto para o beneficiamento do carvão de Candiota	002
Figura 2 - Localização da Mina de Candiota	006
Figura 3 - Localização da Mina de Candiota	007
Figura 4 - Mapa Geológico Simplificado da Bacia do Paraná ..	009
Figura 5 - Fluxo dentro de um Hidrociclone	014
Figura 6 - Forças que agem sobre uma partícula dentro do Hidrociclone	015
Figura 7 - Velocidade tangencial	018
Figura 8 - Velocidade vertical	018
Figura 9 - Velocidade radial	019
Figura 10 - Forças de separação no Hidrociclone	020
Figura 11 - Curva de Tromp para Hidrociclones	023
Figura 12 - Correção da curva de Tromp	024
Figura 13 - Desenho esquemático do Ciclone	027
Figura 14 - Influência da pressão no d ₅₀ e na capacidade de um Ciclone	032
Figura 15 - Influência da percentagem de sólidos no tamanho de corte	033
Figura 16 - Tipos de entrada da alimentação	034
Figura 17 - "Lay-outs" de circuitos de moagem com o uso de Hidrociclones	040
Figura 18 - "Lay-outs" de circuitos de moagem com o uso de Hidrociclones	042
Figura 19 - Altura de leitos no Cilone de Fundo Plano	047
Figura 20 - Funcionamento do leito represado	049
Figura 21 - Circuito aberto	087
Figura 22 - Circuito fechado	088

Figura 23 - Ciclone Convencional - recuperação em massa por faixa granulométrica para diversos tempos de ciclonagem	060
Figura 24 - Ciclone Convencional - teores de cinza por faixa granulométrica para diversos tempos de ciclonagem	060
Figura 25 - Ciclone Fundo Plano - recuperação em massa por faixa granulométrica para diversos tempos de ciclonagem	062
Figura 26 - Ciclone Fundo Plano - teores de cinza por faixa granulométrica para diversos tempos de ciclonagem	062
Figura 27 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone Convencional para o tempo imediato	089
Figura 28 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone Convencional para o tempo 5 min. .	089
Figura 29 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone Convencional para o tempo 10 min.	090
Figura 30 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone Convencional para o tempo 15 min.	090
Figura 31 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo imediato	091
Figura 32 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo 5 min.	091
Figura 33 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo de 10 min.	092
Figura 34 - Curva de partição do teste em circuito fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo de 15 min.	092
Figura 35 - Curva de partição do teste em circuito aberto com o Ciclone de Fundo Plano - teste 1	093
Figura 36 - Curva de partição do teste em circuito aberto com o Ciclone de Fundo Plano - teste 2	093
Figura 37 - Curva de partição do teste em circuito aberto com o Ciclone de Fundo Plano - teste 3	094

- Figura 38 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -2 +1,19 mm para o Ciclone Convencional 095
- Figura 39 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -1,19 +0,59 mm para o Ciclone Convencional 095
- Figura 40 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -0,059 +0,074 mm para o Ciclone Convencional ... 096
- Figura 41 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -0,074 mm para o Ciclone Convencional 096
- Figura 42 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -2 +1,19 mm para o Ciclone de Fundo Plano 097
- Figura 43 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -1,19 +0,59 mm para o Ciclone de Fundo Plano ... 097
- Figura 44 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -0,59 +0,074 mm para o Ciclone de Fundo Plano .. 098
- Figura 45 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonagem na fração -0,074 mm para o Ciclone de Fundo Plano 098
- Figura 46 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral nos diversos produtos por faixa granulométrica (-2 +1,19 mm) para o Ciclone de Fundo Plano em circuito aberto 075
- Figura 47 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral nos diversos produtos por faixa granulométrica (-1,19 +0,59 mm) para o Ciclone de Fundo Plano em circuito aberto 075
- Figura 48 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral nos diversos produtos por faixa granulométrica (-0,59 +0,074 mm) para o Ciclone de Fundo Plano em circuito aberto 076
- Figura 49 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral nos diversos produtos por faixa granulométrica (-0,074 mm) para o Ciclone de Fundo Plano em circuito aberto 076

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas, químicas, geológicas e físico-químicas do carvão de Candiota	011
Tabela 2 - Relação das aberturas com o diâmetro do ciclone segundo Rietema e Bradley	028
Tabela 3 - Distribuição granulométrica e teores de cinza por faixa, dos carvões utilizados nos testes em circuito fechado	051
Tabela 4 - Circuito fechado - Ciclone Convencional	058
Tabela 5 - Circuito fechado - Ciclone de Fundo Plano	063
Tabela 6 - Dados de desempenho do Ciclone Convencional em circuito fechado	099
Tabela 7 - Dados de desempenho do Ciclone de Fundo Plano em circuito fechado	099
Tabela 8 - Dados de desempenho do Ciclone de Fundo Plano em circuito aberto	099
Tabela 9 - Dados de recuperação em massa e teores de cinza das frações -2 +0,074 mm e -0,074 mm do Ciclone Convencional em circuito fechado	100
Tabela 10 - Dados de recuperação em massa e teores de cinza das frações -2 +0,074 mm e -0,074 mm do Ciclone de Fundo Plano em circuito fechado	100
Tabela 11 - Dados de recuperação em massa e teores de cinza das frações -2 +0,074 mm e -0,074 mm do Ciclone de Fundo Plano em circuito aberto	100
Tabela 12 - Análise das amostras de "underflow" e "overflow" em circuito aberto	067
Tabela 13 - Alimentação reconstituída do teste em circuito aberto	068
Tabela 14 - Teores de cinza e recuperação em massa das frações +0,074 mm e -0,074 mm - T1 - circuito aberto	069
Tabela 15 - Contagem dos grupos macerálicos e matéria mineral, por faixa granulométrica, para os diversos tempos de ciclonagem - Ciclone Convencional	101

Tabela 16 - Contagem dos grupos maceráticos e matéria mineral, por faixa granulométrica, para os diversos tempos de ciclonagem - Ciclone Fundo Plano	102
Tabela 17 - Contagem dos grupos maceráticos e matéria mineral, por faixa granulométrica, para os produtos do teste em circuito aberto	103
Tabela 18 - Teste de afunda-flutua - alimentação e produto do teste em circuito aberto	074

INDICE DAS FOTOS

Foto 1 -	Ciclone Convencional, fração -2 +1,19 mm, tempo de ciclonagem: imediato, vitrinita (V) com fissuras e impregnações de argila (A)	104
Foto 2 -	Ciclone Convencional, fração -2 +1,19 mm, tempo de ciclonagem: 15 minutos, vitrinita (V) com fissuras e raros grãos de argila (A)	104
Foto 3 -	Ciclone Fundo Plano, fração -1,19 +0,59 mm, tempo de ciclonagem: imediato, vitrinita (V) com impregnações de argila (A)	105
Foto 4 -	Ciclone Fundo Plano, fração -1,19 +0,59 mm, tempo de ciclonagem: 15 minutos, grão de vitrinita (V) praticamente isenta de impregnações de argila	105
Foto 5 -	Ciclone de Fundo Plano, fração -0,074 mm, tempo de ciclonagem: imediato, aglomeração de matéria orgânica e matéria mineral	106
Foto 6 -	Ciclone de Fundo Plano, fração -0,074 mm, tempo de ciclonagem: 15 minutos, é mostrada a separação física entre matéria orgânica (MO) e matéria mineral (MM)	106
Foto 7 -	Ciclone Convencional, fração -2 +1,19 mm tempo de ciclonagem: 15 minutos, vitrinita (V) mostrando o padrão de quebra (cúbico)	107
Foto 8 -	Ciclone Convencional, fração -2 +1,19 mm, tempo de ciclonagem: imediato, grão de vitrinita mostrando o padrão forma (misto)	108
Foto 9 -	Ciclone Convencional, fração -2 +1,19 mm, tempo de ciclonagem: 15 minutos, grão de vitrinita mostrando o padrão forma (anguloso)	108
Foto 10 -	Ciclone de Fundo Plano, fração -2 +1,19 mm, tempo de ciclonagem: imediato, grão de vitrinita (V) com impregnações de argila (A), mostrando o processo de quebra, com mudança no padrão, de misto a anguloso	109
Foto 11 -	Ciclone de Fundo Plano, fração -2 +1,19 mm, tempo de ciclonagem: imediato, grão de vitrinita (V) mostrando o padrão-forma (anguloso com bordas arredondadas)	109

Foto 12 - Ciclone de Fundo Plano, fração -2 +1,19 mm, tempo de ciclonagem: imediato, grão de vitrinita (V) mostrando o padrão-forma (anguloso com bordas arredondadas) 110

COMPORTAMENTO DO CARVAO DE CANDIOTA DURANTE A DESLAMAGEM EM HIDROCICLONES

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento da fração -2 mm do carvão de Candiota, durante a deslamagem em hidrociclones.

Foram feitos testes de ciclonagem em circuito fechado para comparar o comportamento da matéria orgânica e matéria mineral, quando submetidas aos esforços mecânicos inerentes ao processo. Nestes testes foram usados tanto os ciclones convencionais como os de fundo plano.

Realizou-se um teste em escala piloto com circuito aberto para avaliar o comportamento das partículas, no caso de se utilizar o hidrociclone de fundo plano na futura planta de Candiota.

Os resultados de análise granulométrica e análise imediata mostraram a cominuição sofrida pela fração -2 +0,59 mm com a respectiva diminuição nos teores de cinza, nos dois tipos de ciclones. As frações subseqüentes têm um aumento momentâneo na massa, para as frações compreendidas entre 0,59 mm e 0,074 mm. Abaixo de 0,074 mm existe um aumento contínuo de massa, devido a acumulação do material argiloso que foi retirado das frações mais grosseiras, juntamente com o carvão ultrafino gerado.

Com os estudos petrográficos ficou demonstrada a diferença no tipo de cominuição sofrida pelo carvão quando deslamado no ciclone convencional e no ciclone de fundo plano.

ABSTRACT

This work aims to analyze the behavior of the minus 2 mm fraction of the Candiota Coal during the desliming in hydrocyclones.

To compare the mineral and organic matter behavior when submitted to mechanic stresses inherent to the process, hydrocyclone experiments in closed circuit were done.

In these tests conventional hydrocyclones as well as circulating bed concentrators (CBC) were used.

Predicting future applications of CBC in the Candiota Preparation Plant, a pilot scale test in open circuit was carried out to evaluate the particles behavior

Results from size distribution and proximate analyses showed the cominution of the -2 +0,59 mm with decrease in the ash grade in both cyclones.

The subsequent size fractions showed a momentary mass increase, for fractions between 0,59 mm and 0,074 mm. Below 0,074 mm there is a continue mass increase, due to clay matter accumulation from coarse fractions, along with the ultrafine coal generated.

Petrographic studies showed the different kinds of cominution suffered from the coal when subjected to both conventional and CBC hydrocyclones.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho é a sequência de estudos realizados, referentes a uma proposta de planta de beneficiamento (1,3) para o carvão de Candiota, cujo circuito (figura 1) visa a produção de carvão com 35% de cinzas para a indústria cimenteira. Deste devemos observar:

- O carvão é britado a -30 mm e classificado em duas frações granulométricas (-30 +2 mm e -2 mm).

- A fração -30 +2 mm seguirá para uma pré-lavagem em jig. O rejeito será constituído de pelo menos 10% da massa total do carvão "run-of-mine" (ROM) e terá um teor de aproximadamente 70% de cinzas.

- O produto intermediário será utilizado diretamente na termoelétrica ou reduzido a -2 mm e enviado para o circuito de finos.

- O produto pré-lavado será composto de um carvão com 35% de cinzas e baixo teor de enxofre.

- Os produtos intermediário e final da pré-lavagem comporão 44% e 10% do ROM em massa.

- O circuito de finos receberá 36% ou 80% do ROM (dependendo do destino dado ao produto intermediário da pré-lavagem) e será constituído de uma bateria de ciclones para deslamagem do carvão, com posterior concentração e diminuição do teor de enxofre em espirais de Reichert.

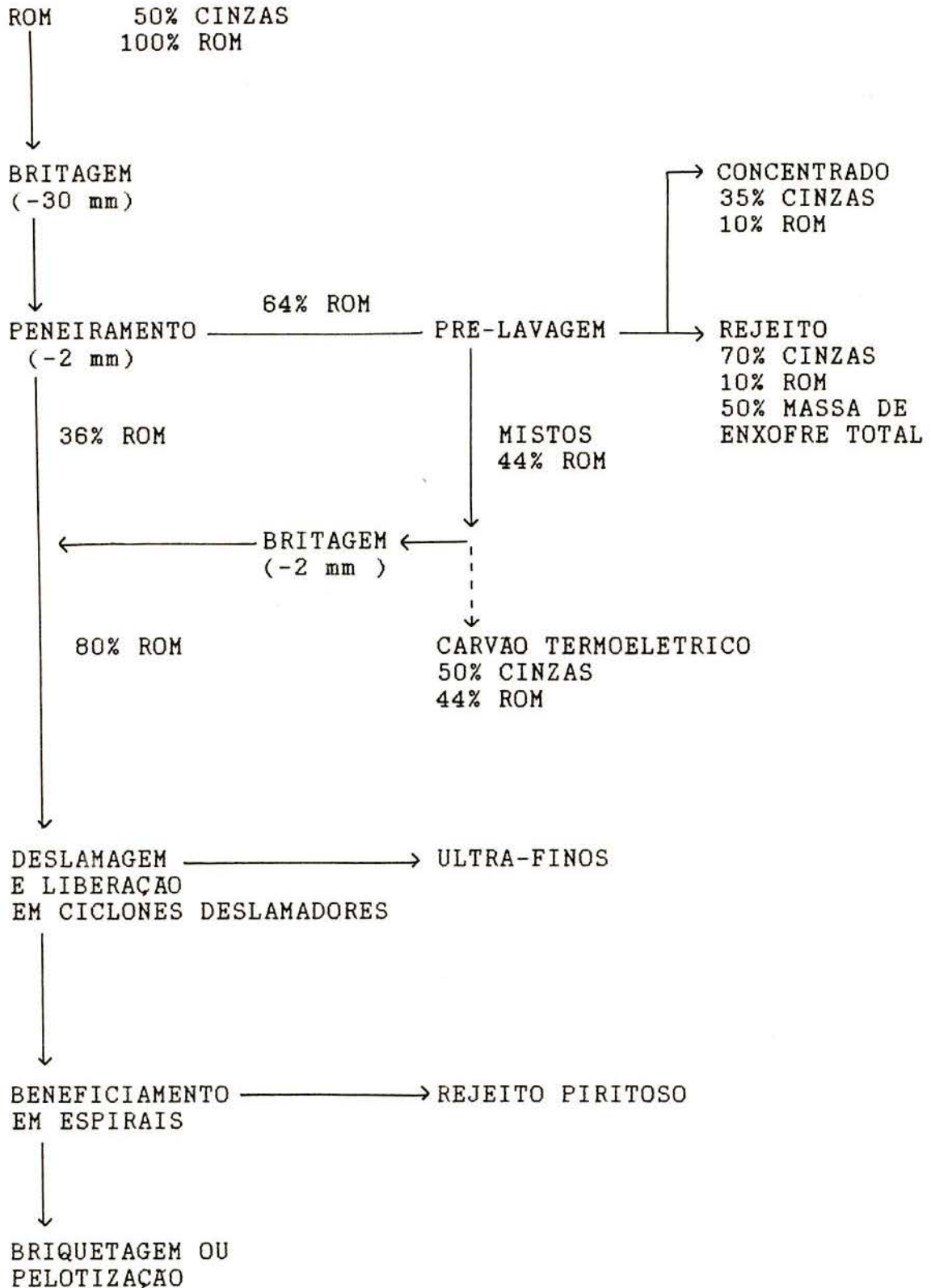


Figura 1- Circuito Proposto para o Beneficiamento do Carvão de Candiota

O objetivo deste trabalho reside na avaliação da etapa de hidrociclonação, com a elaboração de balanços de massas.

Em trabalho anterior (3), constatou-se que durante a ciclonação em circuito fechado com a fração -2 mm do carvão de Candiota houve degradação do material acima de 0,1 mm, com a diminuição do teor de cinza. Nas frações abaixo de 0,1 mm ocorreu o contrário, evidenciando a liberação do material orgânico e argiloso.

Resolveu-se pois, fazer um estudo criterioso de ciclonação em circuito fechado para avaliar o fluxo de matéria orgânica e mineral entre as frações estudadas, quais sejam: -2 +1,19 mm, -1,19 +0,59 mm, -0,59 +0,15 mm, -0,15 +0,088 mm, -0,088 +0,074 mm e -0,074 mm. Estes testes foram realizados em dois tipos de ciclone, o convencional (cônico) e o de fundo plano.

Optou-se por fazer testes com o ciclone de fundo plano por duas razões: pelo princípio de funcionamento (leito represado (2)) que alentava a possibilidade de ocasionar um maior trabalho mecânico sobre as partículas, e por razões práticas, já que se tinha à disposição uma unidade com a geometria adequada ao "top size" da alimentação (2 mm).

O trabalho dividiu-se, assim, em duas fases:

1- testes em circuito fechado com os ciclones do tipo cônico e fundo plano.

2- teste em circuito aberto com o ciclone de fundo plano.

2. REVISAO BIBLIOGRAFICA

2.1. Carvão de Candiota

2.1.1. A Mina de Candiota

2.1.1.1. Localização

A mina de Candiota situa-se, na Depressão Periférica, a sudoeste do estado do Rio Grande do Sul (figura 2), próxima às cidades de Bagé, Pinheiro Machado e Herval, a 400 km de distância da capital do estado, Porto Alegre. Esta área se caracteriza por apresentar extensas jazidas de carvão - cerca de 38% do total das reservas nacionais - que formam o que se denomina "Jazida Grande Candiota", a principal jazida do Rio Grande do Sul e do Brasil (figura 3).

2.1.1.2. Reservas

A Jazida Grande Candiota abrange uma área de cerca de 2.500 Km², possuindo reservas de cerca de 12 bilhões de toneladas de carvão, dos quais 1,7 bilhões de toneladas correspondem à reserva medida, ou seja, completamente conhecida em termos de espessura, características, drenagem, custos de extração, métodos de extração, etc.; 2,2 bilhões

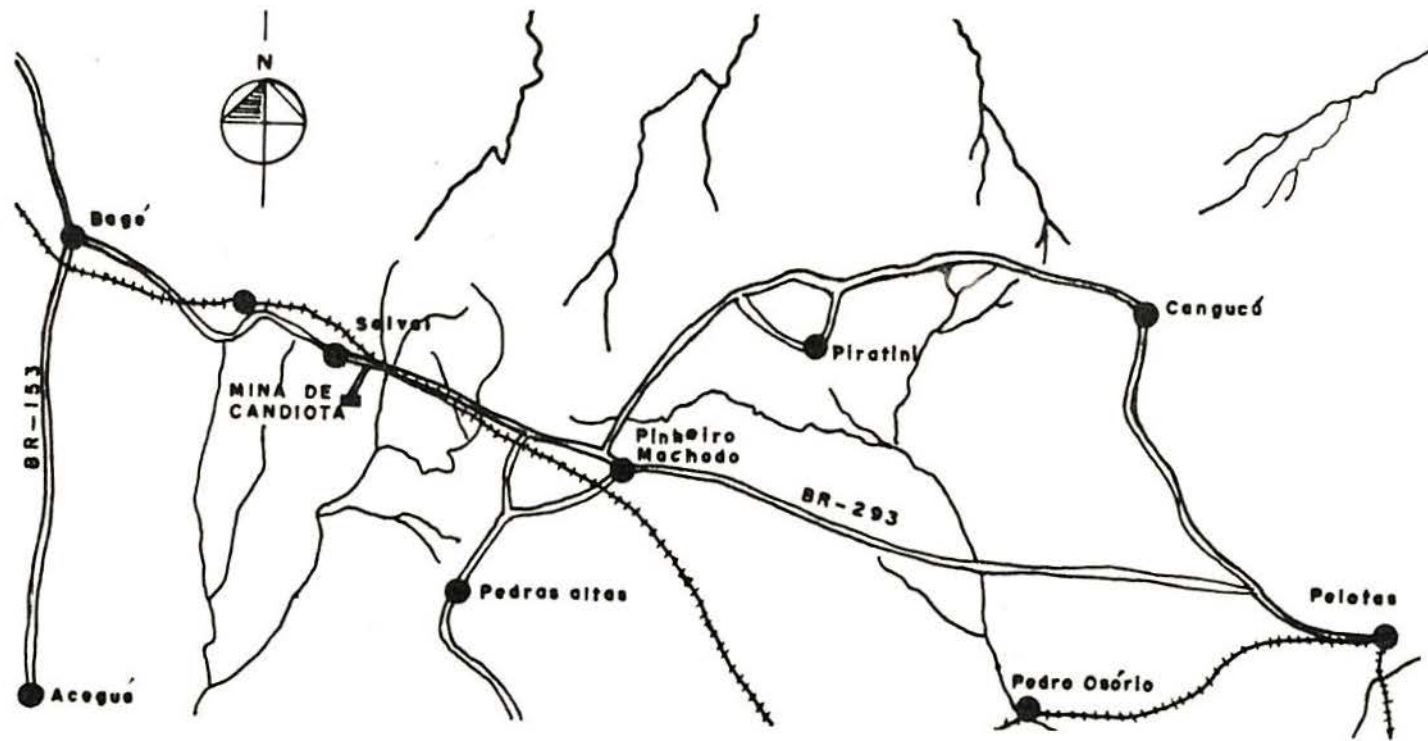


Figura 2 - Localização da Mina de Candiota (26)

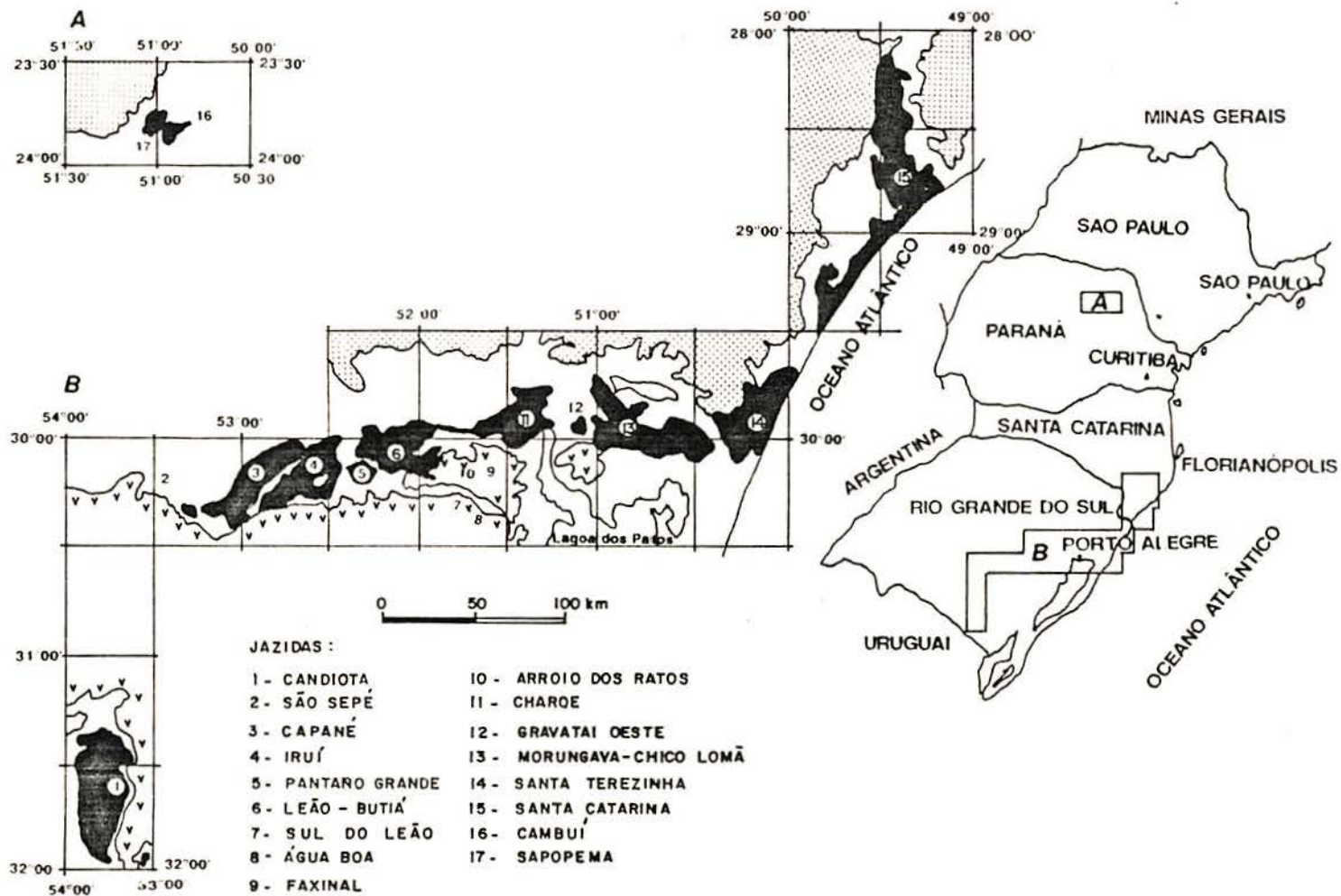


Figura 3 - Localização da Mina de Candiota (DNPM/CPRM, 1986 modificado) (27)

de toneladas correspondem à reserva indicada que seriam as bordas, a extrapolação das bordas da área medida; e cerca de 8,0 bilhões de toneladas correspondem à reserva inferida, estimada com base em afloramentos, geologia e sondagens pioneiras (4).

2.1.1.3. Geologia

Geologicamente, as formações permocarboníferas da Jazida Grande Candiota podem ser enquadradas na grande bacia sedimentar que abrange o Rio grande do Sul, Uruguai, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Mato Grosso (figura 4).

As camadas de carvão (5) estão associadas a arenitos, siltitos e argilitos que integram a denominada Formação Rio Bonito. A Camada Candiota propriamente dita apresenta uma espessura média em torno de 5 metros intercalada por uma camada de argila que pode alcançar 1 metro de espessura. Esta intercalação, que divide a camada nos bancos superior e inferior, foi estudada por Formoso (6) indicando a presença de finos leitos de caulinita, aos quais Corrèa da Silva (7,8) caracterizou como "tonstein".

Abaixo estão relacionados alguns dados sobre as espessuras das camadas na mina de Candiota (9):

- Cobertura média de estéril 13,39 m
- Espessuras:
- Banco superior 2,71 m

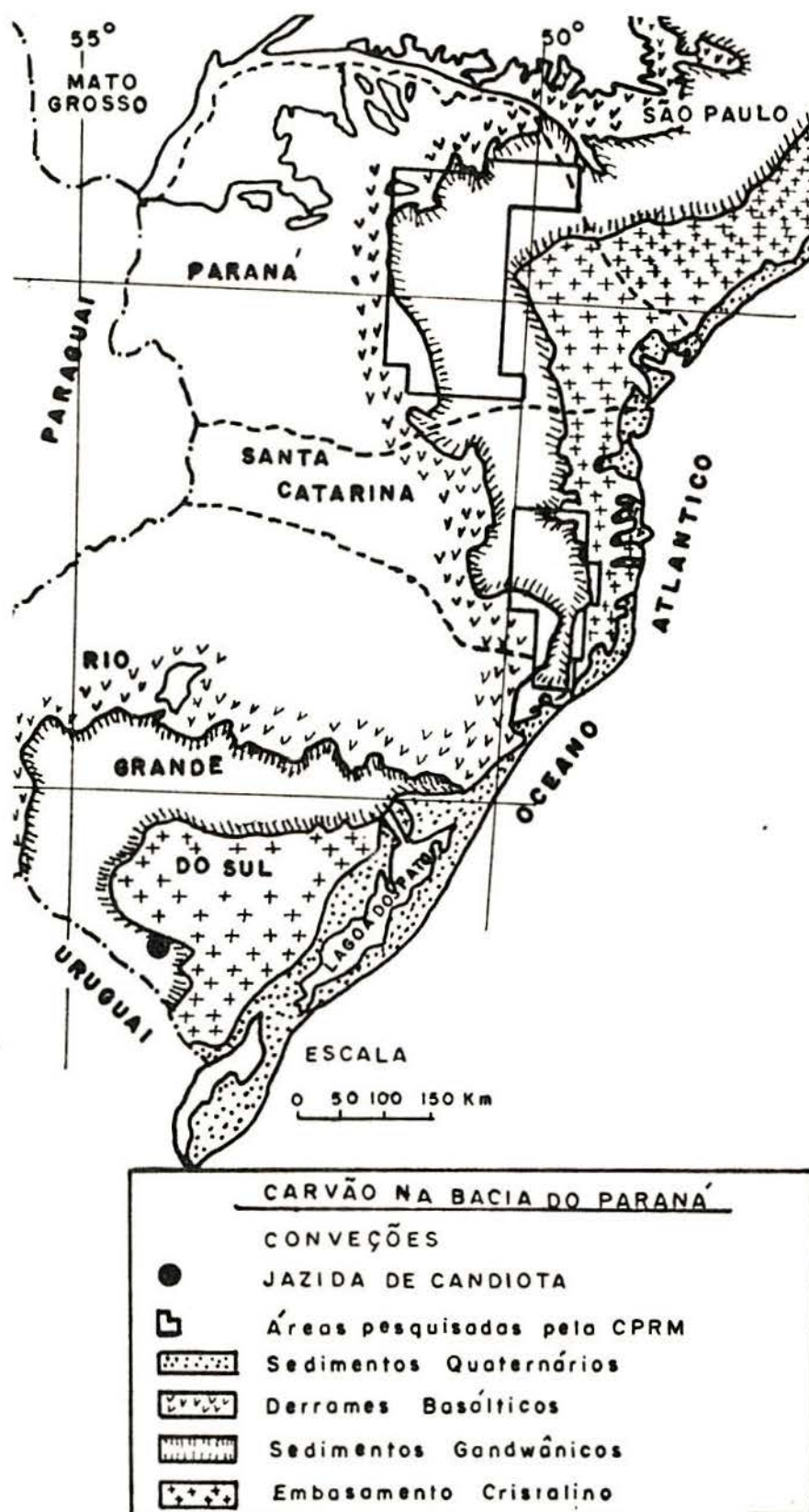


Figura 4 - Mapa Geológico Simplificado da Bacia do Paraná (26).

- Argilito intermediário	0,87 m
- Banco inferior	1,71 m
- Carvão total	4,42 m

2.1.1.4. Método de Lavra e Produção

O método de lavra (céu aberto) utilizado é o "Contour Mining", isto é, a mineração é desdobrada numa frente de aproximadamente 30 metros, seguindo a grosso modo as curvas de nível da camada de carvão. A descobertura é feita por uma Dragline de 27 m³, as camadas de carvão são desagregadas com explosivos e o argilito intermediário é escarificado e separado com trator de esteiras. O transporte do carvão até a instalação de britagem é feito pelo sistema "Truck-Shovel" (9).

A produção mensal é de aproximadamente 130.000 ton, perfazendo 1.560.000 ton/ano, com relação estéril/minério de 1,5 m³/ton (9).

2.1.2. Propriedades e Composição do Carvão

Dentre as principais características físicas, químicas, geológicas, fisico-químicas e tecnológicas deste carvão podem-se citar:

Tabela 1: Características físicas, químicas, geológicas e físico-químicas do carvão de Candiota.

	CAMADA SUPERIOR	CAMADA INFERIOR
<u>Análise Imediata (28)</u>		
Umidade de Equilíbrio (%)	11,2	13,4
Materiais voláteis (%)	35,6	36,5
Carbono fixo - d (%)	26,0	29,5
Cinzas - d (%)	51,7	50,8
<u>Análise Elementar (28)</u>		
Carbono - C ^{daf} (%)	77,4	77,9
Hidrogênio - H ^{daf} (%)	4,4	4,5
Nitrogênio - N ^{daf} (%)	1,5	1,4
Oxigênio - O ^{daf} (%)	15,2	14,6
Enxofre total - S _t (%)	1,2	1,0
<u>Composição Química das Cinzas (%) (10)</u>		
SiO ₂	71,2	71,2
Al ₂ O ₃	19,6	21,4
CaO	0,7	0,5
MgO	0,4	0,5
Fe ₂ O ₃	6,2	4,4
TiO ₂	0,7	0,7
MnO ₂	0,07	0,05
K ₂ O	0,9	0,9
Na ₂ O	0,2	0,2
P ₂ O ₅	0,01	0,01
SO ₃	-	0,01
<u>Propriedades Tecnológicas (10)</u>		
Peso específico real (g/cm ³)	1,9	1,9
Moabilidade - HGI	107,0	100,0
Índice de Inchamento - FSI	zero	zero
Poder calorífico superior - b.s. (cal/g)	3210,0	3420,0
Reatividade do CO ₂ (OPPERS-JENKENER)	FACILMENTE REATIVO	FACILMENTE REATIVO

Características Tecnológicas (1):

- O carvão de Candiota é classificado como sub-betuminoso A, segundo o rank, de acordo com os resultados de análises químicas de concentrado de vitrênio, poder refletor médio das vitrinitas e poder calorífico.

- A composição petrográfica do carvão bruto apresenta os seguintes resultados: vitrinita 40%, exinita 4-8% e inertinita 16%, com um poder refletor médio das vitrinitas igual a 0,40.

- A carbonização, realizada em retortas Fischer, apresenta produção média de alcatrão de 12%, sendo que este alcatrão possui 13% de alifáticos, 17% de aromáticos e 70% de polares (fração pesada - asfaltenos). O rendimento de gás é de 13% com uma composição química média de CH_4 de 40% e C_nH_m de 12-15%. O poder calorífico do gás é de 34,4 MJ/m³, com um teor de 78% de componentes combustíveis, e um peso específico de 1,08-1,10 kg/m³.

- As curvas de Rosin-Rammler (RRSB) para o carvão de Candiota ROM e cominuído a diversos "top sizes" indicam a presença abundante de material fino. Mesmo o carvão ROM apresenta cerca de 20% em peso de material com granulometria menor do que 0,5 mm, e o carvão ROM cominuído a -2 mm mostra cerca de 35% de material abaixo de 0,1 mm.

- Devido a presença de uma enorme quantidade de material argiloso junto ao carvão de Candiota, e devido a diferença de friabilidade e granulometria entre a matéria carbonosa e estas argilas, ocorre uma elevação do teor de cinzas das frações granulométricas menores do que 0,1 mm. No caso do carvão ROM cominuído a -2 mm, a fração -0,063 mm apresenta um teor de aproximadamente 66% de cinzas.

- Fenômeno inverso é observado com os teores de enxofre total em função da granulometria. Ocorre um aumento do teor de enxofre total nas frações granulométricas maiores, devido, principalmente, a dureza elevada da pirita, forma de enxofre que ocorre em maior quantidade neste carvão.

- Um trabalho microscópico com os finos de Candiota mostra um grau de liberação da matéria orgânica muito baixo, indicando uma quantidade elevada de partículas mistas. Foi observado que, embora ocorra uma mistura muito grande entre a matéria orgânica e argilas, os grãos de pirita encontram-se praticamente liberados.

2.2. Teoria dos Hidrociclones

2.2.1. Padrão Interno de Fluxo

O padrão aceito para o fluxo dentro de um hidrociclone é a espiral dentro de uma espiral (11).

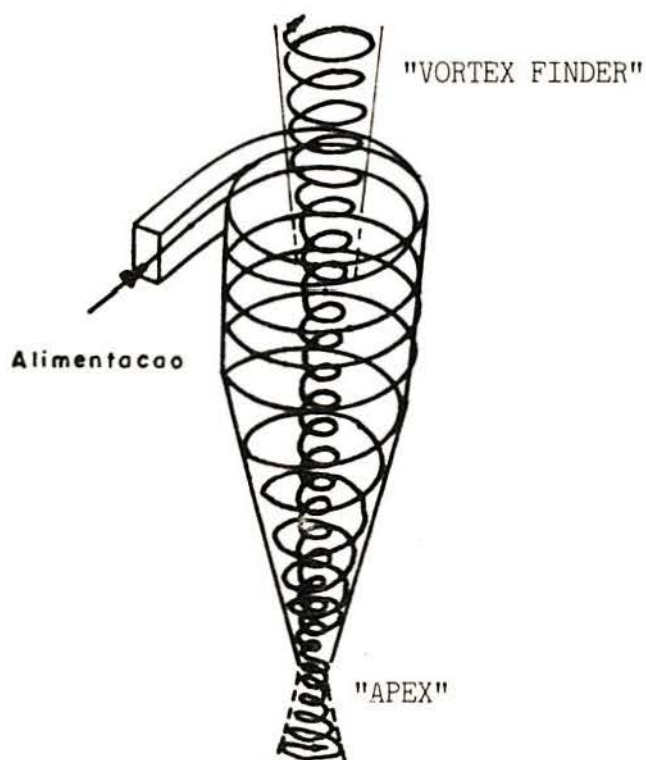


Figura 5 - Fluxo dentro de um hidrociclone (28)

Estas espirais são geradas pela alimentação tangencial, girando na mesma direção, com fluxos de sentido contrário (a externa descendente, a interna ascendente).

A teoria clássica do movimento em um hidrociclone é que as partículas no fluxo padrão estão sujeitas a duas forças opostas: uma força centrífuga e uma força de arraste para dentro (12).

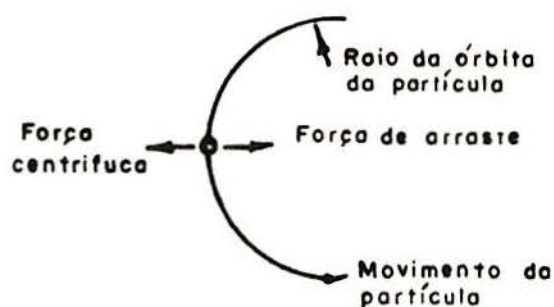


Figura 6 - Forças que agem sobre uma partícula (12)

A força centrífuga desenvolvida acelera a taxa de sedimentação das partículas (lei de Stokes). A separação das partículas, então, se dá de acordo com seu tamanho e peso específico. As partículas de sedimentação rápida se localizam na parede do ciclone, onde a velocidade é a mais lenta, e migram para a saída do "apex".

Devido à ação da força de arraste, as partículas de lenta sedimentação vão em direção à zona de baixa pressão ao longo do eixo e são carregadas para cima, saindo pelo "vortex finder".

2.2.2. Distribuição das Velocidades no Ciclone

As velocidades de fluxo em um ciclone (13) são discutidas dividindo-se o fluxo total em três componentes:

2.2.2.1. Velocidade Tangencial

A velocidade tangencial, V_t , aumenta conforme o fluido e as partículas minerais se movem desde a periferia do cone em direção a linha central do ciclone. A V_t aumenta até um valor máximo cujo lugar geométrico é uma envolvente cilíndrica vertical, centrada sobre o eixo do cone, estendendo-se desde a seção do "apex" até o "vortex finder".

Os contornos de outras velocidades tangenciais menores são envolventes cilíndricas, concêntricas da envolvente de velocidade máxima. Para qualquer ciclone esta envolvente cilíndrica terá um raio de aproximadamente $0,17R_c$, onde R_c é o raio da seção cilíndrica do ciclone. Desde a envolvente de máxima velocidade até a superfície do núcleo de ar, a velocidade tangencial decresce, desde um máximo, até zero na superfície do núcleo de ar.

2.2.2.2. Velocidade Vertical

O fato de que em um ciclone exista uma região de fluxo descendente em direção ao "apex" e de fluxo ascendente para o "vortex finder", é uma razão suficiente para inferir que em algum ponto do ciclone, deva existir uma interface entre os dois fluxos, na qual ocorra uma velocidade vertical zero. Esta interface, ou lugar geométrico de velocidade vertical equivalente a zero, foi medida e definida por Lilge (14): "No nível inferior do "vortex finder", nos pontos medidos entre a parede do núcleo de ar e a periferia do cone, a componente de velocidade vertical é zero. A envolvente total de velocidade vertical zero, se define como a superfície gerada por linhas que unem todos estes pontos médios aos pontos correspondentes localizados sobre a circunferência do núcleo de ar, no nível do orifício do "underflow". Em todos os pontos fora desta superfície cônica, a velocidade vertical é para baixo; em todos pontos internos a velocidade vertical é para cima."

2.2.2.3. Velocidade Radial

A velocidade radial em direção ao centro do cone se origina como resultado do deslocamento de massa do fluido pelas partículas ingressantes (o volume de fluido deslocado

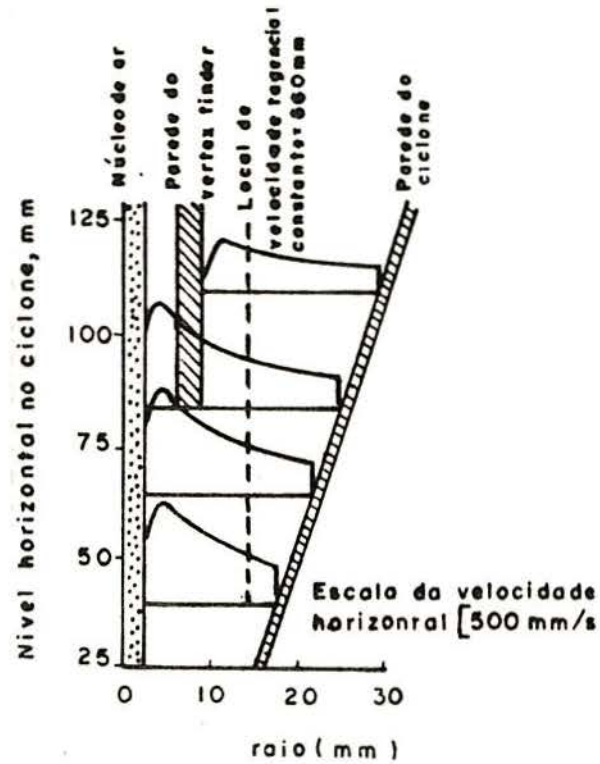


Figura 7 - Velocidade Tangencial (11)

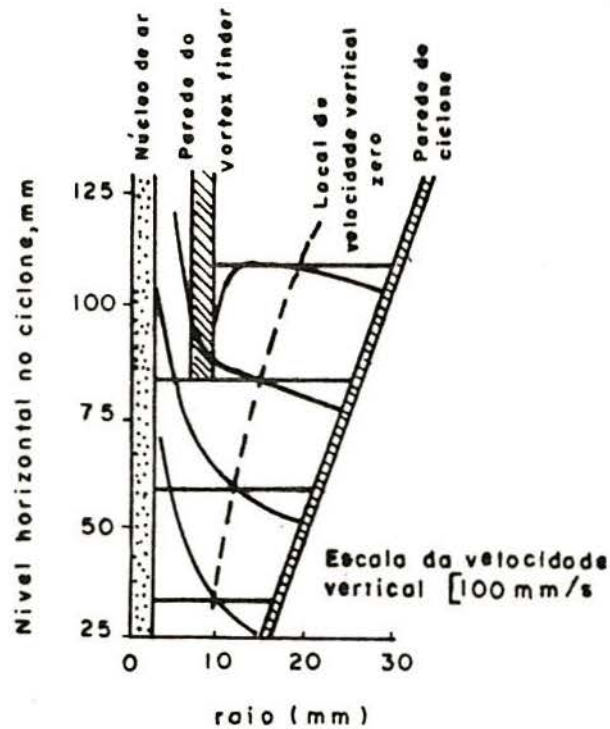


Figura 8 - Velocidade Vertical (11)

por uma partícula, que ao entrar tangencialmente tende a se instalar na parede do cone) (13).

Os trabalhos efetuados por Kelsall (15), Bradley (16), Lilge (14), mostraram que esta velocidade é máxima na parede do cone, decrescendo com a redução do raio, até chegar a zero na interface no núcleo de ar. Nas regiões superiores, nas vizinhanças do "vortex finder", há certa indicação que o fluxo radial é para fora devido a condição de redemoinho ("eddyflow") (11).

Ao nível do "vortex finder", de acordo com Lilge (14), a velocidade radial para o interior é zero no mesmo ponto onde se diz que a velocidade vertical também é zero.

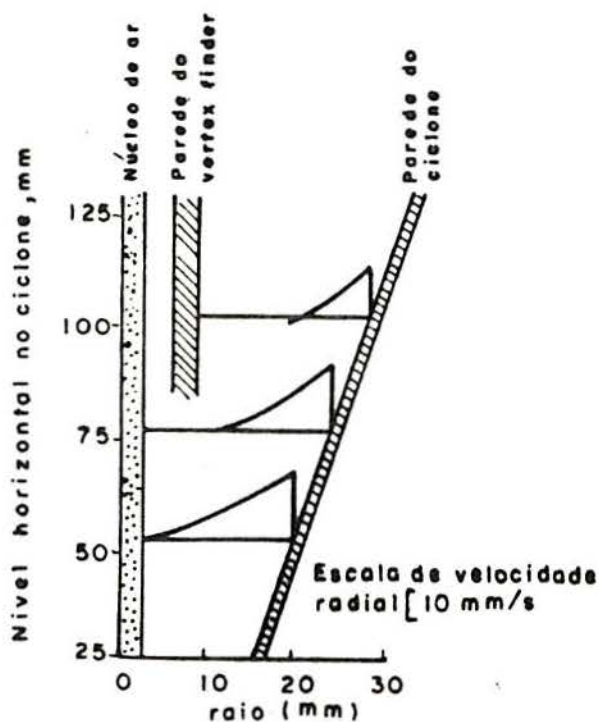


Figura 9 - Velocidade Radial (11)

2.2.3. Forças de Separação que Atuam:

Considerando-se uma partícula em um plano horizontal, desprezando-se as forças verticais, vemos que há três forças que atuam sobre ela (13):

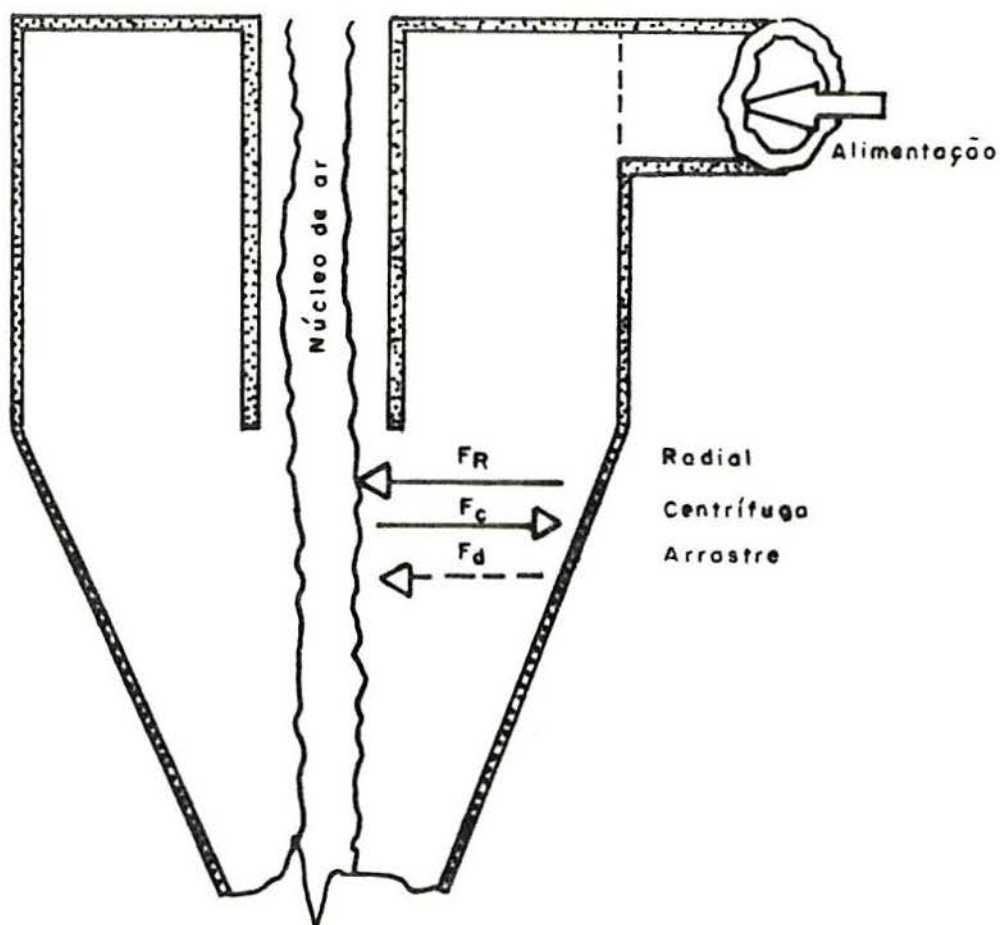


Figura 10 - Forças de separação no hidrociclone (13)

- As forças de arraste (F_d) e radial (F_r), para dentro, que resultam, respectivamente, da resistência do fluido devido à aceleração centrífuga e da velocidade radial sobre a partícula.

- A força centrífuga que resulta da aceleração causada pela velocidade tangencial.

$$F_c = \frac{f (V_t^2)}{r}$$

A força centrífuga em uma partícula a qualquer distância do centro do cone tem o mesmo valor em módulo, sem considerar-se a posição vertical da partícula. Esta força centrífuga é máxima quando uma partícula está posicionada na envolvente de máxima velocidade tangencial. Por outro lado, a força radial do fluido sobre a partícula, aumenta conforme a partícula se move para baixo do cone, entre a parede exterior e a envolvente de velocidade vertical zero.

A trajetória de uma partícula pode ser delineada localizando-se o ponto no qual a força radial do fluido e a força de arraste sejam iguais à força para o exterior. Nenhuma partícula pode ir para o "overflow", até que ela tenha alcançado um ponto na envolvente de máxima velocidade tangencial, onde o somatório da força radial do fluido e a força de arraste seja maior que a força centrífuga. Logo, uma vez na envolvente de velocidade vertical zero, uma partícula começa a mover-se para cima. Dado que a força do fluido decresce conforme a partícula se move para cima, e a

força centrífuga permanece constante, a partícula deve começar a mover-se para dentro.

Abaixo da intersecção das envolventes de velocidade vertical zero e velocidade tangencial máxima, as partículas vão para o "overflow" ou "underflow", dependendo se elas podem ou não cruzar a envoltória de velocidade vertical zero, antes que sejam levadas ao "underflow". É evidente que as partículas de vários tamanhos, diversas formas e massas específicas, que vão para o "overflow", cruzam tanto a linha de velocidade vertical zero, como a linha de velocidade tangencial máxima a alturas específicas.

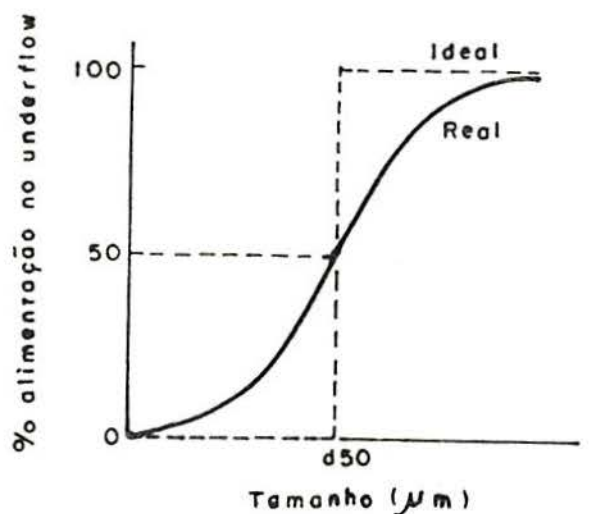
2.2.4. Eficiência dos Ciclones

Normalmente, a eficiência de ciclones é dada pela curva de Tromp (12) (figura 11), que é obtida plotando-se a porcentagem de cada fração granulométrica que vai para o "underflow" versus o tamanho de partícula. A granulometria de corte do ciclone é freqüentemente definida como o ponto na curva de Tromp no qual 50% das partículas são descarregadas pelo "underflow", isto é, partículas que têm chances iguais de ir para o "underflow" ou "overflow".

Este ponto é usualmente chamado de d₅₀. A exatidão no corte pode ser avaliada pela inclinação da seção central da curva de Tromp; quanto mais verticalizado mais alta é a eficiência. A inclinação da curva pode ser expressa tomando-se os pontos de 25% e 75% das partículas da alimentação que

vão para o "underflow". Estes são os d_{25} e d_{75} respectivamente. A eficiência de separação ou também chamada imperfeição é dada por:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \times d_{50}}$$



Curva de tromp para hidrociclones

Figura 11 - Curva de Tromp para hidrociclones (12)

São feitas a seguir algumas considerações (12) sobre o conceito de curto-circuito e a construção da curva de Tromp para ciclones.

Vários modelos matemáticos de hidrociclones incluem o termo $d_{50}(c)$ (corrigido) obtido da curva de classificação corrigida (figura 12). Assume-se que em todos os hidroclassificadores, sólidos de todos os tamanhos são introduzidos no produto grosseiro por curto-circuito, em proporção direta com a quantidade de água que vai para o "underflow".

Por exemplo, se a alimentação contém 16 TPH de material de uma certa granulometria, e 12 TPH vai para o "underflow", então a porcentagem desta granulometria que vai para o "underflow" é de 75% (plotado na curva de Tromp normal).

Porém, se 25% da água da alimentação vai para o "underflow", então 25% do material irá em curto-circuito com ela, conseqüentemente 4 TPH da fração granulométrica irá em curto-circuito para o "underflow", e somente 8 TPH vão para o "underflow" devido à classificação. A recuperação correta desta fração granulométrica é:

$$\frac{(12 - 4)}{(16 - 4)} * 100 = 67 \%$$

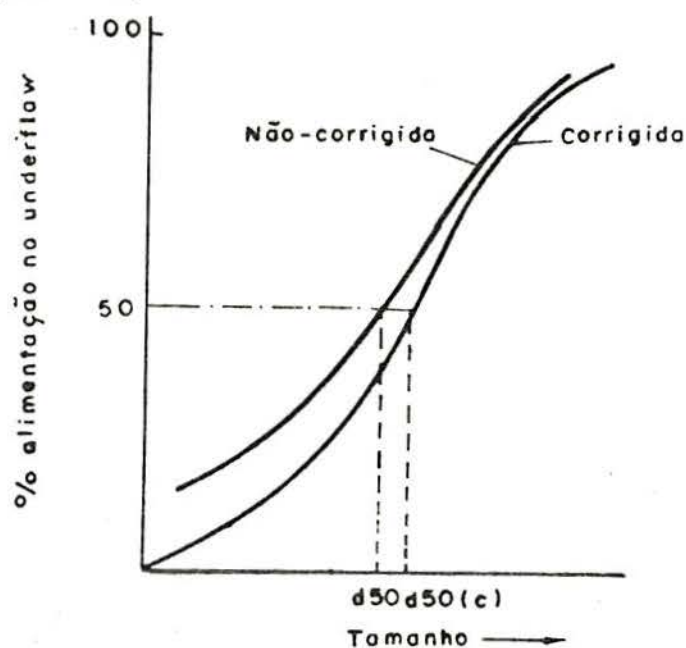


Figura 12 - Correção da curva de Tromp (12)

A curva de Tromp pode, entretanto, ser corrigida utilizando-se a equação:

$$Y' = \frac{(Y - R)}{(1 - R)}$$

onde:

Y' = fração de massa corrigida, de um determinado tamanho que vai para o "underflow".

Y = atual fração de massa não corrigida de um determinado tamanho que vai para o "underflow".

R = quantidade de líquido da alimentação que é recuperado no fluxo do produto grosseiro.

2.2.4.1. Curva de Eficiência Reduzida

A curva de partição reduzida pode ser obtida plotando-se o coeficiente de partição corrigido de uma determinada fração granulométrica versus média geométrica desta faixa granulométrica dividida pelo $d_{50}(c)$. Yoshioka e Hotta (17) foram os primeiros a notar a marcada similaridade na forma das curvas de partição reduzida para um determinado material tratado por ciclones com tamanhos e condições operacionais diferentes.

Lynch, Rao e Prisbrey (18) corroboram que para um minério classificado por hidrociclones, a curva de eficiência reduzida é mantida para todas as condições, incluindo mudança no diâmetro do ciclone, desde que se mantenha a proporção na geometria do mesmo.

Nesse trabalho foi concluído, entre outras coisas, que:

(1) A curva de eficiência reduzida para um mineral não depende do diâmetro do ciclone, dimensões das saídas ou condições operacionais;

(2) A curva de eficiência reduzida determinada para um mineral num hidrociclone pequeno, pode ser usada para um trabalho em "scale-up".

2.2.5. Fatores que Afetam a Performance de um Ciclone

Os efeitos das mudanças nas variáveis de operação e geometria dos ciclones são muito complexos, pois todos se interrelacionam. É quase impossível selecionar-se um ciclone sem que seja necessário fazer-se ajustes na entrada de alimentação, no "vortex finder", no "apex", na pressão do "inlet" ou na diluição.

Na página a seguir, é mostrado um desenho esquemático do ciclone.

Para efeito de manutenção das bitolas selecionadas dentro de valores razoáveis, é interessante observar-se a tabela abaixo (19), pois esta relaciona as aberturas com o diâmetro do ciclone.

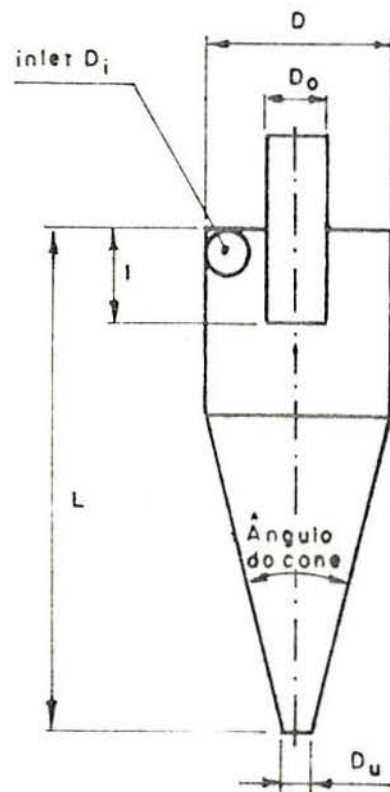


Figura 13 - Desenho esquemático do ciclone
(19)

Tabela 2

	Di/D	Do/D	I/D	L/D	Angulo Cone
Rietema(20)	0,280	0,34	0,40	5,00	20°
Bradley(16)	0,133	0,20	0,33	6,85	9°

Existe um bom número de relações empíricas, as quais são usadas por projetistas para prever performances e desenhar ciclones. Bradley (16) lista 8 fórmulas para calcular o d₅₀. Uma das mais antigas é esta de Dalhstrom (21):

$$d_{50} = \frac{13,7 (D_o \times D_i)^{0,88}}{Q^{0,53} (s - 1)^{0,5}}$$

Certas equações não são, porém, diretamente aplicáveis em escala industrial, tanto que a maioria foi desenvolvida em lamas diluídas, usando-se ciclones de pequeno diâmetro.

Plitt (22) desenvolveu um modelo matemático que proporcionou razoáveis previsões de performance com ciclones de grande diâmetro operando com uma grande quantidade de sólidos, numa larga variação de condições de operação. O modelo foi usado com sucesso no desenvolvimento de sistemas de controle automático em circuitos de moagem em várias minas australianas.

Quatro parâmetros fundamentais foram determinados em termos de operação e variáveis de projeto (geometria), quais sejam:

- o tamanho de corte;
- a divisão de fluxo entre "under" e "over";
- a exatidão de separação;
- queda de pressão através de um ciclone.

O modelo formulado capacita calcular a performance de um ciclone com capacidade completa com razoável precisão sem requerer resultados (dados) experimentais.

A equação para o tamanho de corte é:

$$d_{50}(c) = \frac{50,5 D_c^{0,46} D_1^{0,8} D_o^{1,21} \text{EXP}(0,063V)}{D_u^{0,71} H^{0,38} Q^{0,45} (S-L)^{0,5}}$$

onde:

$d_{50}(c)$ é o d_{50} corrigido;

D_c , $D_1(*)$, D_o , D_u são os diâmetros internos do hidrociclone (cm).

(*) Para um "inlet" não circular: $D_1 = (4.A / \text{PI})^{0,5}$
onde A (cm²) é a área do "inlet";

V é a percentagem em volume dos sólidos na alimentação;

H é a distância da parte inferior do "vortex finder" ao topo do orifício do "under";

Q é a vazão (l.h⁻¹) de polpa na alimentação;

S e L são densidades de sólido e líquido, respectivamente (g/cm^3).

Mular e Jull (23) desenvolveram expressões a partir de resultados obtidos em ciclones Krebs, relacionando o d_{50} com as variáveis de operação de ciclones típicos de vários diâmetros internos. Um ciclone típico tem uma área de entrada de aproximadamente 7% da área transversal da câmara de alimentação, um "vortex finder" de 35 a 40% do diâmetro do ciclone e um diâmetro de "apex" normalmente não menor que 25% do diâmetro do "vortex finder".

A equação do diâmetro de corte é:

$$d_{50}(c) = \frac{0,77 D_c^{1,075} \text{EXP}(-0,301 + 0,0945 V - 0,00356 V^2 + 6,84 \times 10^{-5} V^3)}{Q^{0,6} (S-1)^{0,3}}$$

O valor máximo que o ciclone pode trabalhar é dado por:

$$Q = 9,4 \times 10^{-3} P^{1/2} D_c$$

onde:

Q é expressa em m^3/h

P é a queda de pressão na passagem pelo ciclone, em kPa.

As equações são proveitosas na seleção de ciclones para objetivos particulares. O controle final de diâmetro de corte e a capacidade do ciclone selecionado podem ser feitos ajustando-se o tamanho (bitola) de entrada do "vortex finder" e "apex".

Já que as variáveis operacionais têm um efeito importante na performance de um ciclone, é necessário evitar-se variações na alimentação, durante a operação. Variações no bombeamento podem ser eliminadas tanto por controle automático do nível da caixa de descarga, como por uma descarga auto-regulada.

O valor da queda de pressão é necessário para permitir um projeto de um sistema de bombeamento para uma dada capacidade ou para determinar a capacidade de uma dada instalação. Usualmente a queda de pressão é determinada por um medidor de pressão da alimentação, localizada na linha de entrada, pouco antes do ciclone. Dentro de certos limites, um incremento na alimentação poderá melhorar a eficiência por incremento da força centrífuga sobre as partículas, com todas as outras variáveis se mantendo constantes. Isto somente pode ser conseguido por um incremento na pressão e um correspondente aumento na capacidade, já que isto é diretamente relacionado com o produto da queda de pressão e capacidade.

Já que um incremento na taxa de alimentação, ou queda de pressão, incrementa o efeito da força centrífuga,

partículas finas são arrastadas para o "underflow" e o d50 é diminuído.

A figura 14 mostra o efeito da pressão na capacidade e no tamanho de corte dos ciclones.

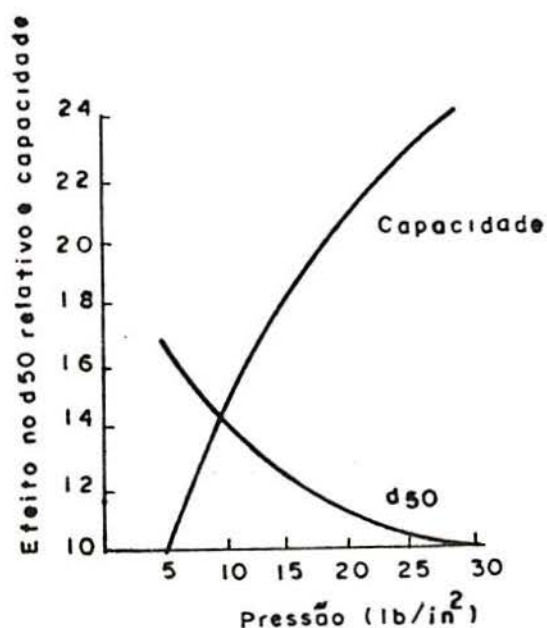


Figura 14 - Influência da pressão no d50 e na capacidade de um ciclone (12)

O efeito do incremento na densidade da polpa da alimentação é complexo, igualmente a viscosidade efetiva da polpa e o grau de sedimentação impedida. A exatidão da separação decresce com o aumento da densidade de polpa e o d50 aumenta devido a maior resistência para que haja o movimento rotacional dentro do ciclone, o qual reduz a queda de pressão efetiva. Separações de material de granulometria reduzida podem ser conseguidos com alimentações de baixa concentração de sólidos e alta queda de pressão. Normalmente

a concentração não é maior que 30% de sólidos em peso, mas para circuitos fechados de moagem, onde separações relativamente grosseiras são freqüentemente requeridas, concentrações de mais de 60% de sólidos em peso são freqüentemente usadas, combinadas com baixa queda de pressão, freqüentemente menor que 10 psi (68,9 kPa). A figura 15 mostra a influência da percentagem de sólidos no tamanho de corte.

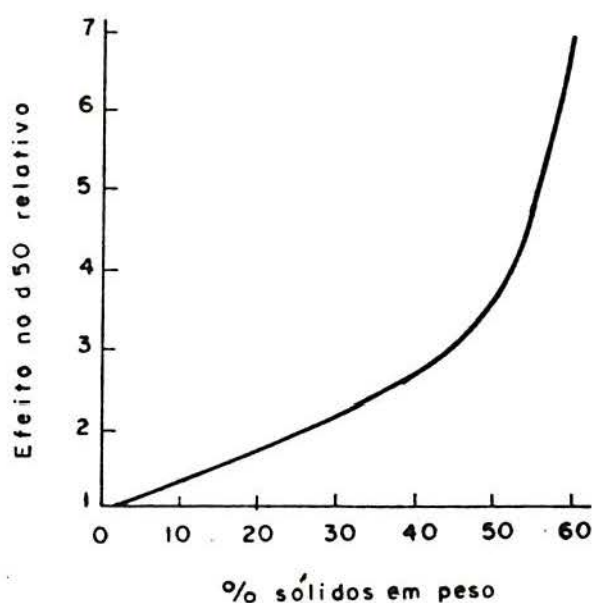


Figura 15 - Influência da percentagem de sólidos no tamanho de corte (12)

A forma das partículas alimentadas são também um importante fator na separação; partículas muito planas como a mica, freqüentemente são descarregadas pelo "overflow", mesmo quando apresentam granulometrias grosseiras.

Na prática, o "cut-point" é definido, principalmente, pela geometria do hidrociclone, ou seja, a entrada, o "vortex finder", a abertura do "apex". A maioria

dos ciclones são projetados de modo que estas partes possam ser facilmente alteradas.

A área da entrada determina a velocidade de entrada, e um aumento na área aumenta a vazão. Também é importante a geometria da entrada de alimentação. Na maioria dos ciclones, a forma de entrada é desenvolvida de uma seção circular para uma seção retangular até chegar a uma seção cilíndrica na entrada do ciclone. Isto ajuda a espalhar o fluxo ao longo das paredes da câmara. A entrada é normalmente tangencial, mas a alimentação em voluta é também comum. Alimentações em voluta são usadas para minimizar a turbulência e redução do desgaste.

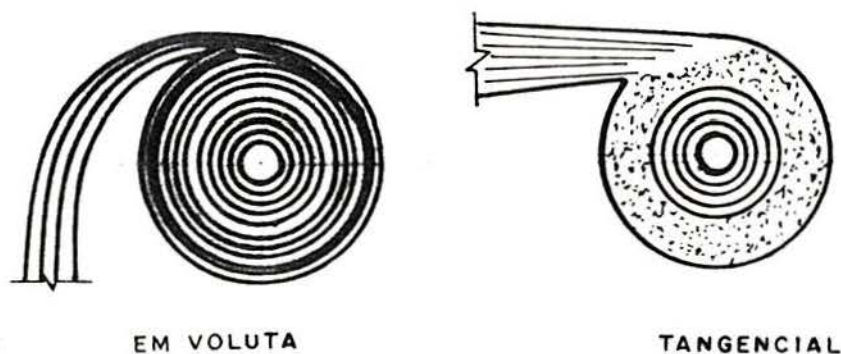


Figura 16 - Tipos de entrada (12)

O diâmetro do "vortex finder" é uma variável muito importante. Para uma dada queda de pressão através do ciclone, um incremento no diâmetro do "vortex finder" resultará num tamanho de corte mais grosseiro e um aumento na capacidade.

O tamanho do "apex" determina a densidade do "underflow", e deve ser o maior possível para descarregar os sólidos grosseiros que estão sendo separados no ciclone. O orifício deve, também, permitir a entrada de ar ao longo do eixo do ciclone, de forma a estabelecer o "air vortex" ("air core"). Os ciclones devem ser operados na mais alta densidade possível do "underflow", já que o material não classificado deixa o "underflow". Sob condições corretas de operação, a descarga deve formar um "spray" cônico vazio internamente de 20 a 30 graus. O ar pode então entrar no ciclone e as partículas grosseiras serão descarregadas livremente, com isto concentrações de sólidos maiores que 50% em peso podem ser conseguidas. Com aberturas muito pequenas pode-se atingir a uma condição conhecida como "roping", onde uma corrente de polpa extremamente espessa, de diâmetro igual ao "apex", é formada e o "air core" pode ser perdido. A eficiência de separação diminuirá com um material de granulometria acima do tolerável sendo descarregado pelo "vortex finder". Um "apex" com orifício grande resulta num cone vazio amplo. O "underflow" será excessivamente diluído e a água adicional arrastará sólidos finos não classificados que deveriam diferentemente ir para o "overflow".

Vários pesquisadores concluíram que o diâmetro do ciclone não tem efeito no d₅₀ e que, para ciclones geometricamente similares, a curva de eficiência é uma função somente das características do material da

alimentação; os diâmetros de entrada e saída é que são as variáveis críticas de projeto. O diâmetro do ciclone é simplesmente o local usado para acomodar estas aberturas. Entretanto, a partir de considerações teóricas, é o diâmetro do ciclone quem controla o raio de órbita, e conseqüentemente a força centrífuga que age sobre as partículas. Isto significa que há uma forte interdependência entre os tamanhos de aberturas e o diâmetro do ciclone, sendo que Plitt (22) concluiu que o diâmetro do ciclone tem um efeito independente no tamanho de separação.

Para ciclones de geometria similar à taxa de fluxo constante, o dso é proporcional ao diâmetro^x, sendo que este valor de x é controvertido. Para Mular e Jull (23) ele vale 1,875, para Plitt (22) 1,18 e para Bradley (16) x varia de 1,36 a 1,52.

Na prática, o "cut-point" é determinado pelo tamanho do ciclone. O tamanho requerido para aplicações particulares pode ser de modelos empíricos desenvolvidos, mas estes tendem a ficar extremamente irrealis para ciclones extremamente grandes devido ao incremento de turbulência dentro do ciclone. Por esta razão, o mais comum é escolher-se o modelo pelas tabelas dos fabricantes, as quais mostram a capacidade e nível de separação de tamanho em função do tamanho do ciclone.

Já que separações finas requerem ciclones pequenos, os quais têm uma capacidade pequena, vários deles devem ser ligados em paralelo, se grandes capacidades são necessárias.

Desde que uma separação para grandes granulometrias requereria grandes ciclones com conseqüentes altas capacidades, em muitos casos onde separações grosseiras são requeridas, ciclones não podem ser utilizados quando as "vazões" na planta não são suficientemente grandes. Isto é um problema freqüente em planta piloto onde a simulação de uma planta 1:1 não pode ser obtida; numa escala reduzida um tamanho de ciclone concebido para capacidades menores reduz também o "cut-point" (tamanho de corte, d_{50}) produzido.

2.2.6. Aplicações dos Hidrociclones

Existem 10 aplicações principais para os hidrociclones (28):

1. Espessamento, que elimina a maior parte da água de uma suspensão (para obter-se sólidos sem água). O espessamento verdadeiro tem como objetivo a recuperação de todos os sólidos, com uma conseqüente clarificação dos líquidos. Porém, não é possível o uso de agentes de floculação nos hidrociclones para favorecer a sedimentação e, na prática, a recuperação de massa é limitada, resultando um "overflow" turvo, isto é, no ciclone ocorre alguma deslamagem. A construção de barragens de decantação é uma das aplicações do fenômeno de espessamento.

2. Deslamagem, que tem a finalidade de eliminar as partículas mais finas. Isto é freqüentemente necessário para melhorar o produto em vista de tratamentos sucessivos como flotação, separação magnética úmida, filtração, etc. Na indústria química os ciclones de deslamagem são empregados freqüentemente para eliminação de água depois de um processo de cristalização. Os cristais finos descarregados com o "overflow" são reciclados aos cristalizadores onde atuam como núcleos de cristalização.

3. No descarte de grosseiros. O "overflow", é o produto, e pequenas quantidades de partículas grosseiras são descarregadas pelo "overflow".

4. Processos de moagem em circuito fechado, que, freqüentemente, usam ciclones para "degriting" e deslamagem. A seguir são mostrados vários exemplos de circuitos:

Caso 4a) O ciclone é instalado antes do moinho para deslamar a suspensão de alimentação. A fração fina descarregada no "overflow" é misturada com o produto fino do moinho. O "underflow", com granulometria maior, é cominuído no moinho e a descarga deste é o componente principal do produto misturado. Esse circuito é definido como aberto.

Caso 4b) A suspensão de alimentação vai diretamente ao moinho, cuja descarga alimenta um ciclone para o "degriting". O "overflow" do ciclone é o produto, enquanto o "underflow" volta ao moinho para nova moagem junto com a nova suspensão. Este processo se define como moagem em circuito fechado.

Caso 4c) Aqui, os casos a e b são combinados no sentido de que a alimentação do circuito e a descarga do moinho sejam misturados e classificados junto no mesmo ciclone. O ciclone deslama a alimentação e separa as partículas maiores do produto da moagem. O "overflow" do

ciclone é o produto e o "underflow" volta ao moinho. Dada a dupla função do ciclone, tais circuitos são chamados de circuitos duplos.

Caso 4d) Para otimizar a operação do ciclone, a deslamagem e o "degriting" deveriam ser feitos independentemente em ciclones separados de diâmetros diferentes. Neste caso, ambos "overflows" são produtos e ambos "underflows" alimentarão os moinhos. Esta é a combinação mais lógica dos casos a e b, e é chamada circuito melhorado.

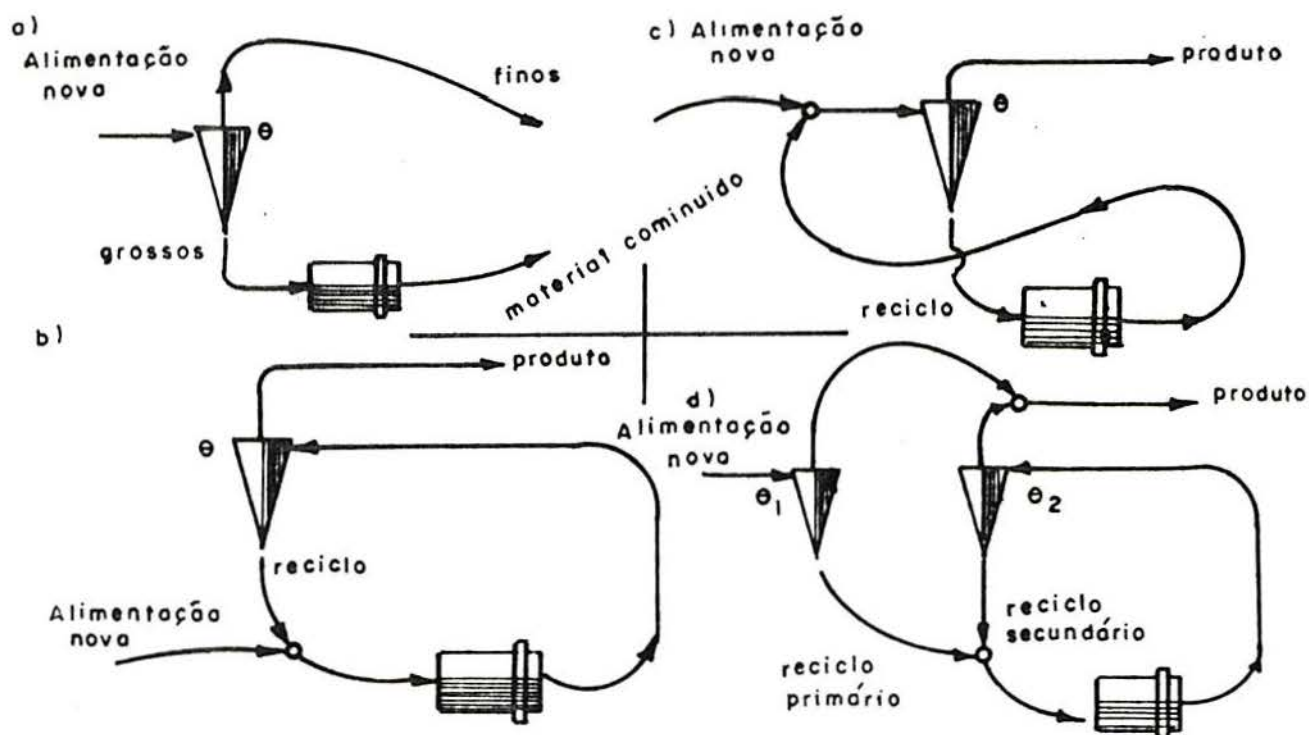


Figura 17 - "Lay-outs" de circuitos de moagem com o uso de hidrociclones (28)

Caso 4e) Para reduzir a carga do moinho, o circuito fechado do caso b pode ser modificado empregando "degriting" em duas etapas. A alimentação primária é destinada ao segundo ciclone e o produto intermediário é misturado com esta alimentação primária. Sem reduzir a granulometria do produto final, o reciclo ao moinho contém menos finos.

Caso 4f) Se o "overflow" primário contém, ainda, partículas mais grossas, pode ser limpo em um segundo ciclone. Como o "underflow" do ciclone secundário conterà muitos finos, ele é reciclado na alimentação primária para uma deslamagem posterior.

Caso 4g) Se o "overflow" do ciclone primário não apresenta a qualidade requerida pode-se utilizar uma modificação do circuito d. Neste caso, o "overflow" primário é misturado com a alimentação secundária para um segundo estágio de "degriting". O fator carga em circulação compara a tonelagem de alimentação do moinho com a alimentação total do circuito, requerida para produzir a tonelagem final do produto. Pode-se calcular usando as fórmulas dadas quando se conhecem os valores da recuperação de massa para os ciclones.

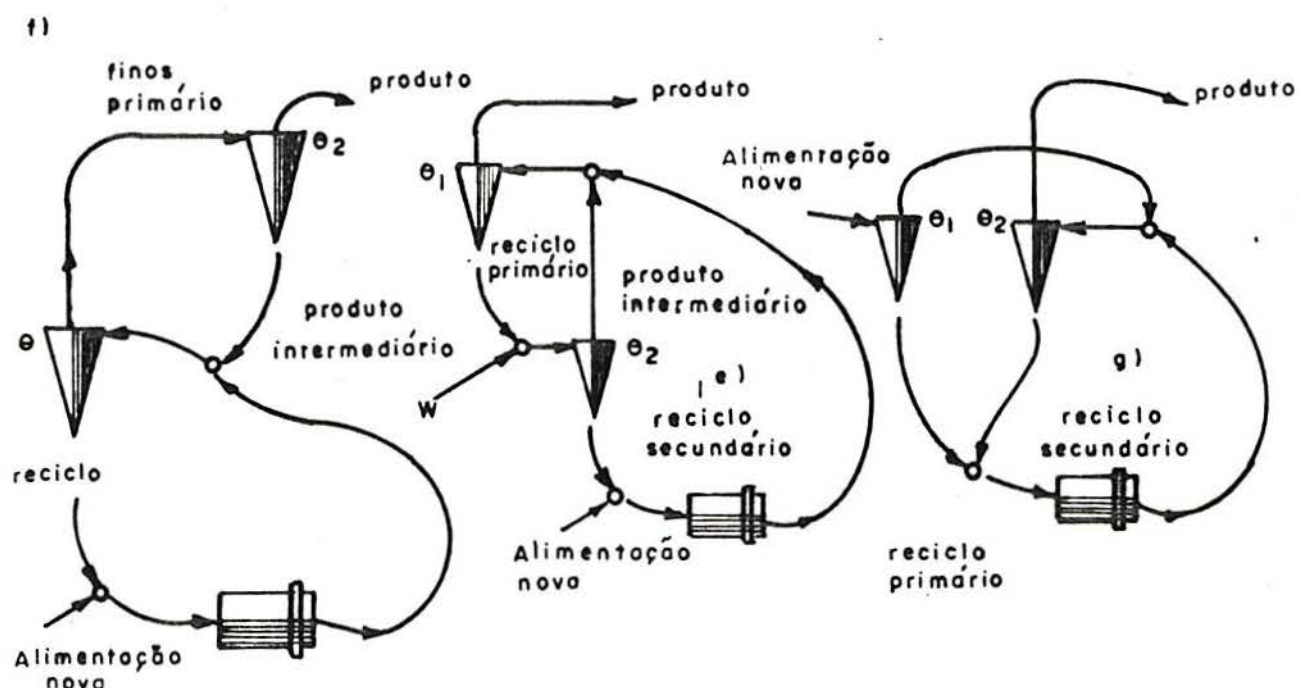


Figura 18 - "Lay-outs" de circuitos de moagem com o uso de hidrociclones (28)

5. Classificação seletiva: A separação de uma alimentação não homogênea nos seus componentes minerais pode se basear sobre diferenças em peso específico, forma das partículas, tensão superficial, propriedades elétricas e magnéticas, solubilidade, etc. Em alguns casos, a mesma diferença de tamanho de partícula permite uma separação puramente mecânica. O caulim é beneficiado deste modo; o produto mais fino é o caulim e o mais grosseiro é o rejeito silicoso. O corte no tamanho de partícula produz um enriquecimento do caulim fino no "overflow" e do rejeito mais grosso no "underflow".

6. Recuperação dos sólidos de efluentes turvos ("overflows" ou filtrados) em equipamentos de lavagem e espessamento (secagem) pode prevenir a perda de uma parte da fração fina do produto. A recuperação destas frações finas em espirais, "logwashers", peneiras vibratórias e centrífugas de desaguado (por exemplo: "scroll discharge screen", "vibro screen", "pusher type") é uma aplicação interessante dos hidrociclones.

7. Fracionamento: A separação em duas frações para um tratamento ulterior é uma outra aplicação interessante dos hidrociclones a diferentes processos. Um exemplo típico é o fracionamento de um concentrado de minério de ferro em alimentação para a sinterização (partículas grossas), e alimentação para a pelotização (partículas finas).

8. Pré-concentração: Se existe grande diferença de peso específico entre os componentes minerais, estes, uma vez moídos, podem ser enriquecidos usando-se hidrociclones. Este é um processo de concentração por gravidade, ou, corretamente, um processo de concentração centrífuga. Nestes ciclones não se usa nenhum líquido denso. Exemplos típicos é a separação da ganga de componentes pesados como sulfetos de metais (pirita, blenda), óxidos de metais e metais preciosos (ouro, prata, platina). Os ciclones, para tais aplicações, tem um aspecto diferente do tipo "standart". Os seus

cilindros mais compridos e os ângulos do "apex" mais obtusos têm demonstrado um aumento de eficiência.

9. Recuperação de líquidos: Se, no caso do reciclo da água de processos ou águas-mães, os hidrociclones podem fornecer uma clarificação satisfatória. Este é um dos maiores problemas na lavagem do carvão mineral, especialmente quando os espessadores existentes estão sobrecarregados. Frequentemente instalam-se os hidrociclones em paralelo para manter em limites aceitáveis o teor de sólidos da água reciclada.

10. Lavagem em contra-corrente: A eliminação de ácidos aderentes de lixívia ou de partículas finas se consegue mediante diluição e espessamento alternados em estágios múltiplos de ciclones.

2.3. Hidrociclone de Fundo Plano

"Circulating Bed Concentrator-CBC"

2.3.1. Princípio de Funcionamento

Como num hidrociclone convencional, a alimentação é feita tangencialmente sob pressão, girando num movimento espiralado ao longo das paredes do corpo do equipamento em direção ao "apex". É válido salientar que esta é uma visão compartimentada do processo, pois desde o momento da entrada da polpa no ciclone, as partículas podem sair pelo "overflow" sem terem percorrido o caminho didático, do qual se está fazendo uso para um melhor entendimento do funcionamento. No hidrociclone convencional, a lama que se forma junto à parede escoava até o "apex", onde ela é forçada a inverter-se, formando assim a espiral secundária que levará as partículas de massa aparente menor rumo ao "overflow". Fica claro que o estrangulamento gradativo da seção do equipamento é o responsável pela reversão do fluxo. Neste ponto reside a diferença principal de um hidrociclone convencional em relação ao hidrociclone de fundo plano.

No hidrociclone de fundo plano, segundo publicação de Trawinski & Eisenlohr (2), a reversão de fluxo se dá contra um leito que se forma na parte inferior do hidrociclone. A maioria do fluxo do volume é forçado a inverter-se para cima da superfície do leito represado.

Responsável pelo tamanho do corte é a turbulência secundária ao redor do núcleo central, onde as forças de arraste do componente de fluxo são dirigidas radialmente para dentro, e as forças centrífugas dirigidas radialmente para fora, equilibrando as partículas no tamanho limite. Para as partículas mais finas do que o tamanho limite, as forças de arraste prevalecem e elas são levadas para o "overflow" junto com a maior parte do líquido. Para a fração mais grossa o efeito da força centrífuga prevalece e ela é levada para o "underflow".

A circunferência do manto de equilíbrio se calcula aproximadamente com o diâmetro do "vortex finder" d_0 que é $(d_0 \times \pi)$. Seu comprimento correspondente ao do núcleo da turbulência, i.e., ela alcança da borda inferior do "vortex finder" até o ponto onde este manto imaginário do diâmetro d_0 se encontra com a parede do cone, ou, no caso do hidrociclone cilíndrico, até o fundo plano, ou ainda, no caso que tenha formado um leito estacionário, até à borda superior dele. A figura 19 ilustra esta distância livre entre o "vortex finder" e a superfície do leito, no exemplo de um hidrociclone cilíndrico: quatro níveis de enchimento do leito H_1 até H_4 correspondem a quatro distâncias diferentes do bocal do "vortex finder" L_1 até L_4 , assim a quatro tamanhos de corte.

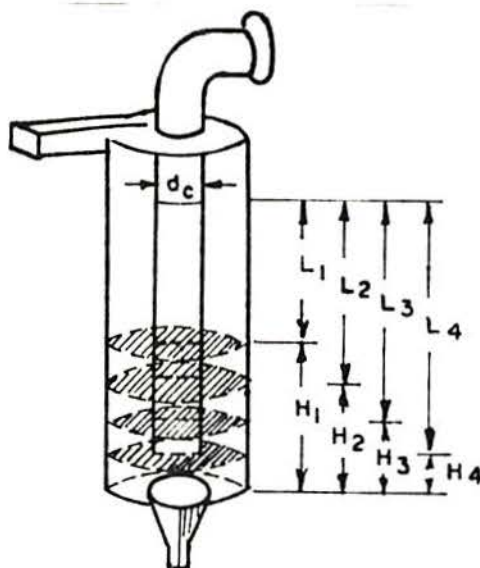


Figura 19 - Altura do leito no ciclone de fundo plano (2)

A fórmula derivada através da condição de equilíbrio da lei de Stokes para a definição do tamanho do corte (d_{50}) é:

$$d_{50} = \frac{(18 \cdot \mu)^{0,5} (d_e - d_o)^{0,5} (D)^{0,5}}{(g(\rho_p - \rho_f))^{0,5} (D \cdot L)^{0,5} (p/\rho_t)^{0,25}}$$

Onde:

- D = diâmetro do cilindro do ciclone
- L = "vortex finder clearance length"
- d_e = diâmetro equivalente do bocal de entrada
- d_o = diâmetro equivalente do "vortex finder"
- ρ_t = densidade da polpa na entrada
- ρ_p = densidade do sólido
- ρ_f = densidade do líquido
- μ = constante de viscosidade
- g = aceleração da gravidade

p = pressão

O quociente no meio da fórmula é um valor básico para apreciação de um hidrociclone quanto à sua característica separadora. Ela mostra claramente que, com tamanho do corte permanecendo constante, os outros valores devem ser inversamente proporcional à distância livre do "vortex finder clearance length".

Analisando-se mais detalhadamente o comportamento da parte inferior do CBC, esta consiste de um leito estacionário com alta concentração de sólidos, no qual se formam correntes de convergência verticais (figura 20).

Este leito cria um verdadeiro efeito de lavagem pelas correntes de convergência de forma que as partículas grossas ou pesadas se deslocam com preferência para a parede. Elas são levadas pela corrente radial e chegam automaticamente ao fundo plano, onde são descarregadas. As partículas finas que se concentram normalmente no interior do leito, são transportadas de preferência para cima e capturadas, finalmente, pela turbulência secundária, onde são levadas até a descarga do "overflow". Deste modo o princípio CBC atinge cortes de separação bem mais grosseiros do que os hidrociclones cônicos convencionais. Adicionalmente, aumenta também a nitidez do corte.

Voltando-se ao funcionamento do leito, ele é baseado em correntes de convergência no sentido vertical na seção reta.

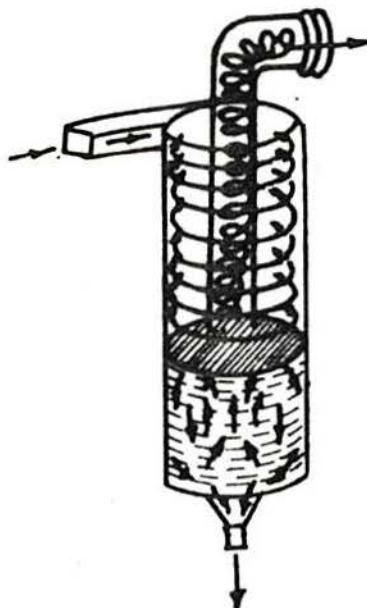


Figura 20 - Funcionamento do leito represado (2)

Estas correntes são provocadas pela energia que a força da injeção transfere para a superfície do leito estacionário causando a rotação do mesmo. Esta torção se reduz com a profundidade do leito em consequência do aumento da fricção com o fundo plano. Forças centrífugas elevadas na parte superior e forças reduzidas na parte inferior do leito provocam correntes verticais com sentido para baixo na zona periférica e correntes de convergência ascendentes na parte central.

A corrente dirigida radialmente para o centro do fundo plano possibilita a descarga pelo "apex", e a corrente ascendente na parte central diminui o perigo de entupimento.

2.3.2. Aplicações

Exemplo típico de aplicação é a concentração de minerais, principalmente metálicos, no "underflow", controlada pelo estrangulamento do "apex". O CBC pode trabalhar, também, como deslamador para separar os finos a partir de 40 micra, finos estes que atrapalham nos processos de flotação, de separação magnética, de concentração por mesas, espirais, etc. A vantagem é que a maioria das espécies úteis de baixa granulometria, ficam represadas na fração grosseira, de forma que não ocorre uma concentração da fração fina descartada.

Quanto à classificação em função do tamanho, podem ser atingidos tamanhos de separação bem mais grosseiros do que com hidrociclones cônicos. Por exemplo, com hidrociclone comum de 8" de diâmetro conseguem-se tamanhos de separação entre 20 e 50 micra (areia em água). Com o CBC o tamanho de separação pode ser aumentado até 300 micra.

3. EXPERIMENTAL

3.1. Material e Reagentes

3.1.1. Carvão

Carvão de Candiota da camada inferior, cominuído na própria instalação de britagem da mina da CRM a -30 mm e peneirado em laboratório (Laboratório de Beneficiamento Gravimétrico da UFRGS) a -2 mm.

Distribuição granulométrica (peneiramento via úmida) e respectivos teores de cinza por faixa dos carvões utilizados nos testes de ciclonagem:

Tabela 3.

FAIXAS (mm)	CIRCUITO FECHADO				CIRCUITO ABERTO	
	ALIMENTAÇÃO DO CICLONE CONVENCIONAL		ALIMENTAÇÃO DO CICLONE FUNDO PLANO		ALIMENTAÇÃO DO CICLONE FUNDO PLANO	
	RETIDO %	CINZAS %	RETIDO %	CINZAS %	RETIDO %	CINZAS %
-2+1,19	7,57	36,60	21,00	49,36	19,25	47,92
-1,19+0,59	13,03	40,39	18,90	46,93	18,90	46,37
-0,59+0,25	20,46	42,43	15,60	45,30	16,05	43,84
-0,25+0,149	11,63	47,86	10,20	45,75	6,97	42,06
-0,149+0,074	12,27	52,11	5,00	46,35	7,43	44,00
-0,074	35,03	65,12	29,30	63,48	31,40	64,55
TOTAL	100,00	51,49	100,00	51,89	100,00	51,50

3.1.2. Reagentes

Os ensaios de afunda-flutua foram realizados utilizando-se, como meios densos, misturas de bromofórmio, percloroetileno e xilol.

3.2. Equipamentos

Os testes de análise granulométrica foram feitos em:

- agitador de peneiras, marca MERCU (obtenção da fração -2 mm).

- agitador de peneiras, marca BERTEL (adaptado para trabalhar a úmido).

- jogo de peneiras escala Tyler.

Os ensaios de afunda-flutua foram realizados com o filtro separador.

Os testes de ciclonação, tanto em circuito fechado (figura 21, em anexo) como aberto (figura 22, em anexo), foram feitos em uma unidade de testes Laborant, instalada no campus de Cachoeirinha da CIENTEC. Esta unidade (montada pela AKW) é composta de: tanque de recepção (350 l), tanques de amostragem ("under" e "over") com válvulas que permitem o "by-pass" ou circuito aberto, motor de 5,5 CV, variador de rotação, bomba helicoidal Nemo, sistema de válvulas e tubulações para a instalação de 3 ciclones simultaneamente, com controle de pressão por manômetro de 0 a 4 kgf/cm².

Quanto aos ciclones, teve-se a disposição 3 diâmetros diferentes (40, 50 e 75 mm), marca AKW, com possibilidade de variação na geometria (entradas e saídas intercambiáveis, em poliuretano).

Os ciclones utilizados foram:

Circuito Fechado

KRS 98 (cônico) - 45 mm de diâmetro, entrada equivalente de 18,2 mm, "apex" de 14 mm, "vortex finder" de 22 mm, pressão de alimentação de 1,4 kgf/cm².

RWB 1511 (fundo plano) - 75 mm de diâmetro, entrada equivalente de 21,4 mm, "apex" de 14mm, "vortex finder" de 30 mm com pressão de alimentação de 1,3 kgf/cm².

Circuito Aberto

RWB 1511 (fundo plano) - o mesmo que foi utilizado no circuito fechado.

Realizaram-se os estudos petrográficos em luz refletida, com imersão em óleo, em microscópio ORTHOPLAN-POL-LEITZ com aumento de 500 x (objetiva 50 x, ocular 10 x) e lâmpadas de halogênio.

Os corpos de prova foram preparados com adesivo tipo epoxi CY 248 e endurecedor HY 951 a 10% em peso.

4. METODOLOGIA

4.1. Preparação do Material

Os carvões utilizados nos testes em circuito fechado e em circuito aberto, passaram pelo mesmo procedimento quanto à preparação das amostras. O carvão, britado na mina a -30 mm, foi peneirado a -2 mm em laboratório, quarteado para obtenção de aliquotas (segundo NBR 8292) para análise

granulométrica (segundo NBR 8629), teor de cinzas (segundo NBR 8289) e umidade (segundo NBR 8293).

4.2. Testes de Ciclonagem

4.2.1. Circuito Fechado

Nos testes em circuito fechado, preparou-se uma polpa com 8% de sólidos em peso com agitação manual contínua (para evitar-se qualquer tipo de trabalho mecânico sobre as partículas que não fosse oriundo do conjunto bomba-hidrociclone).

Foram coletadas amostras do "underflow" e "overflow" diretamente após o início do experimento e após 5, 10 e 15 minutos.

4.2.2. Circuito Aberto

Nos testes em circuito aberto o carvão foi colocado em um silo com vazão de alimentação regulável, suspenso sobre o tanque da polpa. O nível do tanque foi mantido estável por uma bomba suplementar ligada a um reservatório d'água. Operou-se com uma percentagem de sólidos de 15% em peso com uma vazão de 7,8 m³/h de polpa.

Com o material sendo descartado após passar no ciclone, tomou-se o cuidado de fazer a amostragem diretamente nas saídas do "underflow" e "overflow", para evitar-se qualquer variação devido à sedimentação nos tanques de amostragem.

As amostras coletadas em todos os experimentos foram submetidas a análises granulométricas, petrográficas, cinzas e umidade.

4.3. Petrografia

O estudo petrográfico (segundo as normas NBR 8292, NBR 7390 e NBR 7389) incidiu sobre o "underflow" dos testes em circuito fechado e para os três componentes (alimentação, "underflow" e "overflow") do teste em circuito aberto, consistindo da contagem de pontos dos diferentes grupos macerálicos e matéria mineral.

Para o "underflow" dos testes em circuito fechado foram selecionadas as amostras correspondentes aos tempos imediato, 5, 10 e 15 minutos de ciclonação. No caso dos testes em circuito aberto foram coletadas as amostras referentes à alimentação, "underflow" e "overflow". Em ambos os testes as faixas granulométricas analisadas foram as seguintes: -2 +1,19 mm, -1,19 +0,59 mm, -0,59 +0,074 mm e -0,074 mm.

4.4. Ensaio Afunda-Flutua

Os testes de densimetria (segundo a norma NF 03-016) foram realizados com amostras colhidas da alimentação e "underflow" do teste em circuito aberto. Fez-se um corte a 1,5 g/cm³. O afundado nesta densidade foi cortado a 1,8 g/cm³. As frações escolhidas foram as mesmas da

petrografia, excetuando-se a fração -0,074 mm que apresentou problemas de estabilidade durante o teste.

5. RESULTADOS E DISCUSSOES

5.1. Testes em Circuito Fechado

Foi feita uma reconstituição da alimentação a partir dos dados do "underflow" e "overflow" (tabelas 4 e 5) com o intuito de analisar-se o comportamento das partículas de carvão quanto a uma eventual redução de tamanho e variação no teor de cinzas por faixa granulométrica devido à ação do conjunto bomba-hidrociclone.

5.1.1. Ciclone Convencional

Os resultados obtidos com o ciclone convencional podem ser visualizados nas figuras 23 e 24, a seguir, onde são graficadas as recuperações em massa em função das faixas granulométricas, para diversos tempos de ciclonagem, e o teor de cinzas em função das faixas granulométricas, para os mesmos tempos de ciclonagem.

Na figura 23 fica evidenciada a diminuição de massa com o tempo de ciclonagem das frações mais grosseiras (+0,59 mm). Comparando-se os valores de 5, 10 e 15 min de ciclonagem, onde o equipamento já havia entrado em regime, ou seja, com homogeneização completa do material circulado, se percebe claramente a diminuição em massa, das frações

Tabela 4: CIRCUITO FECHADO - Ciclone Convencional

Underflow

Tipo de Analise		IMEDIATA		5 Min.		10 Min.		15 Min.	
Granulometria (mm)		% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinza
- 2.000	+ 1.190	15.10	27.32	11.80	22.96	9.00	24.69	4.90	24.87
- 1.190	+ 0.590	22.40	34.81	18.10	33.33	14.00	28.94	13.70	26.90
- 0.590	+ 0.250	24.50	38.06	30.50	35.65	27.80	34.79	31.00	32.63
- 0.250	+ 0.150	9.80	43.33	9.40	40.74	12.70	38.83	14.50	40.36
- 0.150	+ 0.088	.70	47.08	8.40	44.22	10.20	40.67	11.10	42.09
- 0.088	+ 0.074	.60	51.71	1.10	49.64	1.10	43.86	1.10	49.29
- 0.074		20.90	66.22	20.70	64.45	25.20	63.33	23.70	62.16
Somatorio		100.00	42.80	100.00	40.93	100.00	41.47	100.00	40.82

Overflow

Tipo de Analise		IMEDIATA		5 Min.		10 Min.		15 Min.	
Granulometria (mm)		% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinza
- 2.000	+ 1.190	.20	18.48	.00	.00	.00	.00	.00	.00
- 1.190	+ 0.590	.60	24.33	.50	20.00	.30	16.76	.20	19.17
- 0.590	+ 0.250	3.00	34.31	2.60	32.01	1.70	30.63	1.40	26.88
- 0.250	+ 0.150	2.50	39.36	2.40	37.84	2.20	41.20	1.70	33.30
- 0.150	+ 0.088	3.20	43.73	3.90	43.52	3.90	47.21	2.80	38.26
- 0.088	+ 0.074	2.90	54.64	1.60	50.65	1.50	49.24	.80	36.65
- 0.074		87.60	66.60	89.00	66.59	90.40	67.15	93.10	66.39
Somatorio		100.00	63.52	100.00	63.61	100.00	64.76	100.00	64.15

Alimentacao Reconstituída

Tipo de Analise		IMEDIATA		5 Min.		10 Min.		15 Min.	
Granulometria (mm)		% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinza
- 2.000	+ 1.190	12.70	27.30	8.70	21.96	6.35	24.69	3.25	24.87
- 1.190	+ 0.590	18.89	34.76	13.48	33.20	9.97	28.83	9.15	26.84
- 0.590	+ 0.250	21.04	37.97	23.18	35.54	20.13	34.69	21.02	32.50
- 0.250	+ 0.150	8.63	43.14	7.56	40.50	9.61	38.99	10.18	39.96
- 0.150	+ 0.088	6.14	46.80	7.22	44.12	8.35	41.57	6.30	41.65
- 0.088	+ 0.074	.97	53.12	1.23	49.98	1.22	45.81	1.00	45.88
- 0.074		31.63	66.39	38.63	65.74	44.37	65.62	47.11	64.98
Somatorio		100.00	46.13	100.00	46.88	100.00	48.32	100.00	48.69

-2 +1,19 mm e -1,19 + 0,59 mm. Ocorre uma estabilização a partir dos 10 min de ciclonagem na fração -1,19 +0,59 mm, que seria o tempo necessário para a ocorrência da cominuição do material menos resistente (carvão previamente fissurado e/ou oxidado).

Quanto às frações intermediárias (-0,59 +0,074 mm), se pode constatar que a massa se manteve praticamente constante durante todo o teste, indicando que nesta faixa granulométrica se dá preferencialmente a remoção da matéria mineral superficial (confirmada pela diminuição nos teores de cinzas destas faixas).

A fração ultrafina (-0,074 mm) respondeu ao comportamento dos grosseiros com aumento de massa em todos os tempos de ciclonagem amostrados.

Analisando-se a figura 24, onde se nota uma diminuição dos teores de cinza, excetuando os ultrafinos onde há a manutenção destes teores com o tempo de ciclonagem, pode-se supor que exista juntamente com a cominuição das frações grosseiras, uma remoção das argilas (fotos 1 e 2, em anexo). Este material cominuído irá contribuir com massa para a fração ultrafina juntamente com a argila liberada, podendo-se explicar deste modo, a manutenção do teor de cinzas da fração -0,074 mm.

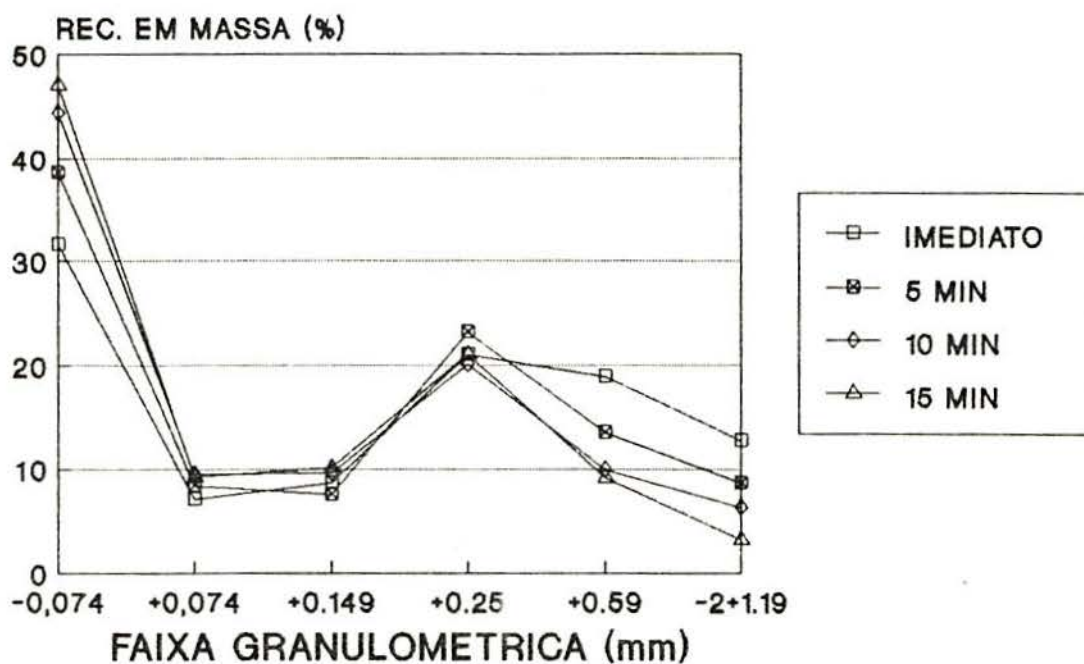


Fig.23 - Ciclone Convencional - Recuperaçao em massa por faixa granulometrica para diversos tempos de ciclonaçem.

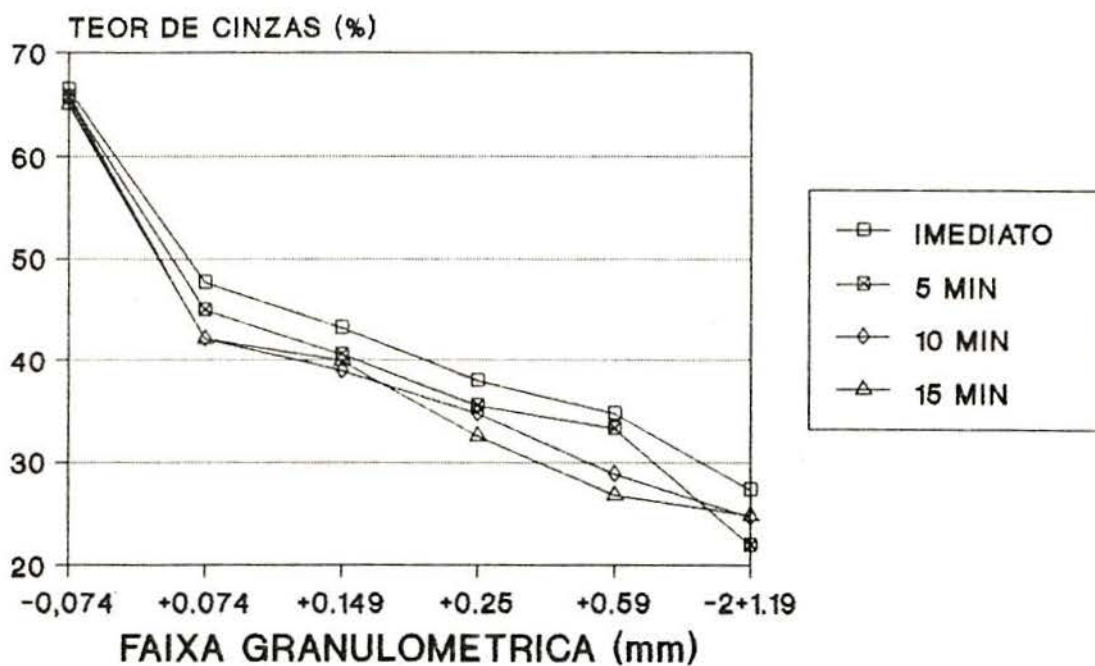


Fig.24 - Ciclone Convencional - Teores de cinza por faixa granulometrica para diversos tempos de ciclonaçem.

5.1.2. Ciclone de Fundo Plano

Usando-se o mesmo procedimento, qual seja, amostras coletadas simultaneamente no "underflow" e "overflow" (tabela 5) e graficando-se os valores das distribuições percentuais de massa e dos teores de cinza das frações granulométricas para cada tempo de ciclonagem (figuras 25 e 26), pretendeu-se avaliar o comportamento do ciclone CBC, em um processo em circuito fechado.

A análise quantitativa dos dados ficou prejudicada pela utilização de lotes diferentes de carvão contendo diferentes quantidades percentuais de material nas frações $-2 +1,19$ mm e $-1,19 +0,59$ mm na alimentação, o que ocasionou uma perda de material na bomba (sedimentação), que deve ser levada em consideração quando comparada ao teste com ciclone convencional. Outro fator a ser observado é que os teores de cinzas mais altos nas frações acima de 0,25 mm em relação aos dados de alimentação do teste com o ciclone convencional (tabela 3) dificultam fazer-se uma comparação efetiva sobre o comportamento do carvão quanto à deslamagem entre os dois equipamentos, em circuito fechado.

Mesmo ponderando as observações acima, é plausível afirmar que há a mesma tendência de diminuição dos teores de cinza com o tempo de ciclonagem, excetuando a fração $-0,074$ mm na qual o teor se manteve constante, e a

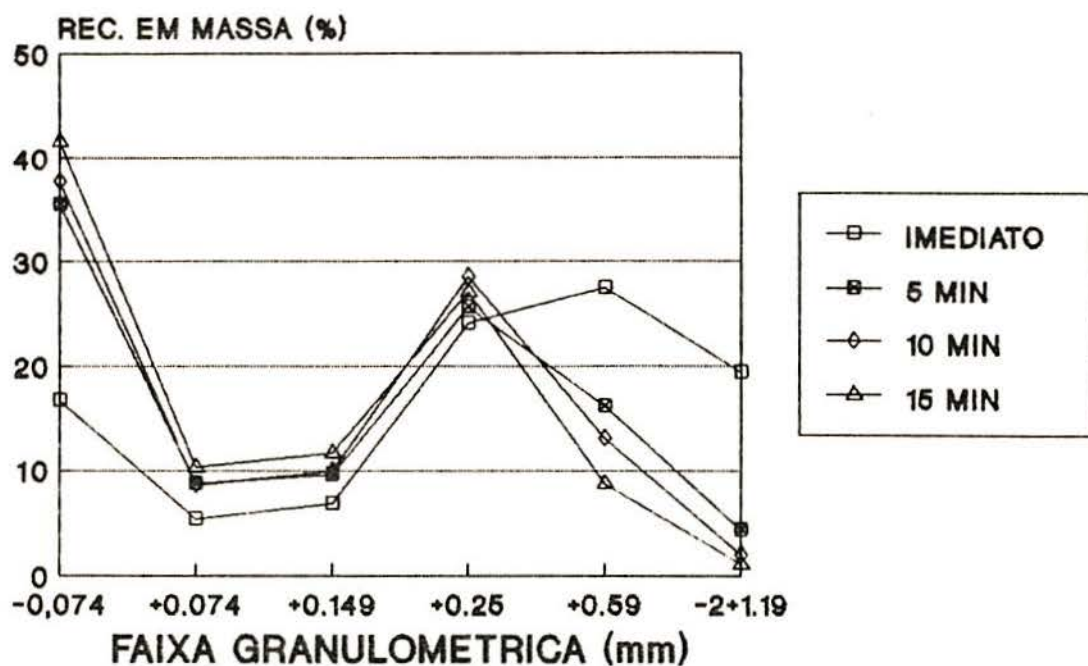


Fig.25 - Ciclone Fundo Plano - recupera-
cao em massa por faixa granulometrica
para diversos tempos de ciclonagem.

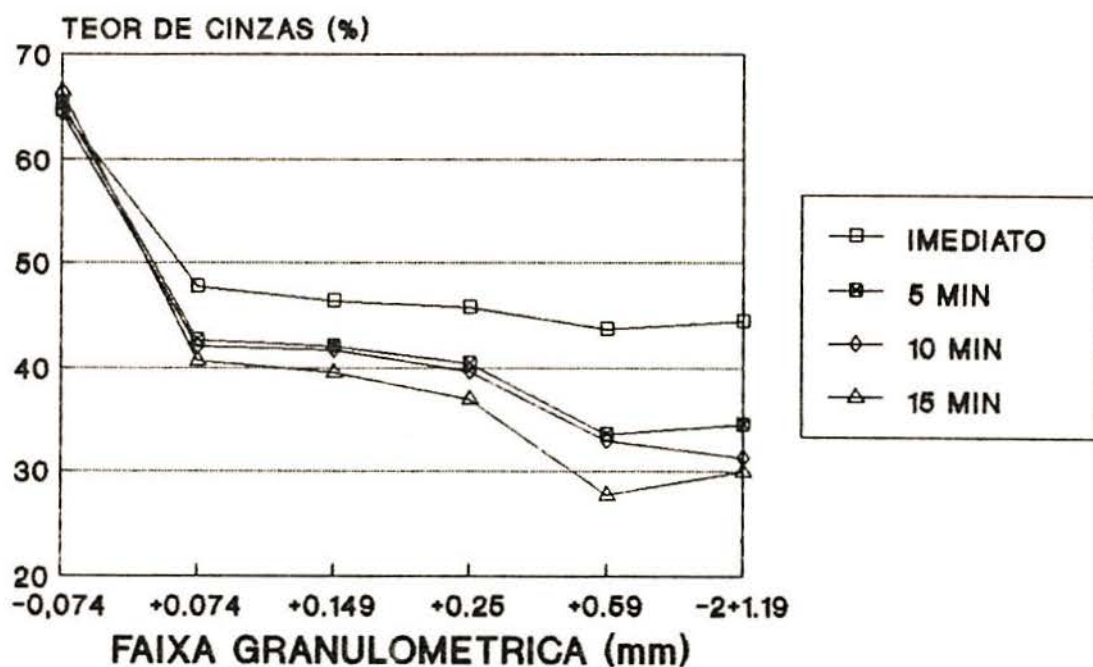


Fig.26 - Ciclone Fundo Plano - Teor
cinza por faixa granulometrica para di-
versos tempos de ciclonagem.

Tabela 5: CIRCUITO FECHADO - Ciclone Fundo Plano

Cinzas "Underflow"

		IMEDIATO		5 Min.		10 Min.		15 Min.	
Malha (mm)		% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas
-2.000	+1.190	22.00	48.69	7.90	39.26	3.50	34.52	1.10	30.00
-1.190	+0.590	33.60	46.91	26.30	37.75	22.40	35.48	15.00	28.09
-0.590	+0.250	27.60	48.62	41.30	43.74	46.40	42.51	45.70	37.80
-0.250	+0.150	6.60	50.84	11.50	47.85	13.20	46.60	18.10	42.14
-0.150	+0.088	3.80	52.86	5.90	50.73	6.80	49.70	9.80	46.80
-0.088	+0.074	.40	56.05	.60	54.30	.90	52.37	1.60	52.45
-0.074		6.00	65.82	6.50	64.11	6.80	64.84	8.70	65.85
SOM.		100.00	49.43	100.00	44.08	100.00	43.29	100.00	40.60

Cinzas "Overflow"

		IMEDIATO		5 Min.		10 Min.		15 Min.	
Malha (mm)		% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas
-2.000	+1.190	17.20	40.05	2.20	24.25	.60	13.44	.00	.00
-1.190	+0.590	22.50	39.72	10.00	26.87	4.00	19.06	.40	8.14
-0.590	+0.250	21.10	42.65	16.10	35.24	11.00	27.95	2.30	14.27
-0.250	+0.150	7.10	43.01	8.40	37.27	6.80	32.41	3.20	20.40
-0.150	+0.088	5.50	44.70	8.30	39.21	8.00	35.49	6.60	27.59
-0.088	+0.074	.90	46.03	1.80	39.94	1.50	37.40	2.30	32.88
-0.074		25.70	64.43	53.20	65.37	68.10	64.40	85.20	66.56
SOM.		100.00	47.31	100.00	50.78	100.00	53.38	100.00	60.30

Alimentação Reconstituída

		IMEDIATO		5 Min.		10 Min.		15 Min.	
Malha (mm)		% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas	% Massa	% Cinzas
-2.000	+1.190	19.38	44.51	4.36	34.57	2.04	31.39	.62	30.00
-1.190	+0.590	27.55	43.71	16.19	33.58	13.12	32.96	8.73	27.70
-0.590	+0.250	24.06	45.77	25.67	40.43	28.55	39.68	27.06	36.94
-0.250	+0.150	6.87	46.43	9.58	42.09	9.97	41.72	11.70	39.59
-0.150	+0.088	4.73	47.69	7.39	42.70	7.41	41.96	8.43	40.34
-0.088	+0.074	.67	48.74	1.34	42.37	1.20	42.95	1.90	42.28
-0.074		16.74	64.66	35.47	65.28	37.71	64.44	41.56	66.48
SOM.		100.00	48.27	100.00	48.23	100.00	48.39	100.00	49.07

cominuição preferencial das partículas mais grosseiras (fotos 3 e 4, em anexo).

5.1.3. Desempenho dos Equipamentos

O desempenho dos dois tipos de ciclone foi prejudicado durante os testes em circuito fechado. Não foi possível, pelo tipo de estudo ao qual se propôs, a utilização de agitadores de polpa, diminuindo a eficiência de separação, principalmente das amostras recolhidas imediatamente após o início do teste. Deve-se ressaltar também, a inadequação dos seguintes parâmetros em cada ciclone:

Convencional

- Pressão abaixo da faixa ótima (entre 2 e 3 kg/cm²)
- Diâmetro do ciclone pequeno para o "top size"
- "apex" abaixo do recomendado

Fundo Plano

- "apex" abaixo do recomendado
- Baixa percentagem de sólidos da alimentação

Nas tabelas 6, 7, 8, 9, 10 e 11, em anexo, são mostrados dados sobre o desempenho dos dois tipos de ciclone, tanto em circuito fechado como aberto.

Nos testes em circuito fechado, observou-se uma menor quantidade de ultrafinos no "underflow" dos ciclones de fundo plano, comparativamente ao ciclone convencional. Pelos valores de "by-pass" (tabelas 6 e 7, em anexo), que

são significativamente maiores nos testes com o hidrociclone convencional, reside a explicação para este fato. Fazendo uso dos dados em circuito aberto com o hidrociclone de fundo plano (tabela 8, em anexo) para que se possam comparar testes com valores de "by-pass" semelhantes, se nota a tendência do hidrociclone convencional de mandar uma maior quantidade de ultrafinos para o produto, nestas condições. Ao mesmo tempo, configurou-se a tendência de corte por densidade das frações acima de 0,074 mm no ciclone do tipo CBC. Nas tabelas 9 e 10, em anexo, é fácil verificar esta tendência, pois os teores de cinzas das frações maiores que 74 micra que saem pelo "overflow" no teste com o hidrociclone convencional são maiores para todos os tempos de amostragem, excetuando 15 minutos onde os teores se equivalem. No teste com o hidrociclone de fundo plano, em nenhum momento os teores de cinzas do "overflow" nos diversos tempos de amostragem são menores, mostrando a predisposição de enviar os mistos mais leves para o "overflow".

Avaliou-se a nitidez de corte através do cálculo de imperfeição, obtida da curva de Tromp corrigida. O modelo utilizado para a interpolação da curva foi o de Erasmus-Modificado (24) (figuras 27 a 33, em anexo).

5.2. Teste em Circuito Aberto

Este teste, como já referido anteriormente, teve dois objetivos: avaliar o comportamento do carvão quando deslamado em condições próximas às encontradas numa planta de beneficiamento e obter valores, com razoável precisão, para um balanço de massas.

O ciclone utilizado foi o mesmo do teste em circuito fechado, somente modificando-se a percentagem de sólidos da alimentação para 15% em peso e a pressão de alimentação para 1,0 kg/cm².

O fato do carvão cominuir-se durante a ciclonagem em circuito fechado, com mudanças consideráveis nos teores de cinzas e distribuição mássica das faixas granulométricas, mascararia qualquer teste com intenções quantitativas. Ao mesmo tempo, pretendia-se analisar a distribuição granulométrica e o teor de cinzas das frações em amostragem instantânea, pois em estudo anterior (3), os testes foram feitos com amostragem em vários tempos.

Foram coletadas e analisadas amostras simultâneas do "underflow" e "overflow" (tabela 12), que reconstituindo a alimentação por balanço mássico e comparando com a alimentação utilizada, proporcionaram os seguintes resultados:

TABELA 12: Análise das amostras de "underflow" e "overflow" em circuito aberto.

Granulometria (mm)	Alim.Reconstituída		Underflow		Overflow	
	%M	%C2	%M	%C2	%M	%C2
-2.000 +1.190	11.63	43.15	16.20	43.15	.00	.00
-1.190 +0.590	18.67	41.08	26.00	41.08	.00	.00
-0.590 +0.250	17.97	41.54	24.60	42.06	1.10	11.97
-0.250 +0.149	7.92	42.29	10.20	44.25	2.10	18.06
-0.149 +0.088	7.05	43.27	7.50	48.33	5.90	26.91
-0.088 +0.074	1.22	44.49	1.00	52.68	1.80	32.90
-0.074	35.54	62.71	14.50	67.80	89.10	60.60
Somatorio	100.00	49.38	100.00	46.51	100.00	56.69

Tabela 13.

FAIXA (mm)	ALIMENTAÇÃO		ALIM. RECONSTITUIDA	
	MASSA (%)	CINZAS (%)	MASSA (%)	CINZAS (%)
-2 +1,19	19,25	47,92	11,63	43,15
-1,19 +0,59	18,90	46,37	18,67	41,08
-0,59 +0,25	16,05	43,84	17,97	41,54
-0,25 +0,149	6,97	42,06	7,92	42,29
-0,149 +0,088	6,21	43,60	7,05	43,28
-0,088 +0,074	1,22	46,03	1,22	44,49
-0,074	31,40	64,55	35,53	62,71
SOMATORIO	100,00	51,50	100,00	49,38

Nota-se claramente que tanto o processo de cominuição quanto o de remoção de matéria argilosa das partículas é mais pronunciado nas frações mais grosseiras, principalmente aquelas com um grau maior de fissuramento, ocasionado pela britagem ou pela oxidação. Depreende-se dos resultados que o material cominuído nas frações -2 +1,19 mm e -1,19 +0,59 mm contribui com massa para as frações subsequentes, o que é lógico. No entanto não é muito clara a forma como se dá esta divisão, pois aliado ao fato da manutenção dos teores de cinza das frações intermediárias se verifica também a manutenção dos teores de cinzas para a fração ultrafina. Este fato pode ser explicado pela geração de ultrafinos de mistos de carvão (fotos 5 e 6, em anexo).

5.2.1. Balanço de Massas e Cinzas do Processo

Aproveitou-se este teste em circuito aberto para a determinação de um balanço de massas desta parte do processo, além de se fazer uma primeira apreciação do ciclone de fundo plano para a deslamagem do carvão de Candiota.

Para o cálculo do balanço de massas e metalúrgico, o teor de cinzas da alimentação foi recalculado a partir de amostras de cabeça de "underflow" e "overflow", perfazendo 50,62% de cinzas. O tamanho de corte obtido foi de 76 micra (figura 35, em anexo).

Por estes valores obter-se-ia um produto com 48% de cinzas e recuperação em torno de 73% em massa, com o "overflow" apresentando um teor de 57% de cinzas.

Na tabela 14, são apresentados os teores de cinza e recuperação em massa das frações +0,074 mm e -0,074 mm:

Tabela 14.

FAIXA (mm)	UNDERFLOW		OVERFLOW	
	TCZ	% DA ALIM.	TCZ	% DA ALIM.
> 0,074	42,90	61,4	24,67	3,1
< 0,074	67,80	10,4	60,60	25,1
TOTAL	46,51	71,8	56,65	28,2

Pode-se notar claramente a influência da densidade no corte do material acima de 0,074 mm, pela diferença acentuada no teor de cinzas do carvão no produto e o que é descartado pelo "overflow".

Quanto aos ultrafinos (-0,074 mm), onde o "underflow" apresenta 67,8% de cinzas e o "overflow" 60,6%, imagina-se que neste tipo de ciclone a maior parte da liberação se daria provavelmente no leito formado, dificultando assim, a saída deste material liberado pelo "overflow".

O fato de se utilizar uma bomba centrífuga em condições de escala industrial poderia minorar este problema, pois o material entraria no hidrociclone com uma quantidade maior de argila liberada. Isto provavelmente diminuiria bastante esta característica negativa do hidrociclone do tipo CBC, pois nos testes em circuito fechado, que a partir de um determinado momento, a maior parte da argila liberável estava dispersa no meio, os teores de cinzas da fração -0,074 mm (tabelas 4 e 5) tanto de "underflow" como "overflow" se equivaliam, isto para os dois tipos de equipamento.

5.2.2. Eficiência do Equipamento

Quanto ao fator eficiência de separação do equipamento, qualquer julgamento de caráter definitivo seria precipitado pois trabalhou-se com um diâmetro de "apex" de 14 mm, abaixo do recomendado (16mm) pelo fabricante. Concomitantemente, o carvão utilizado neste teste possuía uma quantidade de grosseiros (+0,59 mm) bastante grande se comparada ao carvão dos testes com o ciclone convencional,

no qual o fabricante baseou-se para estimar os parâmetros geométricos e de funcionamento do ciclone de fundo plano.

Procurou-se contornar estes problemas trabalhando-se com uma percentagem de sólidos mais baixa (15% em peso contra os 18% recomendados) e com a pressão mínima admissível para este caso (1 kg/cm²). Atingiu-se desta maneira, como já citado anteriormente, um d₅₀ de 76 micra, que está dentro da faixa de separação das espirais (25).

Os valores de imperfeição obtidos podem ser considerados altos (na faixa de 0,4 a 0,5) para as três amostragens (tabelas 8 e 11, figuras 35, 36 e 37, em anexo).

5.3. Petrografia

O estudo petrográfico, realizado no Laboratório de Análise do Carvão do Instituto de Geociências da UFRGS, incidiu sobre os testes em circuito fechado e aberto, e constou da contagem de pontos dos diferentes grupos macerálicos e matéria mineral. Os grupos macerálicos (vitritina, exinita e inertinita) foram agrupados e designados de matéria orgânica, sendo analisados por tempo de amostragem e por tipo de ciclone (tabelas 15, 16 e 17, em anexo).

São apresentados gráficos (figuras 38 a 45, em anexo e de 46 a 49) mostrando o comportamento por faixa em cada tempo de amostragem. As faixas escolhidas foram -2 +1,19 mm, -1,19 +0,59mm, -0,59 +0,074 mm e -0,074 mm.

5.3.1. Circuito Fechado

Fazendo a análise dos resultados com o ciclone convencional se confirma a tendência à diminuição de matéria mineral nas frações grosseiras (+0,59 mm), (figuras 38 e 39, em anexo), em relação a matéria orgânica, com o tempo de ciclonagem. As fotos de 1 a 4 mostram o efeito da deslamagem superficial devido ao tempo de ciclonagem. O mesmo se repete para as frações mais finas (fotos 5 e 6, em anexo).

Na contagem das frações ultrafinas, faz-se necessário ressaltar, que existe uma superestimação da matéria orgânica em detrimento da matéria mineral, pela própria dificuldade na contagem destas últimas que se apresentam extremamente disseminadas.

O resultado com o ciclone de fundo plano (figuras 42 a 45, em anexo) apresenta para as frações mais grosseiras (+0,59 mm) uma diminuição de matéria mineral mais rápida e efetiva que o ciclone convencional. Por outro lado nas frações abaixo de 0,59 mm (figuras 44 e 45) não há diferenças significativas.

De posse destas informações resolveu-se analisar o padrão de quebra das partículas. Os macerais do grupo da vitrinita apresentam um padrão de quebra definido (tendência de se partirem sob forma cúbica) (foto 7, em anexo) quando submetidas a esforços mecânicos. A fração escolhida foi a -1,19 +0,59 mm. Os tempos selecionados

foram os extremos (imediate e 15 minutos). Estabeleceu-se um padrão de classificação para a forma das bordas:

- arredondado
- misto
- anguloso

Nas seções petrográficas do ciclone convencional, o padrão variou de misto (foto 8, em anexo) a anguloso (foto 9, em anexo). Já para o ciclone de fundo plano, o padrão variou de misto (foto 10, em anexo) a arredondado (foto 11, em anexo).

Chamou atenção o resultado do ciclone de fundo plano, pois os grãos que sabidamente sofreram quebra não apresentavam o padrão esperado. Notou-se que as partículas avaliadas como arredondadas, haviam respondido ao padrão de quebra preferencial das telocolinitas (cúbico), apresentando os vértices arredondados (foto 12, em anexo).

5.3.2 Circuito Aberto

Avaliou-se a alimentação, "underflow" e "overflow" para as mesmas quatro frações.

Esperava-se com a petrografia obter informações precisas sobre o comportamento dos grupos macerálicos quando submetidos a esforços mecânicos produzidos pelo processo de hidrociclonagem em condições próximas às de uma planta. A amostragem foi instantânea e apresentou como resultado da contagem de pontos (tabela 17, em anexo) valores coerentes

com os obtidos pelos ensaios de granulometria e de teor de cinzas, ou seja, diminuição de matéria mineral nas frações grosseiras (-2 +0,59 mm).

Os dados são apresentados em forma de gráfico (figuras 46, 47, 48 e 49)

5.4. ENSAIOS AFUNDA-FLUTUA

Todos os testes realizados no intuito de interpretar e comprovar o fenômeno de liberação das matérias argilosas do carvão de Candiota foram, como era de se esperar, mais "visíveis" nos testes em circuito fechado. No teste de ciclonação realizado em circuito aberto, devido as pequenas diferenças numéricas e ao erro intrínseco no manuseio do material em laboratório, recorreu-se a mais esta ferramenta como subsídio no estudo da liberação.

Estão tabelados abaixo os valores dos testes de afunda-flutua realizados com aliquotas da alimentação do teste em circuito aberto e do produto ("underflow").

Tabela 18

FAIXA (mm)	-1,5 (% M)	(TCZ)	+1,5 (% M)	-1,8 (TCZ)	-1,8 (% M)	(TCZ)
ALIMENTAÇÃO						
+1,19	15,15	12,11	33,23	40,49	51,62	57,14
+0,59	19,79	16,26	27,17	39,69	53,04	60,54
+0,074	23,08	12,20	35,37	38,31	42,13	63,84
UNDERFLOW						
+1,19	20,40	10,35	39,71	42,58	39,89	58,89
+0,59	25,79	12,52	36,18	39,67	38,03	58,03
+0,074	21,21	16,19	35,40	41,15	43,39	61,93

CICLONE FUNDO PLANO

Circ.Aber.(-2 +1,19mm) - Teste 1

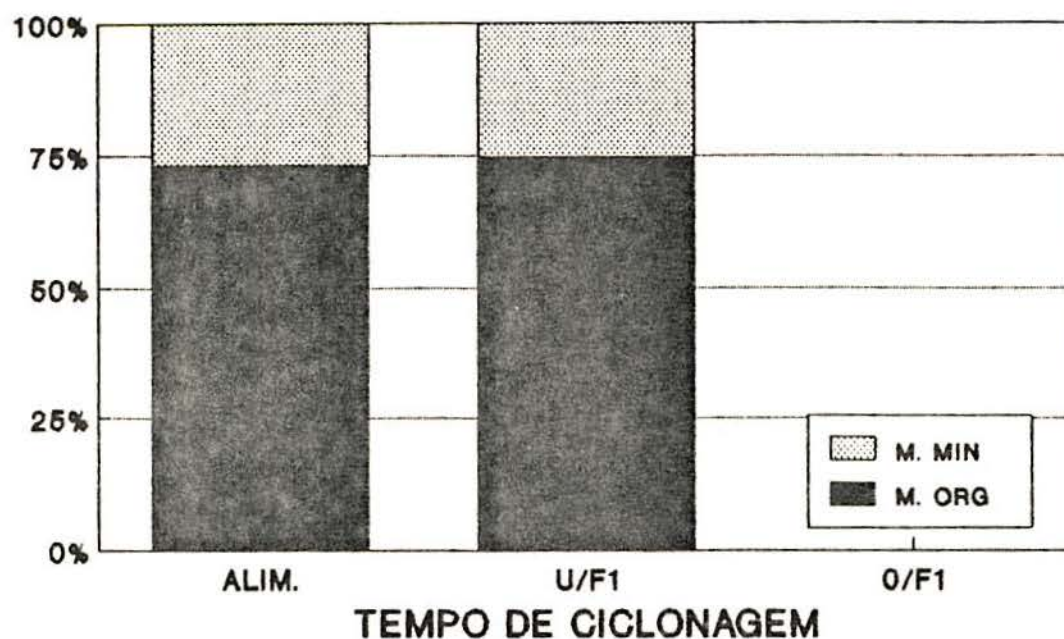


Fig.46 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral nos diversos produtos por faixa granulometrica.

CICLONE FUNDO PLANO

Circ.Aber.(-1,19 +0,59mm) - Teste 1

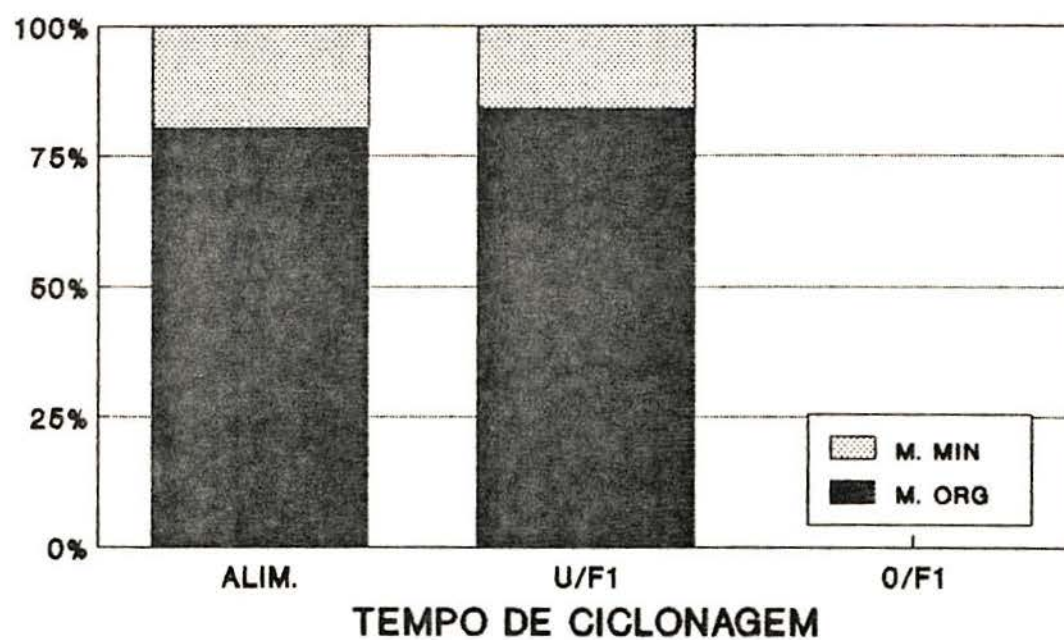


Fig.47 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral nos diversos produtos por faixa granulometrica.

CICLONE FUNDO PLANO

Circ.Aber.(-0,59 +0,074mm) - Teste 1

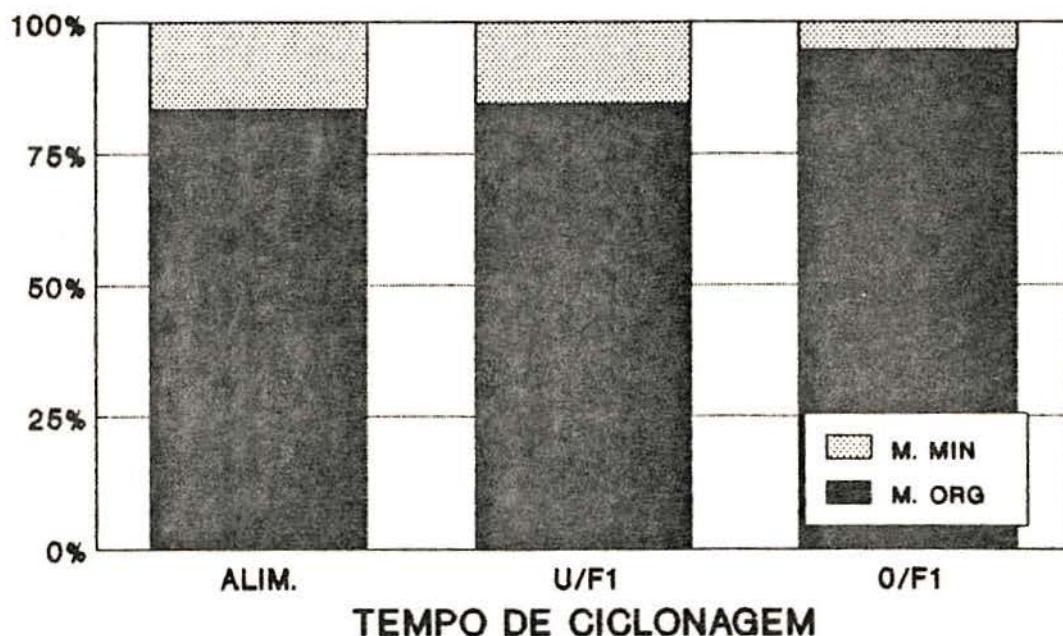


Fig.48 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral nos diversos produtos por faixa granulometrica.

CICLONE FUNDO PLANO

Circ.Aber.(-0,074mm) - Teste 1

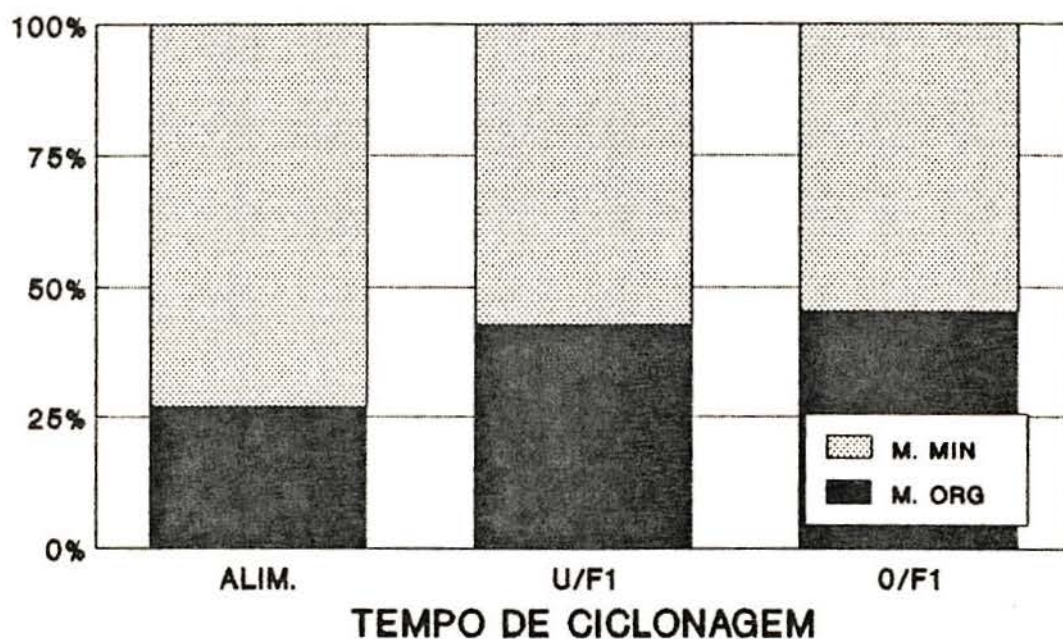


Fig.49 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral nos diversos produtos por faixa granulometrica.

Comparando-se os dados de alimentação e "underflow" pôde-se comprovar a liberação com o aumento percentual de massa que ocorre no "underflow" em relação à alimentação nas frações mais grosseiras tanto dos carvões ricos em matéria carbonosa (flutuados em $1,5 \text{ g/cm}^3$) como nos mistos (flutuados em $1,8 \text{ g/cm}^3$). As frações granulométricas $-2 +1,19 \text{ mm}$ e $-1,19 +0,59 \text{ mm}$ considerando a massa de material flutuado em $1,5 \text{ g/cm}^3$ passam de respectivamente 15,15 e 19,79 % para 20,40 e 25,79 %. Ponderando massas e teores de cinzas do flutuado total em $1,8 \text{ g/cm}^3$ obter-se-ia para a fração acima de 0,59 mm, 47,67 % de flutuado nesta densidade com 30,71 % de cinzas, na alimentação. O material após a ciclonagem apresenta 61,04 % de flutuado com 29,98 % de cinzas. Verifica-se portanto um aumento de 28 % na massa de flutuado desta fração no "underflow" relativamente à massa de material alimentado. Na fração $-0,59 +0,074 \text{ mm}$ a massa de flutuado em $1,8 \text{ g/cm}^3$ permanece praticamente constante antes e após a ciclonagem.

6. CONCLUSOES

Constatou-se um processo de cominuição das frações mais grosseiras (-2 +0,59 mm) e um aumento considerável da fração -0,074 mm, nos testes em circuito fechado. Em circuito aberto, devido ao curto tempo de residência, somente aquelas partículas de carvão que abaladas por efeito da britagem ou oxidação responderem aos esforços mecânicos, havendo portanto uma diminuição no processo de liberação.

No ciclone de fundo plano, quando em circuito fechado, além da cominuição, ocorre um desgaste nas partículas, que se deve provavelmente ao princípio de funcionamento (leito represado) deste tipo de ciclone.

O teste em circuito aberto mostrou que, mesmo com a liberação de parte da matéria mineral, não existe uma separação efetiva pelo equipamento. Isto influenciou diretamente na eficiência do processo, pois as argilas mesmo completamente liberadas (granulometria extremamente fina) tendem a sair no produto.

No caso da utilização de hidrociclones no beneficiamento de carvão a eficiência da deslamagem será tanto menor quanto maior for a participação de ultrafinos que não tenham sido liberados.

Comparando-se os macerais do grupo da vitrinita observou-se, em amostras colhidas imediatamente e após 15

minutos de ciclonagem, que eles sofrem uma deslamagem efetiva; isto, porém, nem sempre é comprovado nos testes de teores de cinzas.

Nos testes em circuito fechado, confirmado posteriormente pelo estudo petrográfico, o hidrociclone de fundo plano mostrou-se mais efetivo no processo de degradação dos grosseiros. Sabendo que com a degradação do carvão estarão surgindo faces livres para que ocorra a remoção das argilas, pode-se afirmar que este equipamento mostra um maior potencial na geração de argilas liberadas.

Quanto à tendência deste hidrociclone de realizar um corte com a densidade influenciando consideravelmente mais que no hidrociclone convencional e ao mesmo tempo com a maior parte da liberação se dando no leito represado que se forma na parte inferior do CBC, é fundamental que se compare o desempenho dos dois equipamentos com as variáveis geométricas e operacionais otimizadas, para que seja possível uma comparação efetiva entre ambos. Um fator como a maior pressão de trabalho dos hidrociclones convencionais, que esta diretamente relacionado à liberação que certamente ocorre durante o bombeamento traria, sem dúvida, novos fatores a serem analisados em um estudo comparativo entre os dois tipos de hidrociclone.

Deste trabalho, quanto às metodologias utilizadas ficou clara a dificuldade de se avaliar e comparar desempenhos com testes em circuito fechado. O fato de não ser possível utilizar agitação mecânica ocasionou

dificuldades de ordem operacional que validam este tipo de teste somente para avaliação dos fenômenos de degradação e liberação do carvão de Candiota. Os testes que tensionem a obtenção de resultados de ordem prática deverão ser executados em circuito aberto.

E de fundamental importância a aplicação de análise petrográfica no estudo da eficiência da deslamagem em hidrociclonagem. E assim, mesmo que duas ou mais amostras apresentem mesmo teor de cinzas, a análise petrográfica mostrará onde realmente ocorreu uma menor ou maior deslamagem pois como ficou determinado no teste em circuito aberto que apesar de ocorrer a liberação das argilas, mesmo com menor granulometria, elas irão concentrar-se no "underflow".

7. SUGESTOES

Supondo que em um futuro trabalho se resolva fazer uma comparação efetiva entre os dois tipos de hidrociclone, visando a utilização na futura planta de Candiota, sugere-se que:

- O dimensionamento dos equipamentos de testes, seja acompanhado pela fábrica (no caso do fundo plano, pela AKW do BRASIL por ser patente exclusiva).

- Se faça uma análise da liberação causada pelo bombeamento e qual a influência da pressão.

- Se quantifique a liberação que ocorre com alimentação por gravidade, para que se avalie a participação do hidrociclone propriamente dito.

Quanto à Proposta de Planta de Beneficiamento para o Carvão de Candiota, seria válido, caso se confirme o potencial do fundo plano de ocasionar uma liberação mais efetiva, testar um circuito de finos onde uma bateria de hidrociclones do tipo CBC realize o primeiro corte, alimentando as espirais com um material já liberado. As espirais se encarregariam de concentrar a matéria orgânica e diminuir o teor de enxofre. O produto das espirais deverão conter praticamente a totalidade das argilas, que mesmo liberadas saíram no "underflow" do ciclone. Antes do processo de briquetagem ou pelotização, este material deve sofrer um desagüe que poderia ser feito por uma bateria de

hidrociclones convencionais. Estes hidrociclones poderiam realizar um deslame a granulometrias extremamente finas obtendo-se assim uma concentração sem a perda de uma parcela significativa dos ultrafinos de carvão gerados.

8. BIBLIOGRAFIA

- 1.- Sampaio, C. H., Jablonski, A. e Amaral, H. V. F., "Beneficiation of the Coal from Candiota-Brasil", a ser apresentado no "11th International Coal Preparation Congress" - Tóquio, Japão, outubro de 1990.
- 2.- Trawinski, H. e Eisenlohr, V. , "A Tecnologia dos Hidrociclones e seu Recente Desenvolvimento", publicação avulsa - São Paulo, 1979.
- 3- Sampaio, C. H. e Hoberg, H. , "Caracterização para o Beneficiamento Gravimétrico do Carvão de Candiota", In: XIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia - São Paulo, 1988, p.247.
- 4.- CEEE, "Pólo Energético de Candiota", 1987, volume 1.
- 5.- Corrêa da Silva e Marques-Toigo, "Carvão no Brasil: Mina de Candiota - Rio Grande do Sul".
- 6.- Formoso, M.L.L., "Alguns Aspectos Geológicos e tecnológicos das Principais Ocorrências de Argilas do Rio Grande Do Sul", Cerâmica, 1968, 14 (53): 1 a 13.
- 7.- Corrêa da Silva, Z.C., 1973, "On Tonstein in the Candiota Mine, RS, Brazil", Compte Rendus 7^{eme} Cong. Int. Strat. Géol. Carbonifère, Krefeld, 1971, 2: 287-295.
- 8.- Corrêa da Silva, "3º Simpósio Sulbrasileiro de Geologia", Curitiba, 1987, volume 2, p.677-688.
- 9.- Informações - Companhia Riograndense de Mineração.

- 10.- Leister, H., "Características de Lavabilidade de Carvões do Rio Grande do Sul", Engenharia, Mineração e Metalurgia, 1965, p.243.
- 11.- Kelly-Spotiswood, "Introduction to Mineral Processing", Interscience Publication, J. Wiley, New York, 1982.
- 12.- Wills, B.A., "Mineral Processing Technology", Pergamon 1980, p.233-251.
- 13.- Currie, J.M., "Unit Operations in Mineral Processing", Cap.11, p.24-54.
- 14.- Lilge, E.O., "Hydrociclone Fundamentals", Trans. Inst. Min. Metall., 1972, (71) p.285-337.
- 15.- Kelsall, D.F., "The Theory and Applications of the Hydrociclone", Ch. 5 in Solid-Liquid Separations: A Review and Bibliographie, J.B. Poole and D. Doyle (Eds.), HMSO, 1966.
- 16.- Bradley, D., "The Hydrociclone", Oxford, Pergamon Press, 1965.
- 17.- Yoshioka, N. and Hotta, Y., "Liquid Cyclone as a Hydraulic Classifier", Chem. Eng. Japan, 1955, 19: 632-640.
- 18.- Lynch, A.J., Rao, T.C. and Prisbrey, K.A., "The Influence of Hydrociclone Diameter on Reduced Efficiency Curves", Int. J. Min. Proc., 1974, 1: 173-181.
- 19.- Svarovski, L., "Description of Hydrociclone Performance and Scale-up Using Dimensionless Groups", Industrie Minerale, 9/84, p.691-696.

- 20.- Rietma, K., "Performance and Design of Hydrociclones", Parts I, II, III and IV, Chem. Eng. Sc., 1961, vol. 15, p. 298-325,
- 21.- Dahlstrom, D.A., "Fundamentals and Applications of the Liquid Cyclone", Chem. Engng. Prog. Symp. series 15, 50, 41, 1954.
- 22.- Plitt, L.R., "A Mathematical Model of Hydrociclone Classifier", CIM Bull, dec. 1976, volume 69, p.114-123.
- 23.- Mular and Jull, "The Selection of Cyclone Classifiers, Pumps and Pump Boxes for Grinding Circuits in Mineral Processing Plant Design", AIME, New York, 1978.
- 24.- Parisi, M.A.N., Tavares, L.M. e Sampaio, C.H., "Modelamento de Curvas de Partição de Hidrociclones", em andamento.
- 25.- Mikail, M.W., Salama, A.I.A., Parsons, I.S. e Humeniuk, O.E., "Evaluation and Application of Spirals and WOC in Cleaning of Fine Coal", Coal Preparation, 1988, vol. 6, p. 53-78,
- 26.- Schneider, A.W., "Contribuição ao Estudo dos Principais recursos Minerais do Rio Grande do Sul", Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, Rio Grande do Sul, 1978, p.48.
- 27.- DNPM, "Informativo Anual da Indústria Carbonífera", 1988, ano base 1987.
- 28.- Trawinski, H., "Theory, Applications and Practical Operation of Hydrocyclone", Eng. Mining Journal, set. 1976.

9. ANEXOS

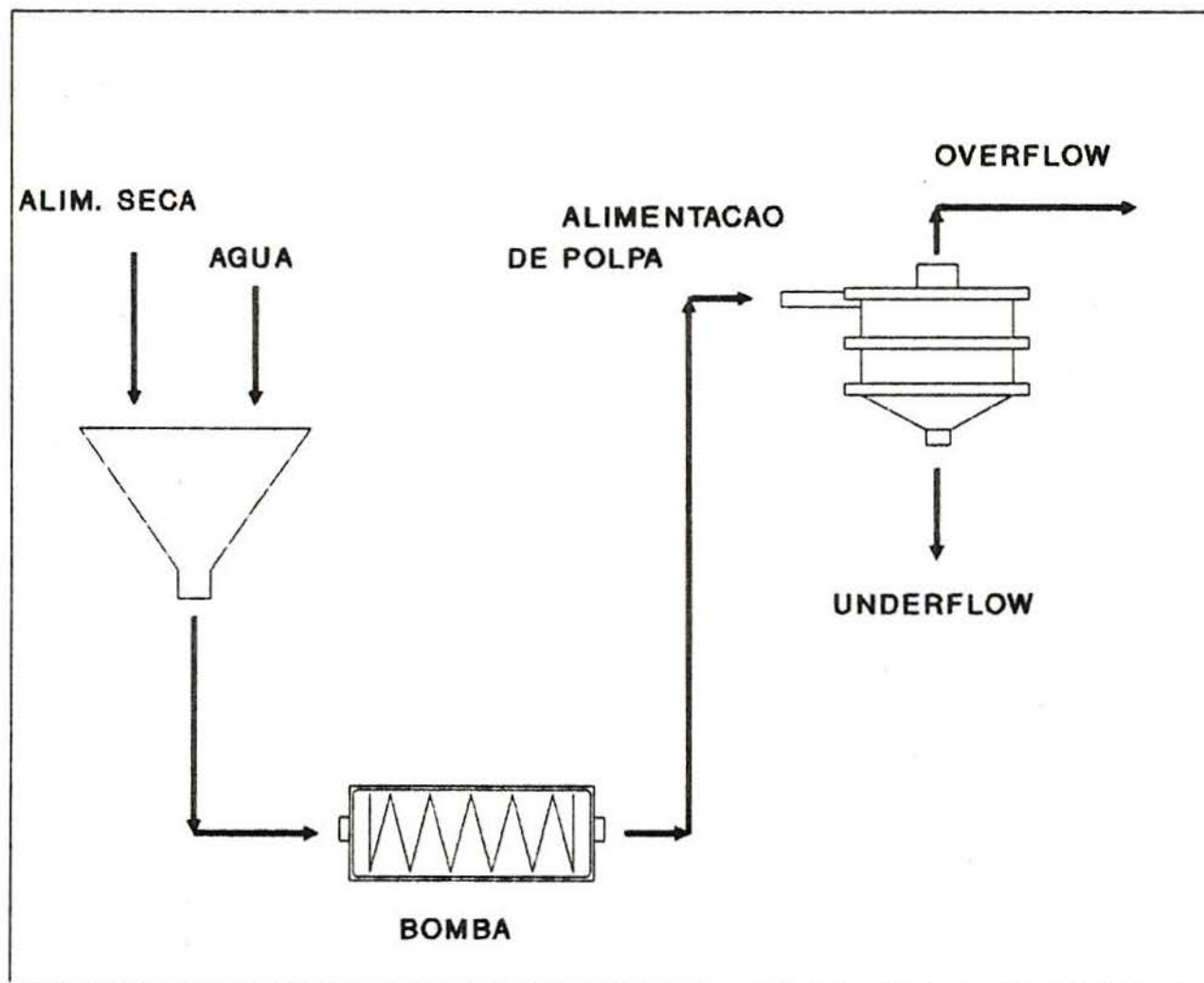


FIG. 21 - CIRCUITO ABERTO

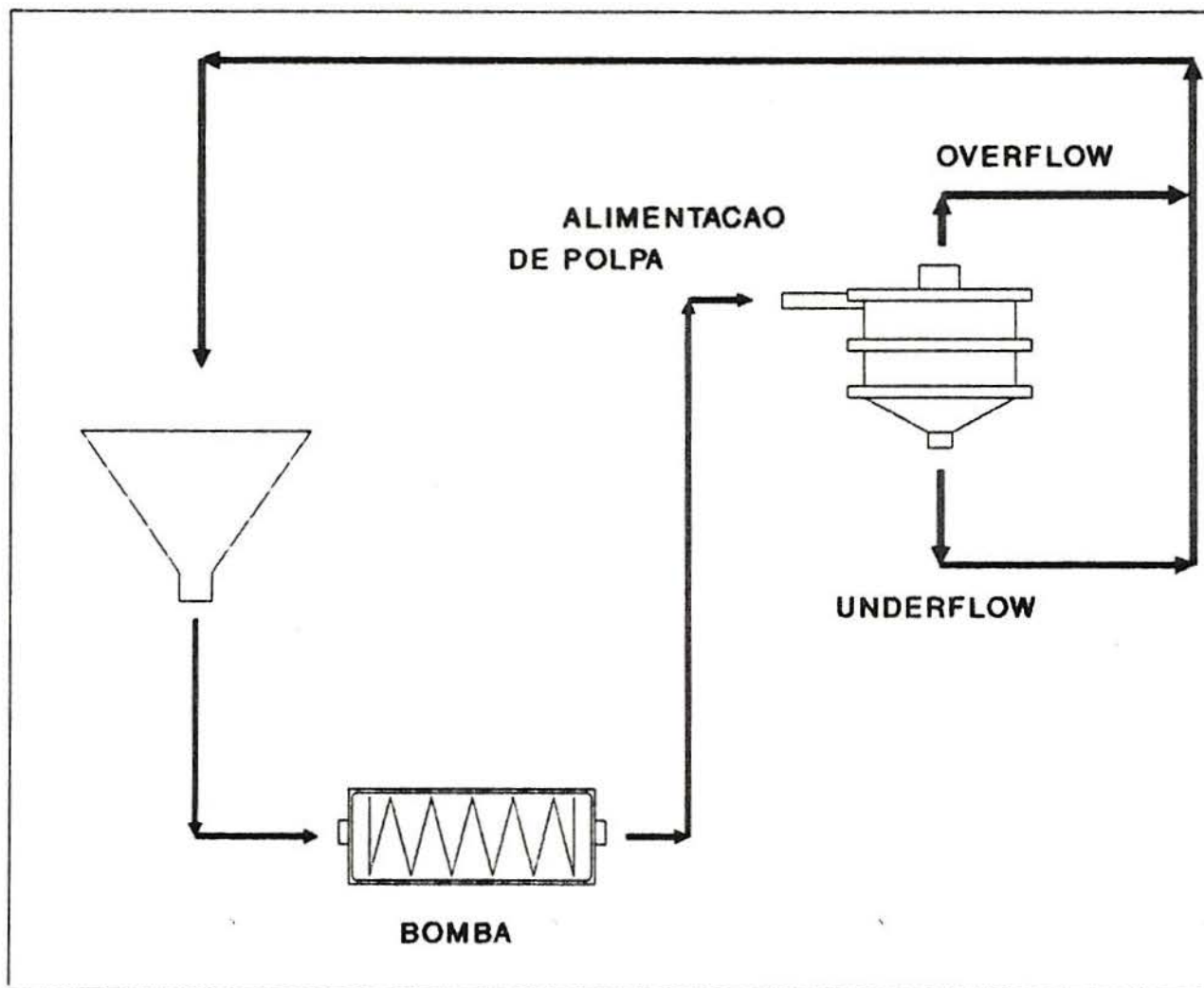


FIG. 22 - CIRCUITO FECHADO

Curva de Particao Convencional Imediato C x T

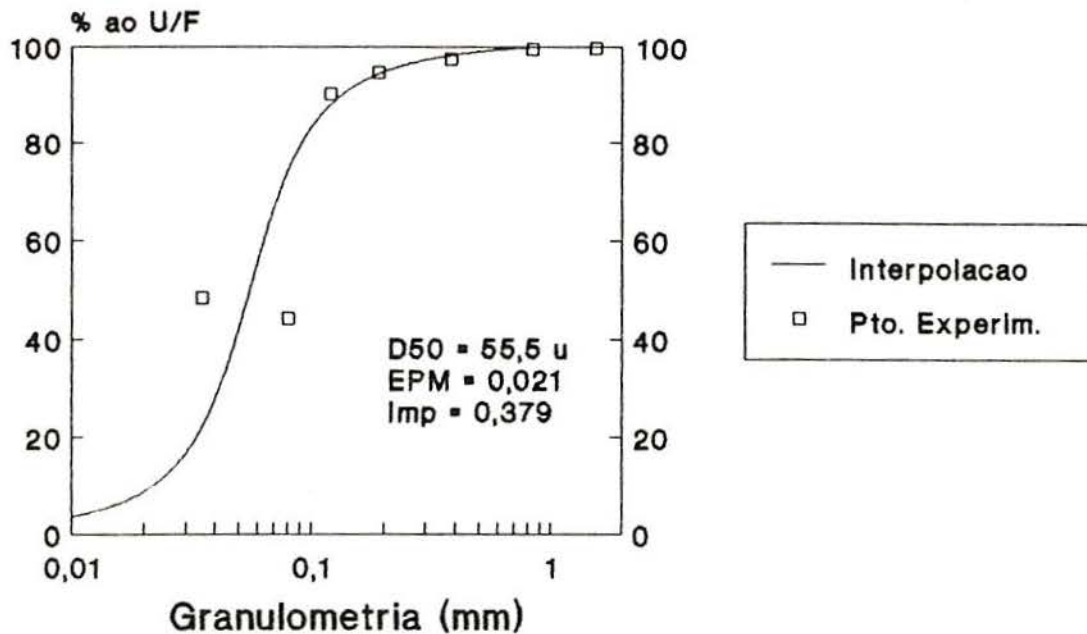


Fig.27 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone Convencional para o tempo Imediato.

Curva de Particao Convencional 5 min C x T

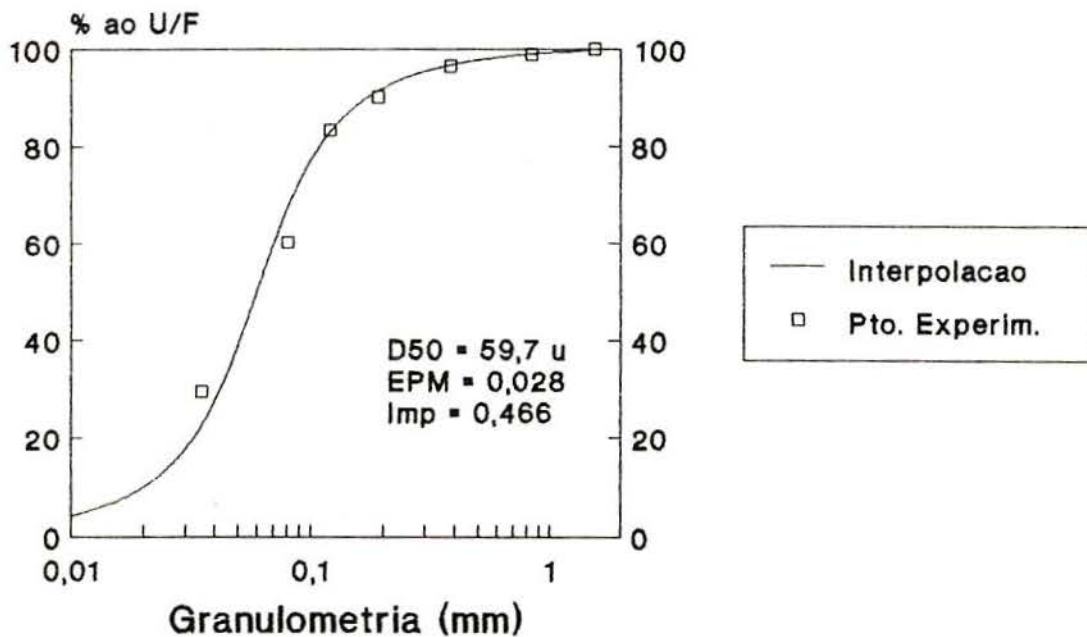


Fig.28 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone Convencional para o tempo de 5 min.

Curva de Particao Convencional 10 min C x T

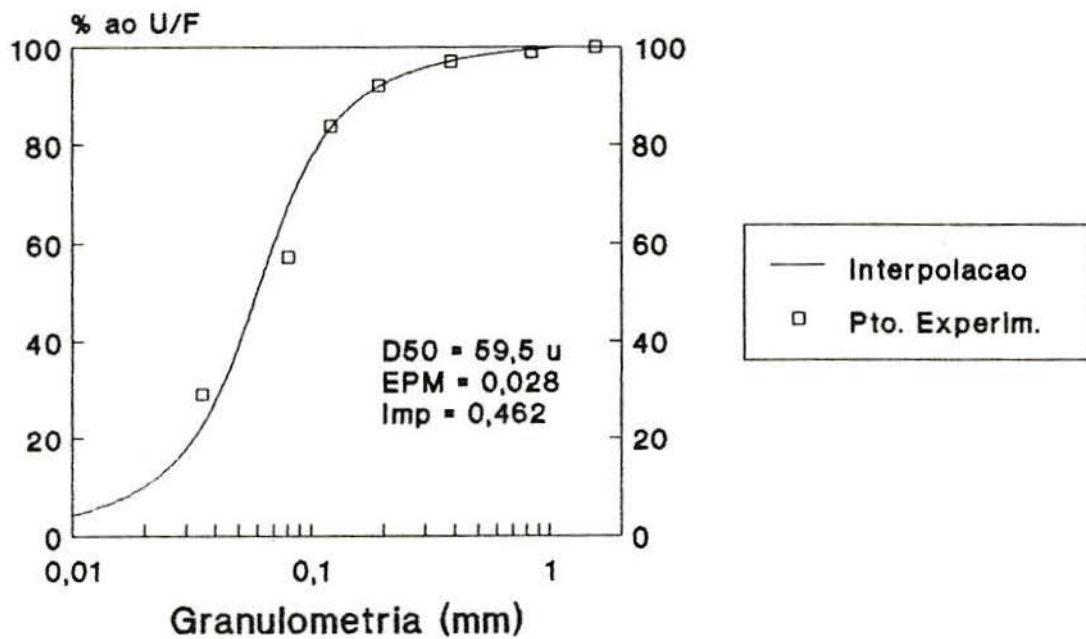


Fig.29 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone Convencional para o tempo de 10 min.

Curva de Particao Convencional 15 min C x T

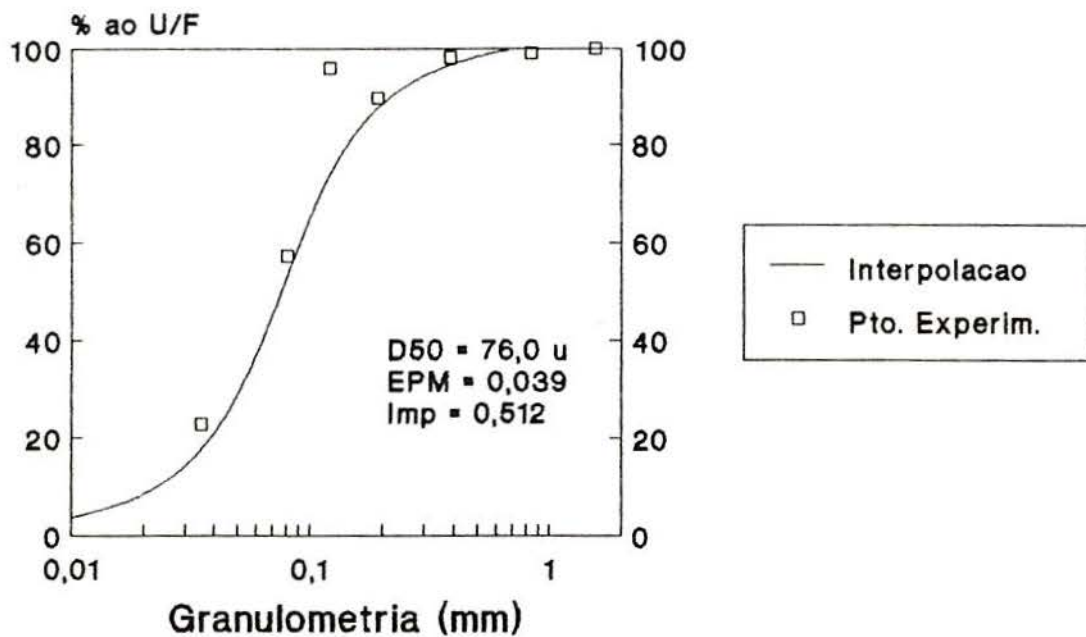


Fig.30 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone Convencional para o tempo de 15 min.

Curva de Particao

Fundo Plano Imediato C x T

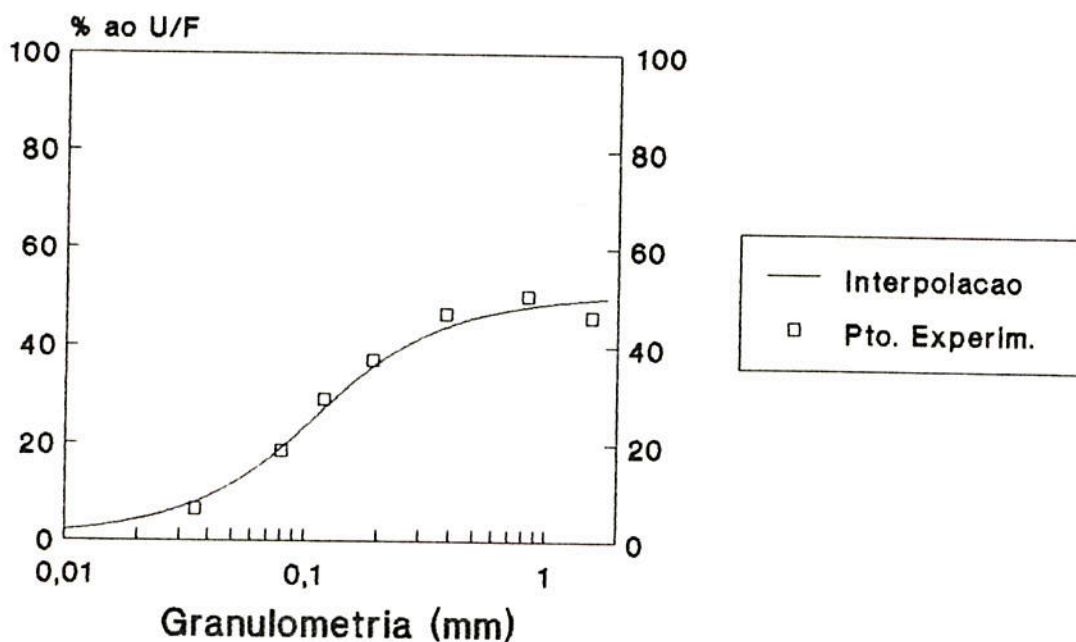


Fig.31 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo Imediato.

Curva de Particao

Fundo Plano 5 min C x T

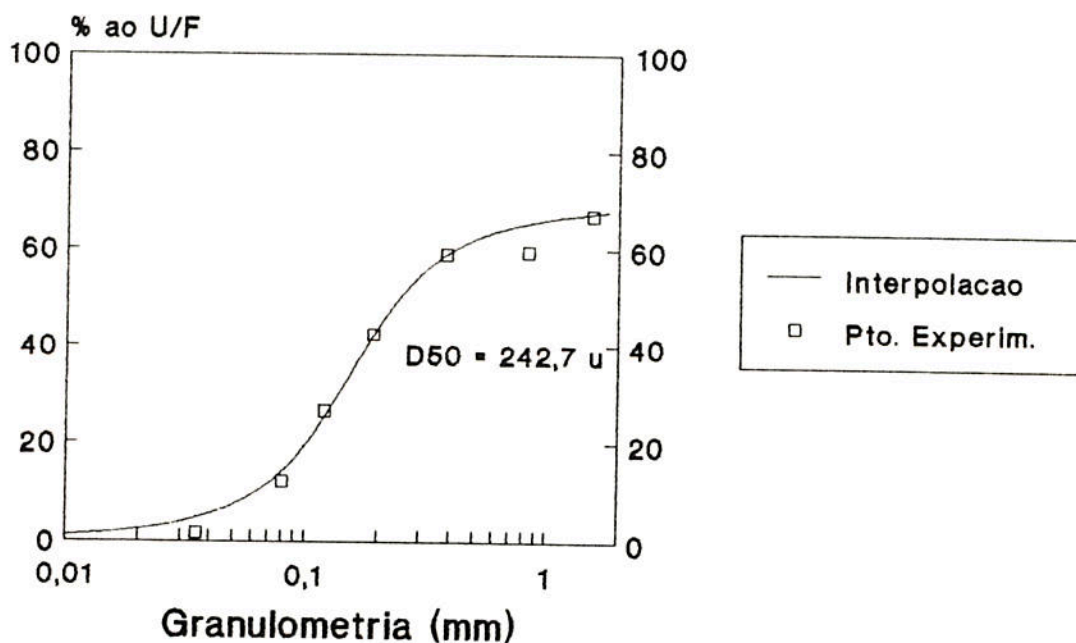


Fig.32 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo de 5 min.

Curva de Particao

Fundo Plano 10 min C x T

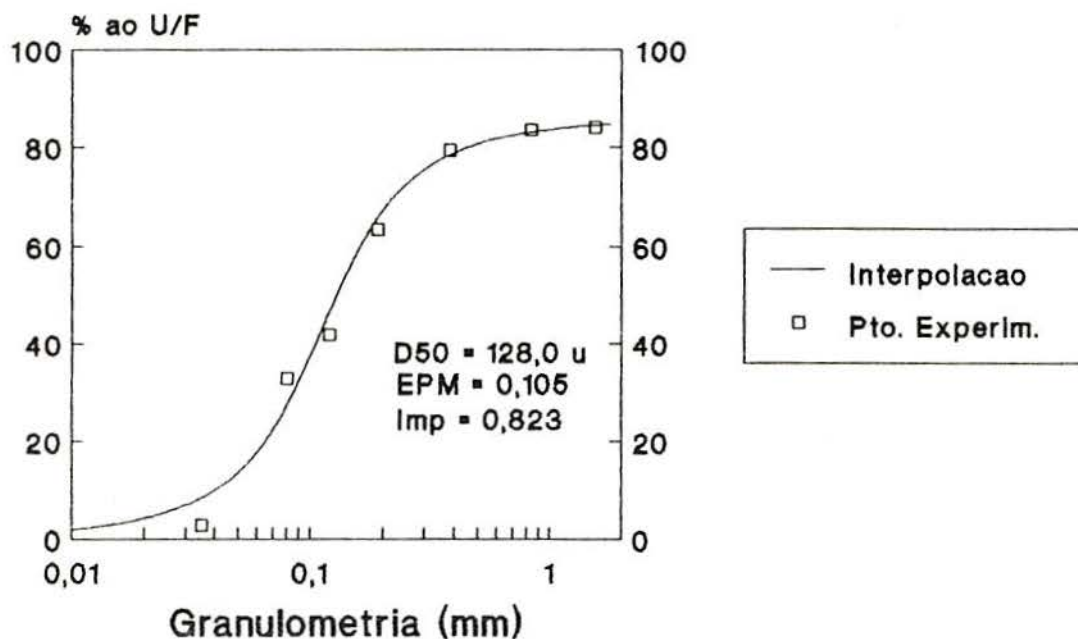


Fig.33 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo de 10 min.

Curva de Particao

Fundo Plano 15 min C x T

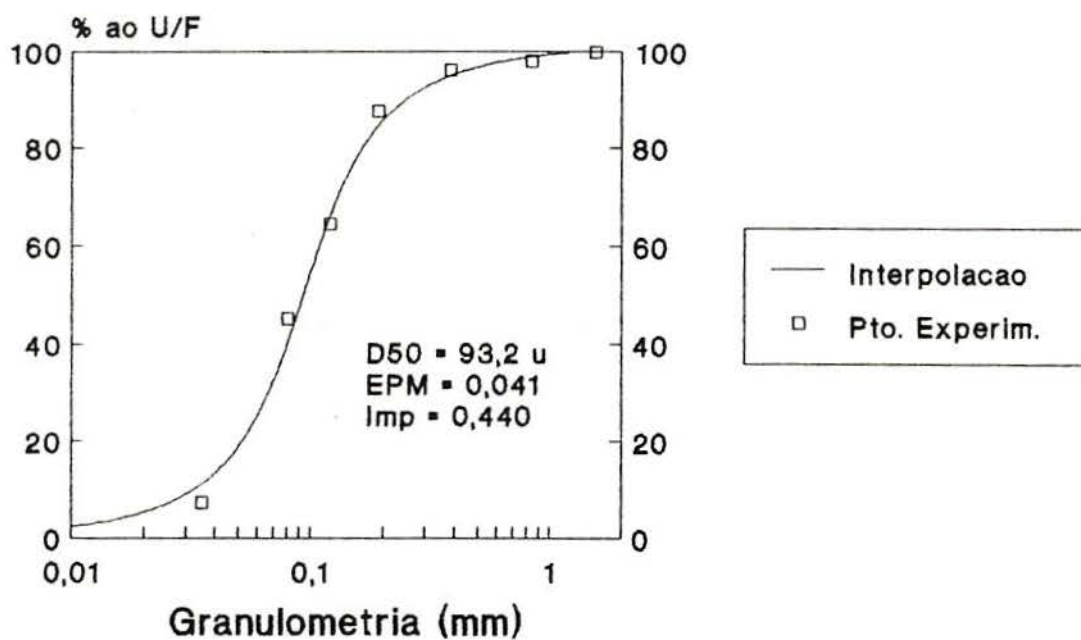


Fig.34 - Curva de Particao do Teste em Circuito Fechado com o Ciclone de Fundo Plano para o tempo de 15 min.

Curva de Particao

FP - C. Aberto - Teste 1

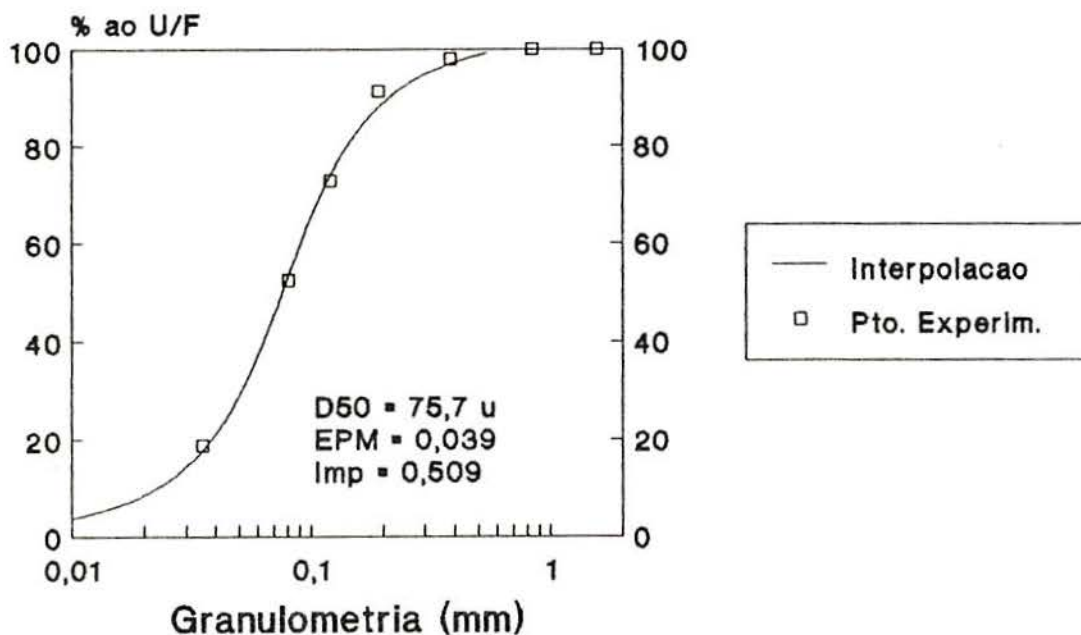


Fig.35 - Curva de Particao do Teste em Circuito Aberto com o Ciclone de Fundo Plano.

Curva de Particao

FP - C. Aberto - Teste 2

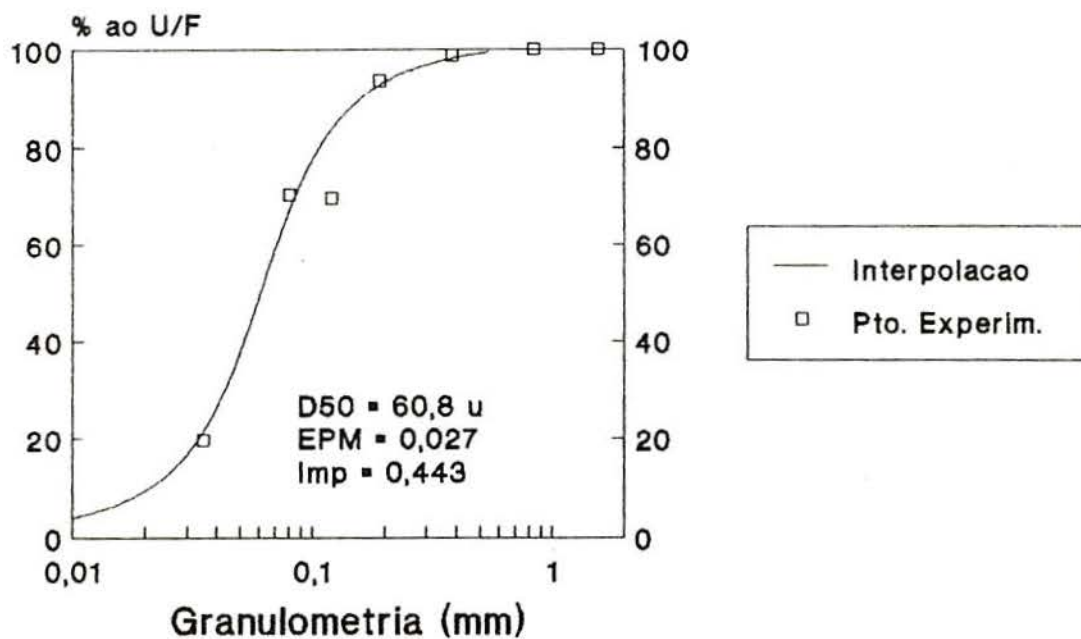


Fig.36 - Curva de Particao do Teste em Circuito Aberto com o Ciclone de Fundo Plano.

Curva de Particao

FP - C. Aberto - Teste 3

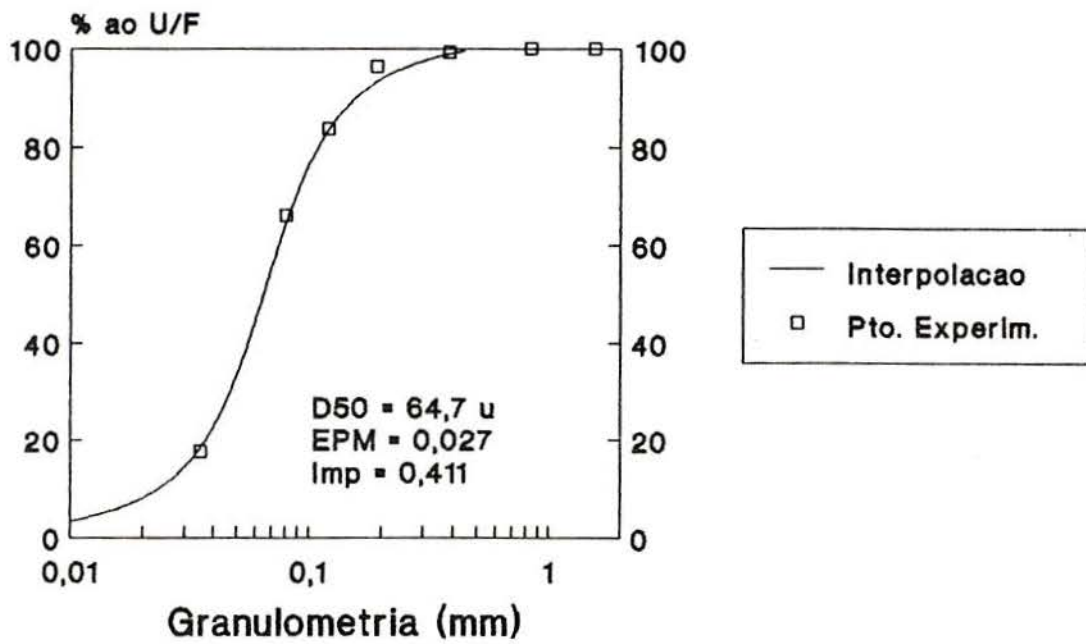


Fig.37 - Curva de Particao do Teste em Circuito Aberto com o Ciclone de Fundo Plano.

CICLONE CONVENCIONAL

Circ. Fech. (-2 +1,19mm)

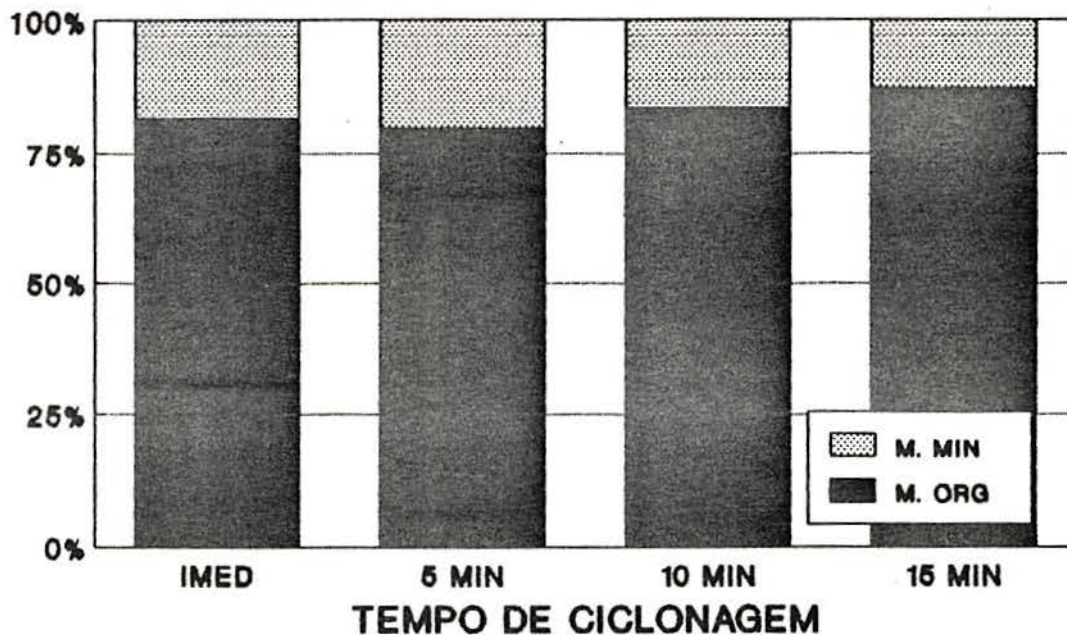


Fig.38 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral por tempo de ciclone na fracao -2 +1,19mm.

CICLONE CONVENCIONAL

Circ. Fech. (-1,19 +0,59mm)

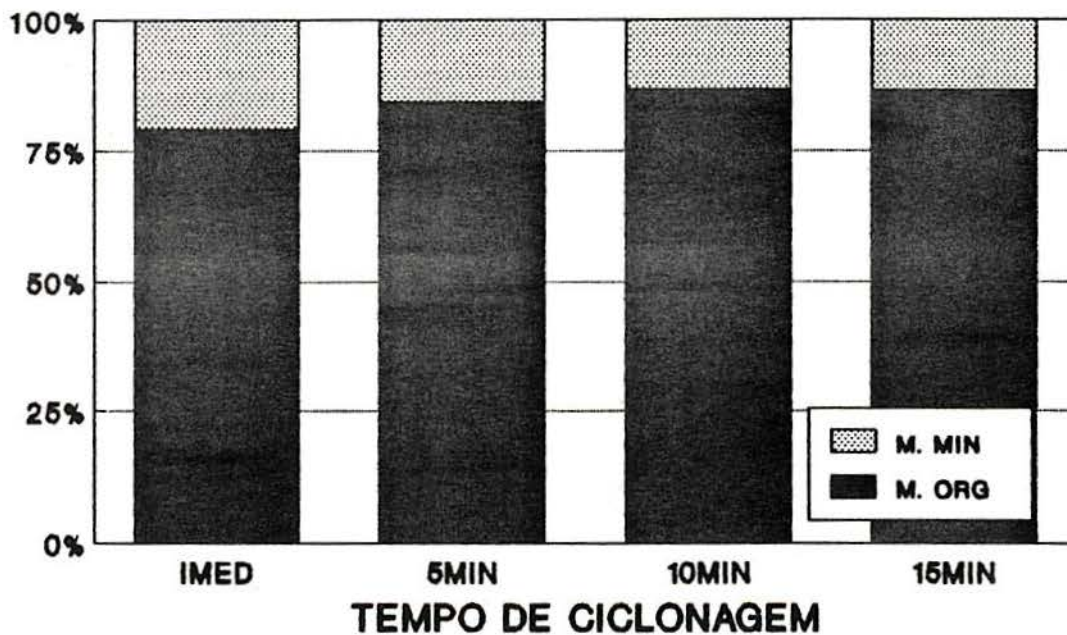


Fig.39 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral por tempo de ciclone na fracao -1,19 +0,59mm.

CICLONE CONVENCIONAL.

Circ. Fech. (-0,59 +0,074mm)

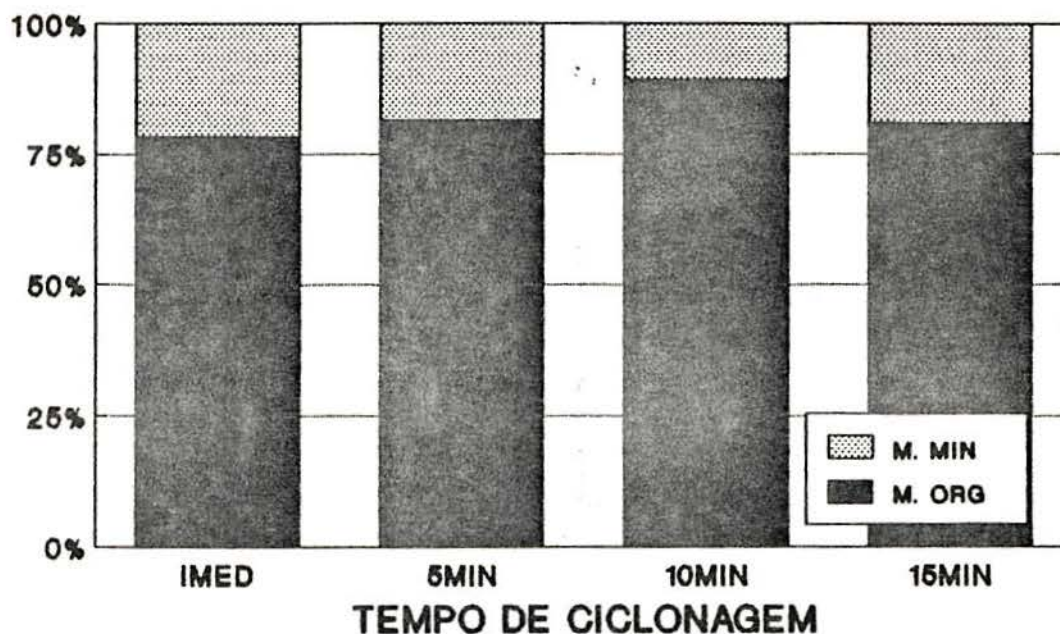


Fig.40 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral por tempo de ciclonaçom na fracao -0,059 +0,074mm.

CICLONE CONVENCIONAL

Circ. Fech. (-0,074mm)

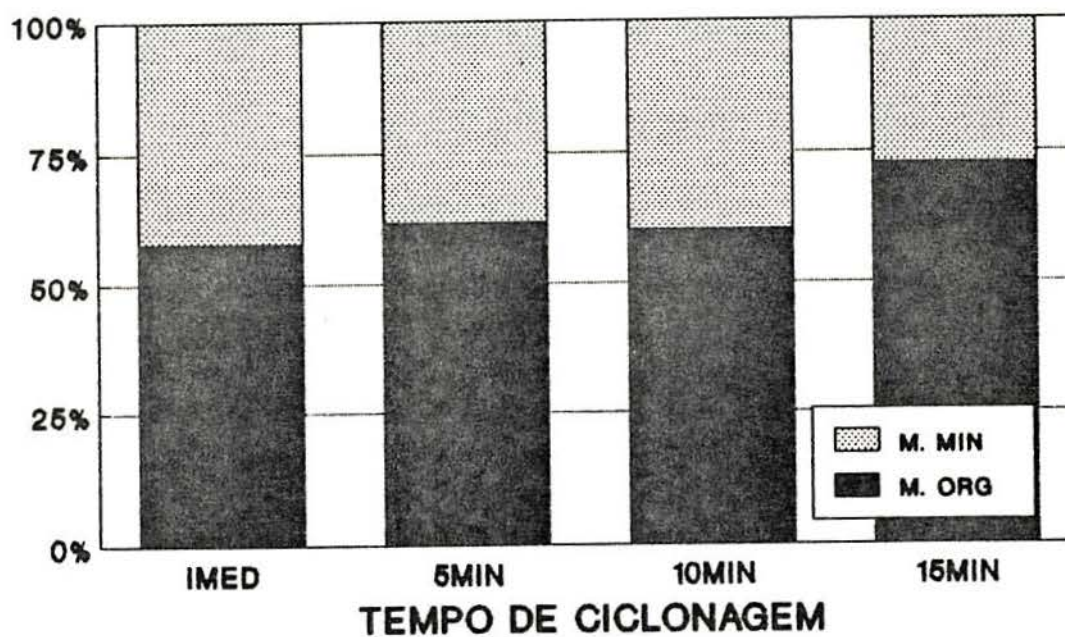


Fig.41 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral por tempo de ciclonaçom na fracao -0,074mm.

CICLONE FUNDO PLANO

Circ. Fech. (-2 +1,19mm)

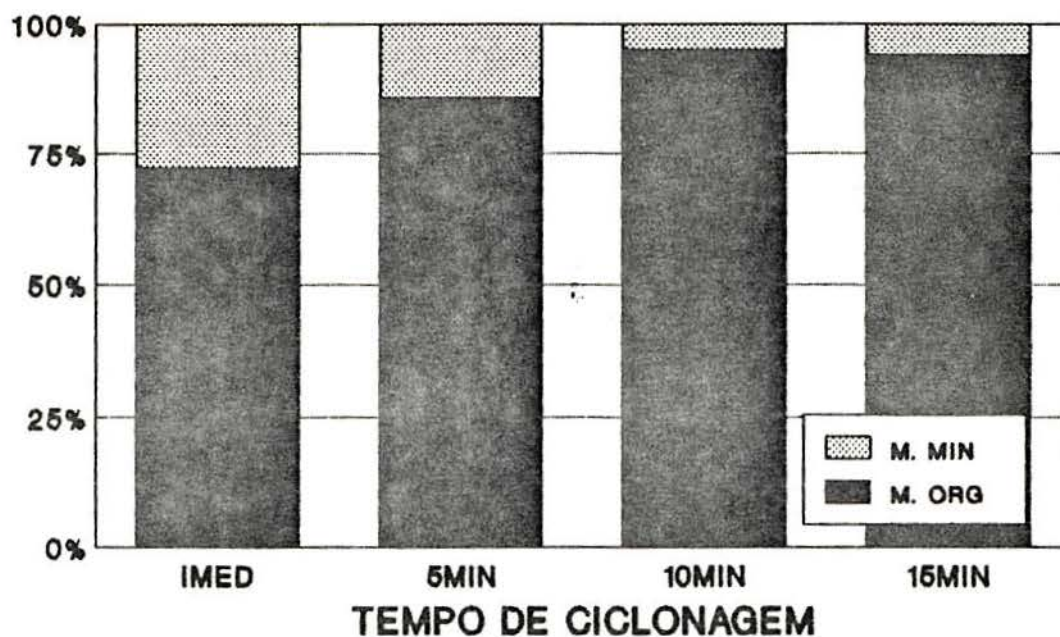


Fig.42 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonação na fração -2 +1,19mm.

CICLONE FUNDO PLANO

Circ. Fech. (-1,19 +0,59mm)

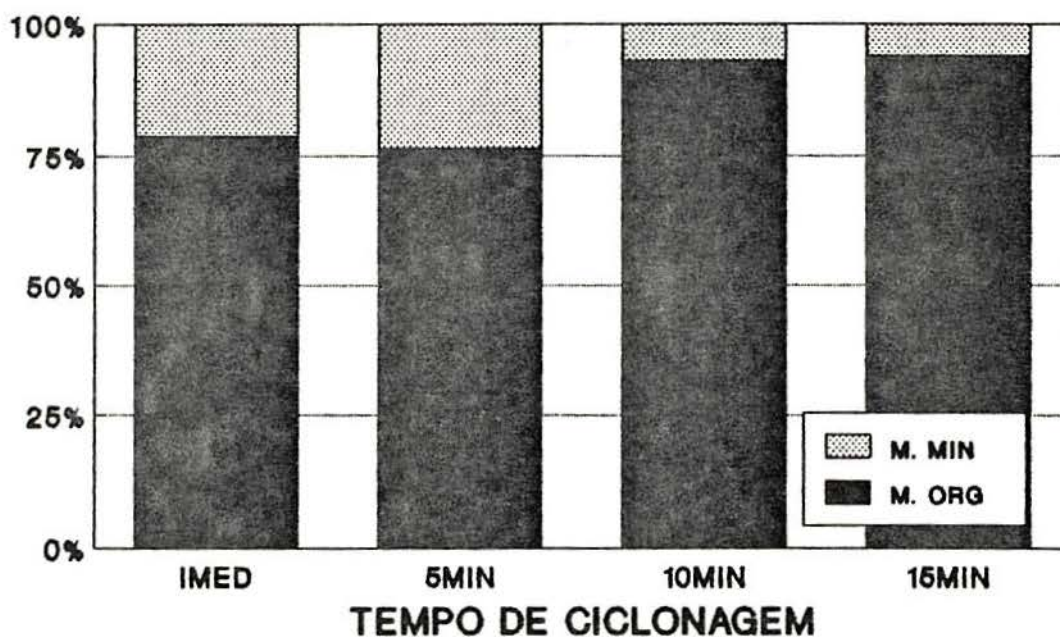


Fig.43 - Histograma com a proporção de matéria orgânica e mineral por tempo de ciclonação na fração -1,19 +0,059mm.

CICLONE FUNDO PLANO

Circ. Fech. (-0,59 +0,074mm)

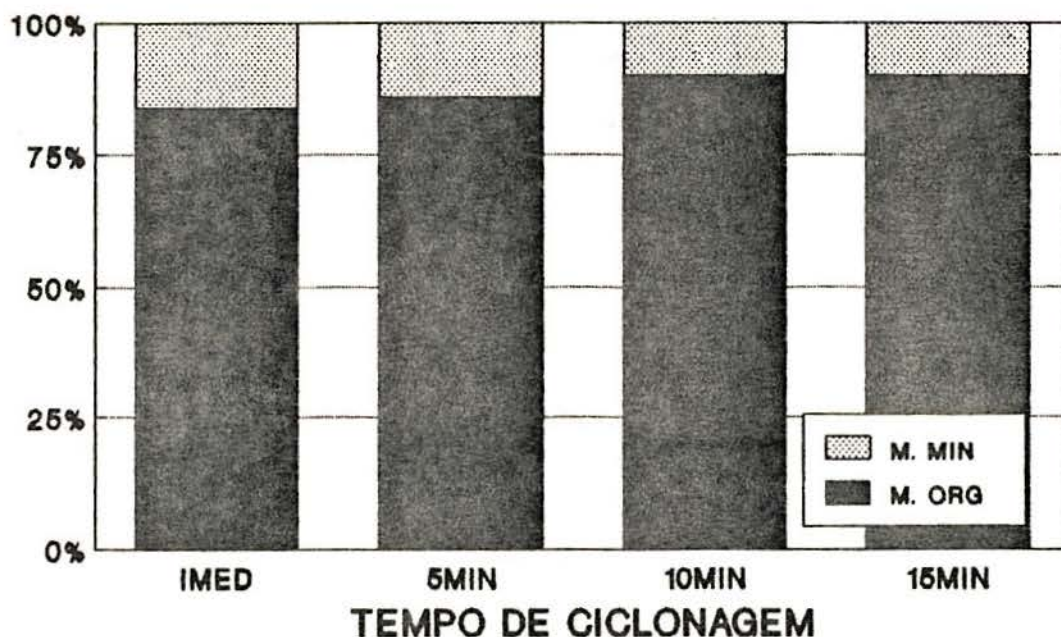


Fig.44 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral por tempo de ciclonaagem na fracao -0,59 +0,074mm.

CICLONE FUNDO PLANO

Circ. Fech. (-0,074mm)

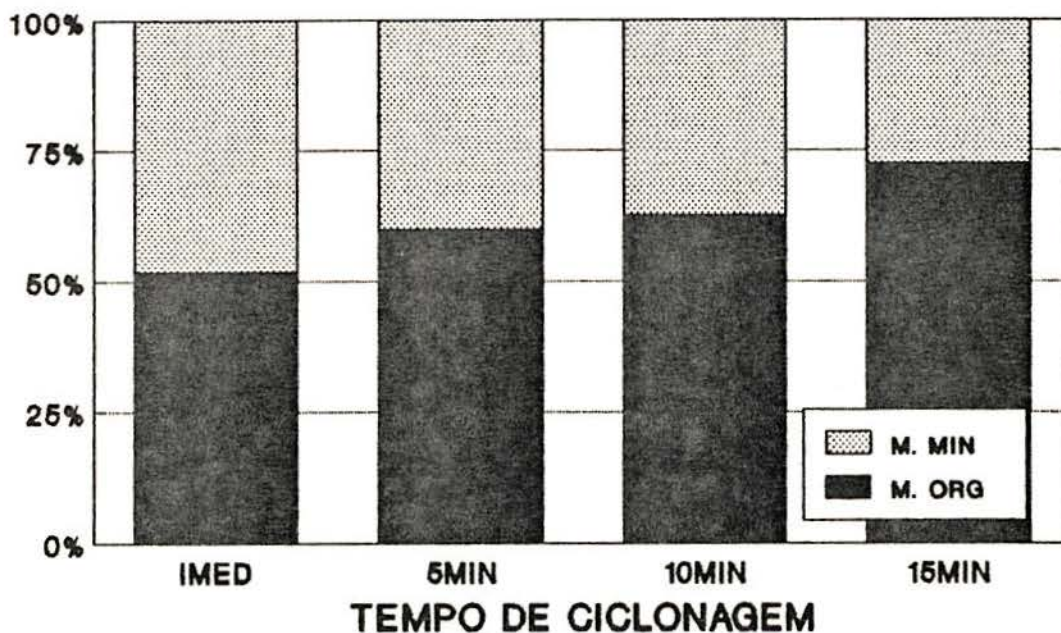


Fig.45 - Histograma com a proporcao de materia organica e mineral por tempo de ciclonaagem na fracao -0,074mm.

TABELA 6: Dados de desempenho do Ciclone Convencional em Circuito Fechado.
CICLONE CONVENCIONAL

	% Sol Alim	Rec.Mass no Prod	% finos U/F rel.aos finos da Alim	By-pass	d50	Imperf.
IMED	11,96	83,9	55,4	13,55	55,5	0,379
5 MIN	8,40	73,8	39,5	14,31	59,7	0,466
10 MIN	7,81	70,6	40,4	15,31	59,5	0,462
15 MIN	7,32	66,3	33,3	13,61	76,0	0,512

TABELA 7: Dados de desempenho do Ciclone de Fundo Plano em circuito fechado.
CICLONE FUNDO PLANO

	% Sol Alim	Rec.Mass no Prod	% finos U/F rel.aos finos da Alim	By-pass	d50	Imperf.
IMED	15,67	45,5	16,3	10,46	--	--
5 MIN	8,64	38,0	7,0	5,39	242,7	--
10 MIN	8,80	49,6	9,0	6,30	128,0	0,823
15 MIN	8,30	57,0	11,9	5,09	93,2	0,440

TABELA 8: Dados de desempenho do Ciclone de Fundo Plano em circuito aberto.
CICLONE FUNDO PLANO

	% Sol Alim	Rec.Mass no Prod	% finos U/F rel.aos finos da Alim	By-pass	d50	Imperf.
TESTE 1	14,78	71,81	29,3	12,98	75,7	0,509
TESTE 2	15,45	77,99	31,6	14,74	60,8	0,443
TESTE 3	14,33	77,84	28,8	13,63	64,7	0,411

TABELA 9: Dados de recuperacao em massa e teores de cinza das fracoes -2 +0,074 e -0,074mm.

CICLONE CONVENCIONAL

	TEOR DE CINZAS			TEOR DE CINZAS				% DE MASSA EM REL. ALIM.			
				-0,074mm		+0,074mm		-0,074mm		+0,074mm	
	Alim	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F
1	46,13	42,80	63,52	66,22	66,60	33,04	41,77	17,55	14,09	66,36	2,00
5'	46,88	40,93	63,61	64,45	66,59	34,94	39,53	15,27	23,35	58,49	2,89
10	48,32	41,47	64,76	66,33	67,15	34,10	42,26	17,79	26,58	52,81	2,82
15	48,69	40,82	64,15	62,16	66,39	34,19	33,99	15,71	31,40	50,56	2,33

TABELA 10: Dados de recuperacao em massa e teores de cinza das fracoes -2 +0,074 e -0,074mm.

CICLONE FUNDO PLANO

	TEOR DE CINZAS			TEOR DE CINZAS				% DE MASSA EM REL. ALIM.			
				-0,074mm		+0,074mm		-0,074mm		+0,074mm	
	Alim	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F
1	42,27	49,43	47,31	65,82	64,43	48,38	41,39	2,73	14,00	42,77	40,50
5	48,23	44,08	50,78	64,11	65,37	42,69	34,18	2,47	33,27	35,00	29,26
10	48,39	43,29	53,38	64,84	64,40	41,72	29,84	3,37	34,34	46,20	16,09
15	49,07	40,60	60,30	65,85	66,56	38,19	26,24	4,96	36,60	52,08	6,36

TABELA 11: Dados de recuperacao em massa e teores de cinza das fracoes -2 +0,074 e -0,074mm.

CICLONE FUNDO PLANO

	TEOR DE CINZAS			TEOR DE CINZAS				% DE MASSA EM REL. ALIM.			
				-0,074mm		+0,074mm		-0,074mm		+0,074mm	
	Alim	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F	U/F	O/F
T 1	49,38	46,51	56,69	67,80	60,60	42,90	24,69	10,41	25,12	61,40	3,07
T 2	--	--	--	--	--	--	--	8,97	19,46	69,02	2,55
T 3	--	--	--	--	--	--	--	8,33	20,56	69,51	1,60

TABELA 15: Contagem dos grupos maceralicos e materia mineral por faixa granulometric para os diversos tempos de ciclonaçem em Ciclone Convencional.

TEMPO	GRANULOMETRIA	GRUPOS MACERALICOS								
		VITRINITA		LIPTINITA		INERTINITA		MINERAIS		No.Pts
		N.PTS	%	N.PTS	%	N.PTS	%	N.PTS	%	TOTAIS
IMED.	-0,074	231	14,4	493	30,8	202	12,6	674	42,1	1600
	-0,149 +0,074	371	31,1	387	32,5	190	15,9	243	20,4	1191
	-0,59 +0,074	762	43,8	276	15,9	324	18,6	377	21,7	1739
	-1,19 +0,059	1241	55,1	223	09,1	319	14,2	469	20,8	2252
	+1,19	694	43,7	286	18,0	316	19,9	292	18,4	1588
5 MIN	-0,074	127	15,4	200	24,3	182	22,1	315	38,2	824
	-0,59 +0,074	796	46,0	227	13,1	388	22,4	319	18,4	1730
	-1,19 +0,59	1354	60,5	271	12,1	261	11,6	354	15,8	2240
	+1,19	834	50,3	232	14,0	258	15,6	333	20,1	1657
10 MIN	-0,074	160	15,7	211	20,7	244	23,9	406	39,8	1021
	-0,59 +0,074	853	53,1	236	14,7	349	21,7	167	10,4	1605
	-1,19 +0,59	1593	62,3	234	09,1	390	15,3	340	13,3	2557
	+1,19	1305	57,7	227	10,0	359	15,9	372	16,4	2263
15 MIN	-0,074	222	22,8	251	25,8	235	24,2	264	27,2	972
	-0,149 +0,074	562	46,7	176	14,6	272	22,6	194	16,1	1204
	-0,59 +0,074	624	45,2	211	15,3	285	20,6	260	18,8	1380
	-1,19 +0,59	1187	47,6	353	14,2	612	24,6	340	13,6	2492
	+1,19	1490	68,9	186	08,6	214	09,9	273	12,6	2163

TABELA 16: Contagem dos grupos maceralicos e materia mineral por faixa granulometrica para os diversos tempos de ciclonaçem em Ciclone Fundo Plano.

TEMPO	GRANULOMETRIA	GRUPOS MACERALICOS								No.Pts
		VITRINITA		LIPTINITA		INERTINITA		MINERAIS		
		N.PTS	%	N.PTS	%	N.PTS	%	N.PTS	%	TOTAIS
IMED.	-0,074	109	15,0	135	18,6	132	18,2	351	48,3	727
	-0,59 +0,074	307	38,6	137	17,2	224	28,1	128	16,1	796
	-1,19 +0,059	352	35,9	157	16,0	263	26,8	208	21,2	980
	+1,19	303	33,3	157	17,2	198	21,8	252	27,7	910
5 MIN	-0,074	135	24,8	86	15,8	105	19,3	219	40,2	545
	-0,59 +0,074	401	48,3	109	13,1	203	24,5	117	14,1	830
	-1,19 +0,59	392	39,4	88	08,8	280	28,1	235	23,6	995
	+1,19	514	55,3	154	16,6	130	14,0	132	14,2	930
10 MIN	-0,074	126	22,4	83	14,8	143	25,4	210	37,4	562
	-0,59 +0,074	340	45,8	123	16,6	204	27,5	75	10,1	742
	-1,19 +0,59	586	61,5	138	14,5	164	17,2	65	06,8	953
	+1,19	673	69,4	156	16,1	92	09,5	49	05,0	970
15 MIN	-0,074	111	25,3	88	20,1	118	26,9	121	27,6	438
	-0,59 +0,074	377	43,6	149	17,2	253	29,2	86	09,9	865
	-1,19 +0,59	498	56,3	177	20,0	156	17,6	53	06,0	884
	+1,19	673	74,7	92	10,2	83	09,2	53	05,9	901

TABELA 17: Contagem dos grupos maceralicos e materia mineral por faixa granulometrica para os produtos do teste em circuito aberto do Ciclone Fundo Plano.

TEMPO	GRANULOMETRIA	GRUPO MACERALICOS								
		VITRINITA		LIPTINITA		INERTINITA		MINERAIS		No.PONTOS CONTADOS
		N.PTS	%	N.PTS	%	N.PTS	%	N.PTS	%	
ALIM.	-0,074	93	7,9	108	9,1	117	9,9	863	73,1	1181
	-0,59 +0,074	478	47,6	152	15,1	215	21,4	159	15,8	1004
	-1,19 +0,59	774	48,3	239	14,9	272	17,0	316	19,7	1601
	+1,19	652	43,4	203	13,5	243	16,2	403	26,8	1501
U/F1	-0,074	132	13,7	146	15,2	133	13,8	549	57,2	960
	-0,59 +0,074	622	52,1	182	15,2	206	17,3	183	15,3	1193
	-1,19 +0,59	783	50,2	256	16,4	271	17,4	249	16,0	1559
	+1,19	706	44,7	166	10,5	307	19,4	400	25,3	1579
O/F1	-0,074	143	20,5	46	6,6	128	18,3	381	54,6	698
	-0,59 +0,074	520	80,1	44	6,8	52	8,0	33	5,1	649

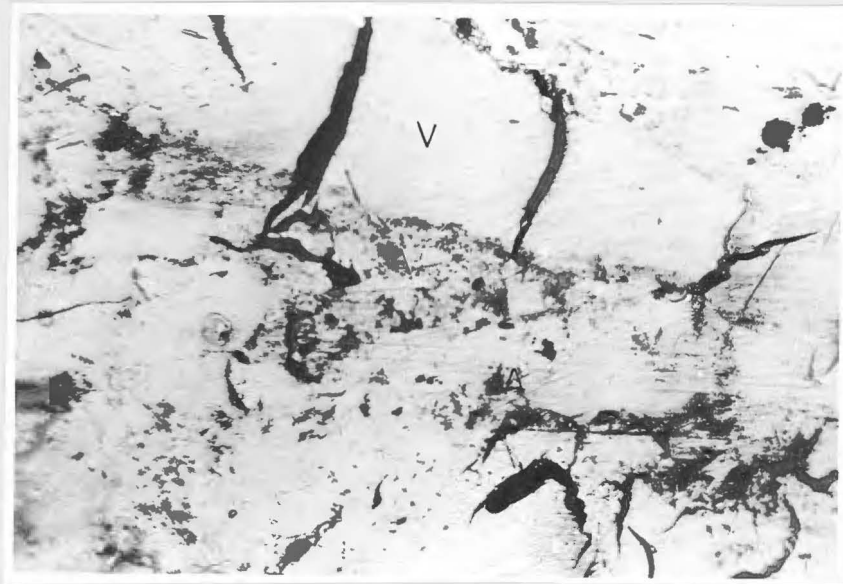


Foto 1 - Ciclone Convencional, fração $-1,19+0,59$ mm, tempo de ciclonação: imediato, vitrinite (V) com impregnações de argila (A).



Foto 2 - Ciclone Convencional, fração $-1,19+0,59$ mm, tempo de ciclonação: 15 minutos, grão de vitrinite (V) praticamente isenta de impregnações de argila.

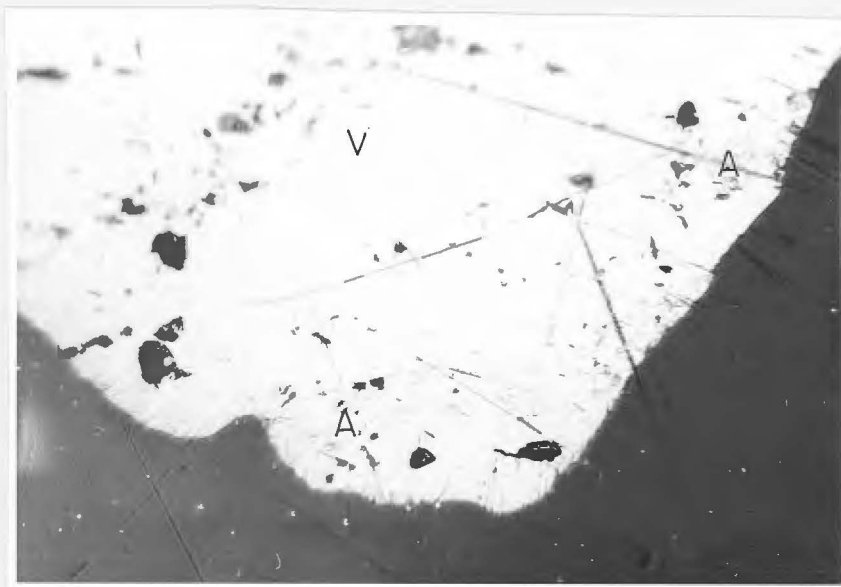


Foto 3 - Ciclone de Fundo Plano, fração -2+1,19 mm, tempo de ciclonação: imediato, vitrinite (V) com fissuras e impregnações de argila (A).

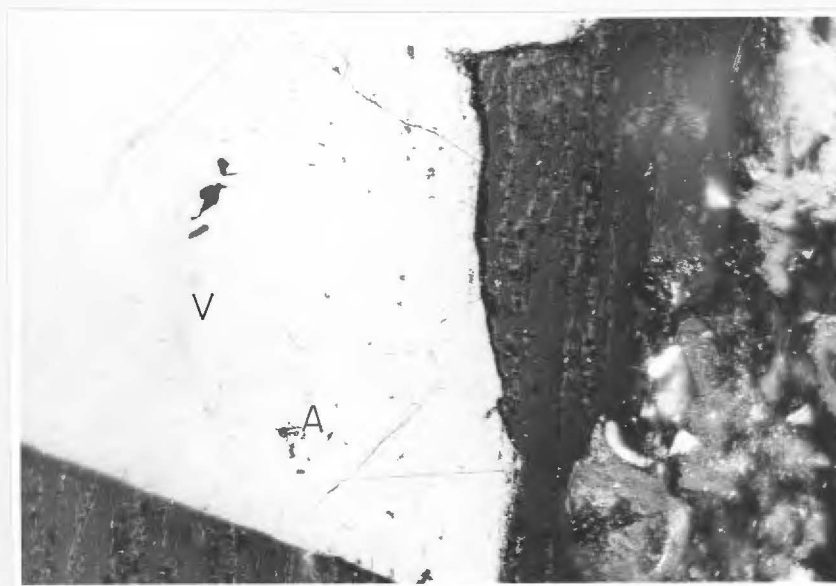


Foto 4 - Ciclone Fundo Plano, fração -2+1,19 mm, tempo de ciclonação: 15 minutos, vitrinite (V) com fissuras e raros grãos de argila (A).

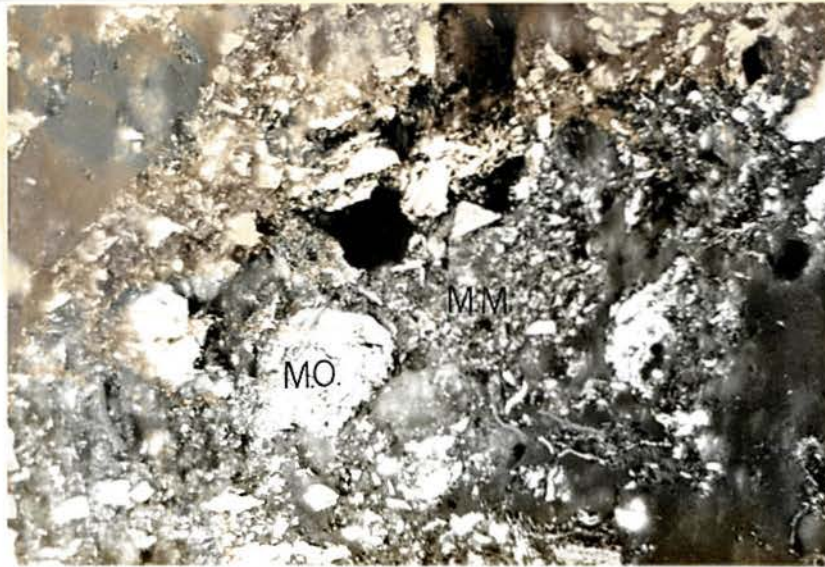


Foto 5 - Ciclone de Fundo Plano, fração $-0,074$ mm, tempo de ciclonagem: imediato, aglomeração de matéria orgânica e matéria mineral.

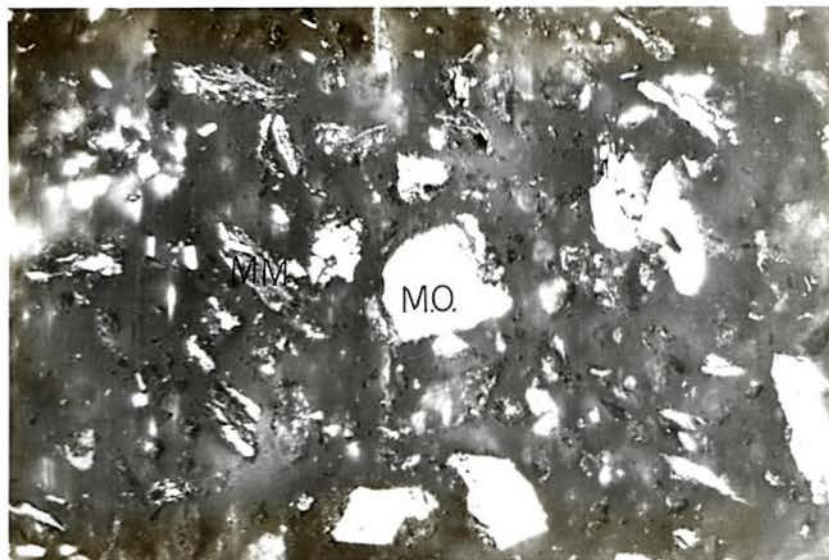


Foto 6 - Ciclone de Fundo Plano, fração $-0,074$ mm, tempo de ciclonagem: 15 minutos, é mostrada a separação física entre matéria orgânica (MO) e matéria mineral (MM).



Foto 7 - Ciclone Convencional, fração -2+1,19 mm, tempo de ciclonação: 15 minutos, vitrinite (V) mostrando o padrão de quebra (cúbico).



Foto 8 - Ciclone Convencional, fração -2+1, 19 mm, tempo de ciclonação: imediato, grão de vitrineta mostrando o padrão forma (misto).



Foto 9 - Ciclone Convencional, fração -2+1, 19 mm, tempo de ciclonação: 15 minutos, grão de vitrineta mostrando o padrão forma (anguloso).



Foto 10 - Ciclone de Fundo Plano, fração -2+1,19 mm, tempo de ciclonagem: imediato, grão de vitrinite (V) com impregnações de argila (A), mostrando o processo de quebra, com mudança no padrão, de misto a angular.



Foto 11 - Ciclone de Fundo Plano, fração -2+1,19 mm, tempo de ciclonagem: imediato, grão de vitrinite (V) mostrando o padrão-forma (angular com bordas arredondadas).

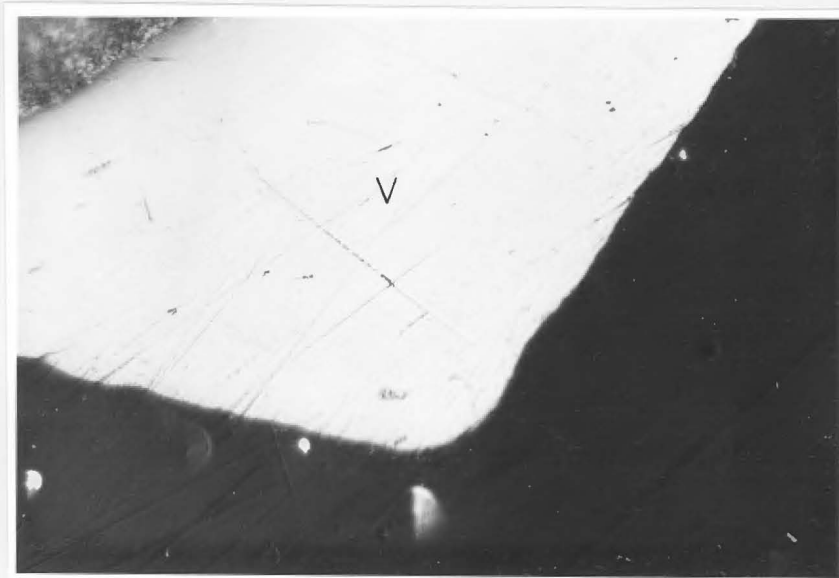


Foto 12 - Ciclone de Fundo Plano, fração $-2+1,19$ mm, tempo de ciclonação: imediato, grão de vitrinite (V) mostrando o padrão-forma (angular com bordas arredondadas).