

CURSO DE CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS
U.F.M.G./C.N.E.N.

PREVISÃO DE GRANULOMETRIA NA OPERAÇÃO DE MOAGEM CONTÍNUA
COM O EMPREGO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS.

POR

OSÉ OLYMPIO NARDELLI MONTEIRO DE CASTRO.

TESE APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO GRÁU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
E TÉCNICAS NUCLEARES PELA UNIVERSIDA
DE FEDERAL DE MINAS GERAIS.

1971

AGRADECIMENTOS.

O autor desta tese deseja expressar seus sinceros agradecimentos a seu orientador Dr. OMAR CAMPOS FERREIRA, bem como ao Dr. ROBIN P. GARDNER e ao Dr. RICHARD FELDER, ambos da Universidade da Carolina do Norte, USA, pelas su gestões e orientação prestadas. Além disso, agradece a todos os funcionários da Divisão de Radioisótopos do IPR, especialmente a FÁBIO ANTÔNIO DA SILVA, pelo auxílio na execução da parte experimental e a LÊDA MARIA JÚLIA DE CARVALHO, pelo serviço de datilografia.

Outras entidades cuja colaboração, essencial para a execução desta tese, agradecemos, foram a Seção de Ap relhos de Irradiação da Divisão de Reatores do IPR, os Centros de Computação da Escola de Engenharia e da Univer sidade Federal de Minas Gerais e a Cia. Vale do Rio Doce.

ÍNDICE

C.

1. INTRODUÇÃO

1.1.	Apresentação geral do problema	1
1.2.	Origem e importância do estudo	2
1.3.	Estudos relacionados	
1.3.1.	Epstein	4
1.3.2.	Broadbent e Callcott	5
1.3.3.	Gardner e Austin	6
1.3.4.	Reid	13
1.3.5.	Kelsall e Reid	22
1.4.	Objetivo do presente estudo	23
1.5.	Definições	23

2. EQUIPAMENTO E TÉCNICA EXPERIMENTAL

2.1.	Aparelhagem e material empregados	
2.1.1.	Equipamento de moagem	26
2.1.2.	Equipamento de peneiramento	27
2.1.3.	Equipamento de contagem	27
2.1.4.	Material estudado	28
2.2.	Processo de determinação das funções básicas e da distribuição granulométrica em estado estacionário	
2.2.1.	Considerações preliminares	30
2.2.2.	Determinação da função de seleção	32
2.2.3.	Determinação da função de quebramento	34
2.2.4.	Esquema de determinação das funções de seleção e quebramento	36

	D.
2.2.5. Determinação da granulometria de estado estacionário	38
2.3. Técnica experimental	
2.3.1. Preparação do material	44
2.3.2. Irradiação do material	44
2.3.3. Injeção do traçador	
2.3.3.1. Moagem contínua	46
2.3.3.2. Moagem descontínua	47
2.3.4. Moagem	
2.3.4.2. Moagem contínua	47
2.3.4.2. Moagem em batelada	49
2.3.5. Amostragem	
2.3.5.1. Regime contínuo	49
2.3.5.2. Moagem em batelada	50
2.3.6. Análise granulométrica	50
2.3.6.1. Peneiramento a seco, moagem em regime contínuo	51
2.3.6.2. Peneiramento a úmido, moagem em batelada	52
2.3.7. Determinação de atividades específicas	
2.3.7.1. Amostras provenientes de análise granulométrica	52
2.3.7.2. Amostras colhidas para a determinação da distribuição de tempos de permanência	53

	E.
2.4. Programa de computador	
2.4.1. Considerações preliminares	53
2.4.2. Descrição do programa básico e diagrama de blocos (simplificado)	54
2.4.3. Processo de cálculo inverso das funções de seleção	65
2.5. Configurações estudadas	
2.5.1. Configurações preliminares	67
2.5.2. Configurações estudadas	
2.5.2.1. Moínho de bolas com uma câmara	68
2.5.2.2. Moínho de bolas com duas câmaras	69
2.5.2.3. Moínho de barras com uma câmara	70
2.5.3. Parâmetros mantidos constantes	71
2.5.4. Experiências complementares	71
3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	
3.1. Considerações preliminares	72
3.2. Métodos empregados na análise dos resultados experimentais	72
3.3. Apresentação dos resultados experimentais	74
3.4. Discussão dos resultados	85

F.

4.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	
4.1.	Conclusões	96
4.2.	Trabalhos futuros	97
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE I. Programa de computador	102
	APÊNDICE II. Dados experimentais	114
	APÊNDICE III. Modelo dos tanques-em-série aplicado ao estudo da <u>moa</u> gem em regime contínuo	169

1. INTRODUÇÃO.

1.1. APRESENTAÇÃO GERAL DO PROBLEMA.

A operação unitária de moagem, largamente utilizada pela indústria há muitos séculos, começou a ser estudada teoricamente por volta de 1870 mas, até 1940, não se observou nenhum progresso marcante no desenvolvimento, para ela, de uma base teórica.

A crescente importância tecnológica desta operação levou muitos pesquisadores ao seu estudo, (1) tendo sido obtidos resultados bastante animadores. Ainda hoje, entretanto, o projeto, operação e a previsão do desempenho das instalações de moagem é uma arte, baseada principalmente em relações empíricas, derivadas a partir de dados colhidos na prática industrial.

O lento desenvolvimento de uma teoria para a operação de moagem decorreu principalmente:

- a) - da complexidade dos fenômenos ocorridos no interior dos moinhos,
- b) - da dificuldade de acompanhar experimentalmente o que ocorre a uma partícula (ou grupo de partículas) durante o processo de moagem e
- c) - da forma matemática das equações diferenciais envolvidas, que são em casos muito particulares (não encontrados na prática) apresentam uma solução analítica.

A teoria sobre a operação de moagem, em seu estado atual, conduziu a uma equação de balanço de massas baseada em parâmetros mensuráveis experimentalmente. Esta equação pode ser resolvida com relativa facilidade por um

computador digital. A determinação experimental dos parâmetros mencionados acima requer sempre, em última análise, o emprego de um traçador; o traçador radioativo, leva em geral, uma nítida vantagem sobre os traçadores convencionais.

Espera-se que o desenvolvimento da teoria sobre a operação de moagem permita a otimização do projeto, operação e controle das instalações de moagem. Em seu estado atual, ela permite prever, com precisão razoável, a distribuição granulométrica do material moído em aparelhos e configurações para os quais se tenham determinado os parâmetros mencionados acima.

O objetivo do presente trabalho é estabelecer a técnica experimental para a determinação destes parâmetros e sua aplicação para o estudo da operação de moagem em um moinho rotativo, operando em regime contínuo, em escala de laboratório.

1.2. ORIGEM E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO.

Duas teorias, propostas no século passado, deram origem a muitos estudos e geraram uma grande controvérsia entre seus autores. Em 1867 von Rittinger (2) propôs uma lei segundo a qual a quantidade de energia necessária para quebrar um sólido é diretamente proporcional ao incremento de área superficial produzido. Em 1883, Kick (3,4) propôs uma outra lei pela qual, para reduções de tamanho geometricamente semelhantes, a energia consumida por unidade de volume é constante. Estas duas leis são basicamente conflitantes. Em 1952 Bond (5) formulou uma lei intermediária entre as duas citadas acima. Segundo Bond, a energia total a ser fornecida para um dado proces

so de moagem é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho das partículas do produto. Hoje em dia a opinião geral é que nenhuma destas "leis de energia" é uma lei no sentido estrito do termo. Todas elas são concordam com os dados experimentais em casos muito específicos e, mesmo assim, somente quando as variáveis se encontram dentro de intervalos relativamente limitados. Além disto, estas "leis" falham por não permitir uma correlação entre as características físicas do sistema de moagem e o produto moído e, portanto, uma otimização do sistema. Acredita-se atualmente que a operação de moagem é muito complicada para poder ser descrita por apenas um parâmetro e ainda, que a energia fornecida a um moinho é um parâmetro bastante inadequado para a previsão das dimensões do produto (e vice-versa) pois apenas uma pequena parte dela é efetivamente utilizada para o quebramento das partículas. A maior parte da energia fornecida é dissipada sob a forma de calor.

Uma outra maneira de encarar o problema foi a proposta por Griffith (6) que estudou o processo de fratura de materiais levando em consideração a existência de falhas microscópicas em sua estrutura. Esta teoria tem merecido grande atenção nos últimos 30 anos e, em seu estágio atual, é de grande utilidade para as indústrias metalúrgica e cerâmica. Entretanto, do ponto de vista da operação de moagem, a teoria é ainda incompleta devido, principalmente, à dificuldade em se determinar que forças atuam sobre as partículas no interior dos moinhos. Muito esforço deverá ser ainda empregado no estudo de fraturas para que esta teoria possa ser aplicada ao caso prático da operação unitária da moagem.

Tendo em vista o exposto acima entende-se porque se tentou uma nova teoria para a descrição do processo de moagem. A importância de uma teoria que realmente descreva este processo decorre do fato de que, se esta teoria levar a generalizações que possam ser correlacionadas com as propriedades físicas e químicas do material moído e com a configuração do sistema de moagem, o projeto, operação e controle destes sistemas poderão ser feitos de uma maneira rigorosamente científica com vistas à otimização do sistema. Algumas das tentativas feitas para a formulação desta teoria serão descritas abaixo.

1.3. ESTUDOS RELACIONADOS.

1.3.1. EPSTEIN.

Epstein (7) deu origem a um considerável avanço no desenvolvimento da teoria da operação de moagem ao propor que qualquer processo de quebramento pode ser considerado como tendo ocorrido em estágios sucessivos e que cada um destes estágios é perfeitamente definido por duas funções.

A primeira destas funções, denominada função de seleção e que representaremos por $S(x)$, foi definida como a fração em peso da quantidade de material de tamanho x que é quebrada em cada um dos estágios mencionados.

A segunda função denominada função de quebramento e que representaremos por $B(y,x)$, foi definida como a fração em peso do produto de moagem de dimensão menor que y , produzido a partir do material de dimensão original x .

Epstein não mediu experimentalmente estas funções. Apesar disto testou sua teoria a partir de valores arbitrados para $S(x)$ e $B(y,x)$ tendo chegado a uma distribuição

buição granulométrica do tipo log-normal (ou seja, encontra-se uma linha reta quando são lançados em papel de probabilidades a porcentagem em peso acumulado até a dimensão x versus o logaritmo neperiano de x).

Como este tipo de distribuição granulométrica é frequentemente encontrado na prática industrial a teoria de Epstein foi considerada muito promissora e os esforços dos pesquisadores passaram a se concentrar na determinação experimental das funções de seleção e quebramento para, a partir destes valores, tentar reproduzir as curvas de distribuição granulométrica reais.

1.3.2. BROADBENT E CALLCOTT.

Broadbent e Callcott (8) aceitaram como corretas as hipóteses de Epstein e formularam a hipótese adicional de que a função de quebramento (para qualquer sistema de moagem, material e distribuição granulométrica envolvidas) poderia ser expressa por:

$$B(y, x) = \frac{1 - e^{-y/x}}{1 - e^{-1}}$$

onde x é a dimensão linear original da partícula considerada e y é a dimensão linear do produto de moagem.

A partir destas hipóteses e de distribuições granulométricas determinadas experimentalmente aplicaram um processo de cálculo inverso para a determinação da função de seleção.

Sem deixar de reconhecer o mérito do tratamento matemático desenvolvido deve-se notar que não existe ne

ninguma razão teórica ou evidência experimental que justifique a hipótese formulada acerca da função de quebramento. Portanto, os valores calculados das funções de seleção se não são válidos na medida em que for válida a hipótese sobre a função de quebramento.

1.3.3. GARDNER E AUSTIN.

Gardner e Austin (9) deram contribuições decisivas para a formulação matemática e para a aplicação prática do modelo de operação de moagem.

A primeira destas contribuições foi introduzir equações de balanço de população contínuas no tempo. Estas equações foram estabelecidas a partir dos trabalhos de Epstein (7) e de Sedlatschek e Bass (10).

Epstein, como já foi dito, estudou o processo de moagem como uma sucessão de eventos discretos de quebramento, não tendo chegado a relacionar estes eventos com a variável tempo. Sedlatschek e Bass introduziram equações de balanço de população mas não chegaram a empregar os conceitos de função de quebramento e de seleção. O primeiro mérito de Gardner e Austin foi, portanto, o de reunir estes dois trabalhos em um todo lógico e sob uma forma matemática rigorosa.

A segunda importante contribuição foi o uso de traçadores radioativos para a determinação experimental das funções de seleção e quebramento demonstrando de forma inequívoca a utilidade dos traçadores radioativos no estudo de operação de moagem (anteriormente Gaudin (11) havia usado traçadores radioativos em estudos de moagem mas apenas para a observação do comportamento de várias frações granulométricas).

Gardner e Austin definiram a função de seleção do seguinte modo:

A função de seleção, $S(x)$, é a fração de peso das partículas de dimensão x que é quebrada por unidade de tempo de moagem.

Seja $P(x, t)$ a fração de peso do material com di mensão menor que x existente após o tempo de moagem t .

A fração de peso existente no intervalo x e $x+dx$, após o tempo de moagem t é:

$$w_x(t) = \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} dx \quad (1.3.3-1)$$

Desta fração desaparece por quebramento entre t e $t+dt$ a quantidade

$$dw_x(t) = - \left[\frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x \partial t} \right] dx dt \quad (1.3.3-2)$$

e, segundo a definição de $S(x)$ temos:

$$S(x) = - \frac{\frac{dw_x(t)}{dt}}{w_x(t)} = - \frac{\frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x \partial t}}{\frac{\partial P(x, t)}{\partial x}} \quad (1.3.3-3)$$

A equação (1.2.3-3), contínua em x e t e defini da em termos de tempo real pode ser aplicada ao tamanho

superior da distribuição granulométrica. Para os tamanhos inferiores torna-se necessário o uso da função de quebramento pois, ao mesmo tempo em que desaparece material destes tamanhos por quebramento, mais material é produzido pelo quebramento dos tamanhos superiores.

A função de quebramento, que a partir de agora tem como notação $B(y/x)$ (por razões que veremos posteriormente), é definida como a fração de material de dimensão x que, por quebramento primário, passa a ter dimensão menor que y . (Por quebramento primário entende-se a situação em que o produto de um evento de fratura não sofre quebramentos posteriores).

Levando em consideração o tamanho superior da distribuição granulométrica,

$$dw_x(t) = - \left(\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x \partial t} dx dt \right) \quad (1.3.3-4)$$

representa a quantidade de material existente entre x e $x+dx$ que foi quebrada durante o intervalo de tempo t e $t+dt$.

Supondo não existir inicialmente material entre x e y (condição que deverá ser satisfeita experimentalmente), o que significa que o incremento da fração de material menor que y foi causado por quebramento do material de dimensões entre x e $x+dx$, e tendo em vista a definição de função de quebramento obtemos:

$$B(y/x) = \frac{\left(\frac{\partial P(y,t)}{\partial t} \right) dt}{\left(\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x \partial t} \right) dx dt} \quad (1.3.3-5)$$

ou,

$$B(y/x) = - \frac{\frac{\partial P(y,t)}{\partial t}}{\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x \partial t}} dx \quad (1.3.3-6)$$

Abraamos aqui um rápido parêntese para notar que duas restrições importantes foram feitas até o momento: a primeira é que só podemos obter diretamente a função de seleção das partículas de maior dimensão da distribuição granulométrica; a segunda é que, para se determinar $B(y/x)$ é necessária a não existência, inicialmente, de material entre x e y .

É óbvio que estas duas restrições podem ser vencidas experimentalmente por métodos convencionais (por exemplo, eliminando-se todas as partículas de dimensão superior à das partículas cuja função de seleção queremos determinar).

Este tipo de técnica, entretanto, causa alterações no ambiente de moagem que podem vir a interferir nos resultados obtidos.

É exatamente para vencer estas restrições que o emprêgo do traçador radioativo é extremamente vantajoso e, a rigor, indispensável: tornando-se radioativas as par

$$B(y/x) = \frac{\left(\frac{\partial P(y,t)}{\partial t} \right) dt}{\left(\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x \partial t} \right) dx dt} \quad (1.3.3-5)$$

ou,

$$B(y/x) = - \frac{\frac{\partial P(y,t)}{\partial t}}{\frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x \partial t}} dx \quad (1.3.3-6)$$

Abraamos aqui um rápido parêntese para notar que duas restrições importantes foram feitas até o momento: a primeira é que só podemos obter diretamente a função de seleção das partículas de maior dimensão da distribuição granulométrica; a segunda é que, para se determinar $B(y/x)$ é necessária a não existência, inicialmente, de material entre x e y .

É óbvio que estas duas restrições podem ser vencidas experimentalmente por métodos convencionais (por exemplo, eliminando-se todas as partículas de dimensão superior à das partículas cuja função de seleção queremos determinar).

Este tipo de técnica, entretanto, causa alterações no ambiente de moagem que podem vir a interferir nos resultados obtidos.

É exatamente para vencer estas restrições que o emprêgo do traçador radioativo é extremamente vantajoso e, a rigor, indispensável: tornando-se radioativas as par

tículas (de uma dada dimensão) que queremos estudar nós "eliminamos" todas as partículas de dimensões superiores (e determinamos a função de seleção com facilidade) e todas as partículas inicialmente presentes entre x (dimensão marcada) e y (dimensão qualquer) de modo a obter a função de quebramento. E o ambiente de moagem permanece inalterado.

Uma vez definidas rigorosamente as funções de seleção e quebramento e estabelecido um método experimental para determiná-las Gardner e Austin estabeleceram uma equação de balanço de massas aplicável a qualquer dimensão y :

$$P(y, t) = \left[\begin{array}{l} \text{fração de material} \\ \text{de dimensão menor} \\ \text{que } y \text{ presente em} \\ t = 0. \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{fração de material} \\ \text{produzido pela quebra} \\ \text{de material} \\ \text{maior que } y \text{ entre} \\ t = 0 \text{ e } t = t. \end{array} \right] \quad (1.3.3-7)$$

Seja $P(y, 0)$ a distribuição granulométrica inicial do material sendo submetido à moagem. Consideremos um intervalo $(x, x+dx)$ tal que $y < x < x_m$ (x_m é a dimensão das maiores partículas do material em estudo).

A fração de peso do material neste intervalo $(x, x+dx)$ é

$$w_x(t) = \left(\frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \right) dx \quad (1.3.3-8)$$

Da definição da função de seleção

$$S(x) = \frac{\frac{dw_x(t)}{dt}}{w_x(t)} \quad \text{temos}$$

$$dw_x(t) = w_x(t) S(x) dt$$

e levando em conta o valor de $w_x(t)$ da equação (1.3.3-8) temos

$$dw_x(t) = \left[\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \right] S(x) dx dt \quad (1.3.3-9)$$

Pela definição de função de quebramento a fração de $dw_x(t)$ que é moída e cai abaixo de y é $B(y/x) dw_x(t)$.

Portanto:

$$\begin{array}{l} \text{fração de material} \\ \text{proveniente do in} \\ \text{tervalo } (x, x+dx) \\ \text{que é moída e atin} \\ \text{ge dimensão menor} \\ \text{que } y. \end{array} = \left[\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \right] S(x) B(y/x) dx dt \quad (1.3.3-10)$$

Logo, a fração de material com dimensão inferior a y , proveniente do material de dimensões superiores a y é:

$$\int_0^t \int_y^{x_m} \left(\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \right) S(x) B(y/x) dx dt$$

Este resultado levado à equação (1.3.3-7) fornece a equação de balanço de massas de Gardner e Austin:

$$P(y,t) = P(y,0) + \int_0^t \int_y^{x_m} \left(\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \right) S(x) B(y/x) dx dt \quad (1.3.3-11)$$

A equação integro-diferencial parcial (1.3.3-11), que é o modelo matemático da operação de moagem em batelada, é uma equação de Volterra de segunda espécie e somente admite solução analítica para casos em que $S(x)$ e $B(y/x)$ se apresentam sob formas funcionais bastante simples e independentes do tempo. Gardner e Austin desenvolveram uma solução da equação (1.3.3-11) baseada em uma aproximação por diferenças finitas adequada ao emprego de computador digital.

Usando este modelo matemático Gardner e Austin estudaram exaustivamente a moagem de três tipos de carvão em um moinho Hardgrove, tendo obtido excelente concordância entre as curvas granulométricas reais e previstas pelo modelo até um grau de moagem tal que 20% da carga moída estivesse abaixo de 200 mesh.

Duas importantes observações decorreram deste es tudo: Gardner e Austin observaram que as funções de seleção e quebramento são independentes do tempo e da distri

buição granulométrica e que a função de quebramento é uma função normalizável, ou seja, é função da relação y/x (e esta é a razão da notação $B(y/x)$ que estamos usando).

Estas observações, confirmadas por outros pesquisadores trabalhando em diversas configurações de moagem e com diversos materiais, proporcionam considerável economia de trabalho experimental e tornaram ainda mais atraente a teoria proposta por Gardner e Austin. Entretanto, à luz da teoria disponível até o momento sobre a operação de moagem, nada permite generalizar estas observações para qualquer configuração e material usado: elas devem ser consideradas hipóteses de trabalho e confirmadas experimentalmente. Voltaremos a este assunto na discussão dos resultados.

A equação básica de Gardner e Austin é contínua nos eixos do tamanho e do tempo. A solução por diferenças finitas empregada não fornece uma solução contínua no tempo o que é particularmente importante para a aplicação do mesmo modelo ao estudo da moagem contínua. Um outro problema apresentado pela solução de Gardner e Austin é o fato de que as funções de seleção e quebramento devem ser determinadas a partir de dados colhidos em peneiramento e os intervalos de peneiras reais não podem, em absoluto, ser considerados intervalos diferenciais. Para vencer esta dificuldade os autores citados estabeleceram vários métodos de correção e os aplicavam sistematicamente em seus trabalhos.

1.3.4. REID.

A mais importante contribuição ao estudo fenomenológico da operação de moagem após a de Gardner e Austin

foi a de Reid (12) que, aceitando a equação de balanço de massas desenvolvida pelos autores citados, redefiniu a função de quebramento e desenvolveu uma solução da equação 1.3.3-11, contínua no tempo e discretizada no eixo do tamanho, particularmente interessante tanto no caso da moagem em batelada (pois elimina a necessidade de correções) quanto no caso da moagem contínua pois é contínua no eixo dos tempos.

Foi o seguinte o caminho seguido por Reid para a solução da equação 1.3.3-11:

Diferenciando esta equação parcialmente em relação a t temos:

$$\frac{\partial P(y,t)}{\partial t} = \int_y^{x_m} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} S(x) B(y/x) dx \quad (1.3.4-1)$$

Diferenciando parcialmente em relação a y temos:

$$\frac{\partial^2 P(y,t)}{\partial y \partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \int_y^{x_m} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} S(x) B(y/x) dx$$

e aplicando a regra de Leibnitz:

$$\frac{\partial^2 P(y,t)}{\partial y \partial t} = \left[\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \right]_{x=x_m} S(x_m) B(y/x_m) \frac{\partial x_m}{\partial y} -$$

$$\frac{\partial P(y,t)}{\partial y} S(y) B(y/y) \frac{\partial y}{\partial y} + \int_y^{x_m} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \cdot S(x) \cdot B(y/x) \right\} dx$$

(1.3.4-2)

Observando que $B(y/y) = 1$ (todo material de tamanho y que se quebra cai em uma dimensão menor que y) e que a primeira parcela é igual a zero (porque x_m é constante)

temos:

$$\frac{\partial^2 P(y,t)}{\partial y \partial t} = - S(y) \frac{\partial P(y,t)}{\partial y} + \int_y^{x_m} \left[\frac{\partial P(x,t)}{\partial y} \right] S(x) \left[\frac{\partial B(y/x)}{\partial y} \right] dx$$

(1.3.4-3)

Esta equação simplesmente estabelece que a variação da fração de material entre y e $y+dy$ durante o intervalo de tempo t e $t+dt$ é igual à perda de material por quebramento (primeira parcela) mais o ganho de material proveniente do quebramento do material de dimensões superiores a y (segunda parcela).

Reid desenvolveu a solução para (1.3.4-3) tendo em vista que é mais simples, experimentalmente, trabalhar com tamanhos discretizados e tempo contínuo que usar tamanho contínuo e tempo discretizado pois, de um modo geral, os dados sobre a distribuição granulométrica são obtidas por peneiramento e conseqüentemente, o são de um modo discreto.

É prática universalmente adotada usar-se para a análise granulométrica uma série de peneiras cujas aberturas decrescem em progressão geométrica. Seja α a razão desta progressão geométrica. Assim, se considerarmos duas peneiras adjacentes, suas aberturas x_{i-1} e x_i estão na razão

$$\frac{x_{i-1}}{x_i} = \alpha, \quad \alpha > 1, \text{ ou seja, em nossa notação,}$$

quanto menor o número da peneira maior sua abertura.

A partir de agora consideraremos como material pertencente ao intervalo granulométrico i aquele de dimensões situadas no intervalo (x_i, x_{i-1}) .

A função de quebramento foi redefinida: b_{ij} é a fração de material do intervalo j que ao quebrar passa a ter dimensões que a situam no intervalo i ($i > j$).

Usando uma série de peneiras para testes relativos ao processo de moagem não é possível detectar-se frações cujos fragmentos resultantes permanecem no mesmo intervalo de peneiras da partícula original. Reid, em sua solução, convencionou que as partículas que, ao se quebrarem, produzem fragmentos que permanecem no mesmo intervalo granulométrico são consideradas como não tendo sido quebradas.

Assim sendo,

$$b_{ii} = 0$$

Outra importante particularidade acerca da redefinição da função de quebramento é que a função de quebra

mento passa a depender de α , relação entre a abertura de duas peneiras adjacentes da série de peneiras usada.

Designando por $w_i(t)$ a fração de material retida no intervalo i após um tempo t de moagem podemos redefinir a função de seleção

$$S_i = \frac{\frac{dw_i(t)}{dt}}{w_i(t)} \quad (1.3.4-4)$$

A equação (1.3.4-3) pode então ser aproximada por:

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j w_j(t) \quad (1.3.4-5)$$

Esta equação, que Reid denominou de equação prática, nada mais é que uma aproximação da equação do modelo de Gardner e Austin (eq. 1.3.3-11), para a qual tende quando α tende a 1.

Notemos que na equação (1.3.4-4) $\frac{dw_i(t)}{dt}$ tem que

significar (pela definição de função de seleção) a variação da fração de material existente no intervalo i apenas por quebramento, ao passo que na equação (1.3.4-5) $\frac{dw_i(t)}{dt}$ significa variação total da fração de material do

intervalo i .

Fazendo $w_{res}(t)$ a fração de peso do material que atravessa a peneira mais fina da série de $n-1$ peneiras (n intervalos de granulometria) teremos o balanço global de massas:

$$w_{res}(t) + \sum_{i=1}^{n-1} w_i(t) = 1 \quad (1.3.4-6)$$

As equações (1.3.4-5) e (1.3.4-6) constituem o modelo formulado por Reid e para as quais ele desenvolveu uma solução particularmente adequada para ser tratado em um computador digital. No desenvolvimento desta solução Reid considerou a função de seleção independente do tempo e reescreveu a equação (1.3.4-5) do seguinte modo:

$$\frac{d}{dt} \left(e^{S_i t} w_i(t) \right) = e^{S_i t} \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j w_j(t) \quad (1.3.4-7)$$

Admitindo que se possa escrever

$$w_i(t) = \sum_{n=1}^i a_{ni} e^{-S_n t} \quad (1.3.4-8)$$

sendo a_{ni} coeficientes a determinar podemos reescrever a equação (1.3.4-7)

$$\frac{d}{dt} \left(e^{s_i t} w_i(t) \right) = \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{n=1}^j s_j b_{ij} a_{nj} e^{(s_i - s_n)t} \quad (1.3.4-9)$$

A integração desta equação nos dá:

$$w_i(t) e^{s_i t} - w_i(0) = \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{n=1}^j \frac{s_j b_{ij} a_{nj}}{s_i - s_n} \left[e^{(s_i - s_n)t} - 1 \right]$$

Donde:

$$w_i(t) = w_i(0) e^{-s_i t} + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{n=1}^j \frac{s_j b_{ij} a_{nj}}{s_i - s_n} \left(e^{-s_n t} - e^{-s_i t} \right) \quad (1.3.4-10)$$

Comparando as equações (1.3.4-8) e (1.3.4-10) obtemos

para $n \neq i$

$$a_{ni} = \sum_{j=n}^{i-1} \frac{S_j b_{ij} a_{nj}}{S_i - S_n} \quad (1.3.4-11)$$

e para $n = i$

$$a_{ii} = w_i(0) - \sum_{n=1}^{i-1} a_{ni} \quad (1.3.4-12)$$

As equações (1.3.4-8), (1.3.4-11) e (1.3.4-12) formam a solução do modelo matemático proposto por Reid e descrito pelas equações (1.3.4-5) e (1.3.4-6).

Reid, usando os dados experimentais provenientes do trabalho de Gardner e Austin, provou que a solução por ele proposta levava aos mesmos resultados obtidos por Gardner e Austin de um modo mais simples e com a vantagem da continuidade no tempo e a discretização no tamanho.

É necessário, entretanto, verificar a validade das hipóteses formuladas por Reid: a primeira delas é que a função de seleção é independente do tempo. Como já foi dito anteriormente não há evidência teórica de que isto sempre aconteça: é necessário para todo sistema estudado verificar experimentalmente se esta condição é satisfeita.

Outro ponto a ser testado é quanto à função de quebramento: definida em função de intervalos de peneira

a função de quebramento contém a hipótese implícita de que a distribuição granulométrica dentro de um intervalo de peneira permaneça constante. Esta hipótese é válida se a razão entre as aberturas de duas peneiras adjacentes α , foi relativamente pequena ($\sqrt{2}$ ou menor).

Além desta precaução ($\alpha \leq \sqrt{2}$) deve-se tomar cuidado quando da preparação do material para moagem, tendo em vista não destruir a distribuição granulométrica natural.

Além de apresentar a solução do modelo matemático da operação de moagem em batelada Reid aproveitou o fato de que sua solução é contínua no tempo para aplicar seus resultados à moagem contínua.

Seja $C(t)$ a função de distribuição de tempos de permanência do material no moinho.

Portanto $w_i(t) C(t) dt$ é a fração de material que, tendo entrado no sistema em $t = 0$ e permanecido no interior do mesmo por t unidades de tempo, tem dimensões que o situam no intervalo i .

Considerando-se o moinho em estado estacionário podemos escrever

$$W_i = \int_0^{\infty} w_i(t) C(t) dt \quad (1.3.4-13)$$

onde W_i é a fração de material do intervalo i para o estado estacionário.

O valor de $w_i(t)$ pode ser calculado diretamente a

partir da equação (1.3.4-8) o que significa que, uma vez obtidos as funções de quebramento e seleção em um teste em batelada necessitamos apenas conhecer a distribuição de tempos de permanência do material no interior do mesmo moinho usado no teste em batelada para se obter uma previsão de granulometria para o caso do moinho operando em regime contínuo.

1.3.5. KELSALL E REID

Kelsall e Reid estudaram exaustivamente a operação unitária de moagem em um pequeno moinho contínuo em escala de laboratório tendo publicado uma série de trabalhos a respeito.

Na realidade seu trabalho básico no campo (13) precedeu e deu origem ao trabalho de Reid (12).

Kelsall e Reid usaram a solução do modelo matemático de operação de moagem e empregaram traçadores para a determinação das funções de seleção e quebramento.

Entre outros, estudaram o efeito dos parâmetros de operação do moinho (diâmetro de bolas, carga de minério, tempo médio de permanência) sobre o resultado de moagem bem como o efeito do ambiente de moagem.

Tiveram o mérito inegável de apresentar o resultado de experiências cuidadosamente controladas e de desenvolver a solução do modelo matemático já descrito no item 1.3.4.

Tendo em vista que o ambiente de moagem pode influir na determinação das funções de seleção e quebramento, como os próprios autores verificaram (14), a principal objeção a seu trabalho está na escolha do traçador: quartzo como traçador para calcita. Portanto, Kelsall e

- i = designação genérica para os intervalos granulométricos. i varia de 1 a n .
- x_i = tamanho linear da abertura de peneira i , em microns.
- S_i = função de seleção, ou seja, a fração do peso das partículas do intervalo granulométrico i que é quebrada por unidade de tempo de moagem; dimensão: min^{-1} .
- b_{ij} = função de quebramento, ou seja, fração do peso do material quebrado do intervalo j que fica retida no intervalo i ($i > j$).
- t = tempo de moagem, em minutos
- $w_i(t)$ = fração do peso total do material retida no intervalo i após o tempo de moagem t .
- W_i = fração do peso total do material retida no intervalo i após o moinho atingir o estado estacionário.
- $c(t)$ = função de distribuição de tempos de permanência do material no moinho, não normalizada.
- $C(t)$ = Idem, normalizada de modo a que
- $$\int_0^{\infty} C(t) dt = 1$$
- θ = tempo normalizado em relação ao tempo médio de permanência.
- $C(\theta)$ = função distribuição de tempos de permanência, normalizada tanto em ordenadas quanto em abcissas.

As definições e notações não constantes neste l tem serão esclarecidas à medida em que se fizerem necessárias.

2. EQUIPAMENTO E TÉCNICA EXPERIMENTAL.

26.

2.1. APARELHAGEM E MATERIAL EMPREGADOS.

2.1.1. EQUIPAMENTO DE MOAGEM.

Foi utilizado um moinho cilíndrico de 20 cm de diâmetro e 30 cm de comprimento construído na Oficina Mecânica do I.P.R. O volume interno do moinho é de cerca de 10 decímetros cúbicos.

Internamente este moinho possui quatro defletores de 0,5 cm de altura dispostos longitudinalmente em todo o comprimento do moinho a ângulos de 90°. A finalidade de destes defletores é auxiliar a elevação da carga de minério e corpos moedores de modo a uniformizar a moagem.

O moinho é acionado por um motor trifásico de 1/2 HP sendo a transmissão e redução de velocidade feitos por um conjunto de polias e correias.

O moinho foi calculado de modo a que o volume aparente dos corpos moedores (no caso, bolas), fosse de 30% do volume total do moinho. No caso de bolas de 19 milímetros de diâmetro isto significa o uso de 400 bolas. Para as outras configurações foi usada uma massa de corpos moedores aproximadamente igual à massa das 400 bolas de 19 milímetros (12 kg).

Outro dado de projeto foi a massa de minério a ser moído: esta foi calculada de modo que, no máximo, 64% do espaço vazio entre os corpos moedores fosse ocupado pelo minério.

Calculou-se que a velocidade crítica para este moinho (ou seja, a velocidade em que os corpos moedores comecem a ser centrifugados) era de aproximadamente 95 rpm.

Escolheu-se então como velocidade de operação 60 rpm, ou seja, 64% de velocidade crítica.

Todos estes dados operacionais (fração de velocidade crítica, fração de volume ocupado, etc) foram obtidos na referência (15).

Como corpos moedores foram usados bolas de 19 e 25 milímetros de diâmetro, fornecidos pela Siderurgia Santa Maria (Contagem, MG), e barras cilíndricas de aço polido de 19 milímetros de diâmetro e 28 cm de comprimento.

2.1.2. EQUIPAMENTO DE PENEIRAMENTO.

Foi usado um conjunto de 6 peneiras da série Tyler, de 60 meshes a 325 meshes (250 microns a 44 microns), malha de bronze fosforoso e diâmetro de 8 polegadas. Foi mantida a relação $\sqrt{2}$ entre as aberturas das malhas de peneiras adjacentes.

Usou-se um agitador marca Patrol próprio para análise granulométrica de solos, adaptado nas oficinas do IPR de modo a ser possível o seu uso para peneiramento a seco e a úmido.

Este peneirador não era, de modo algum, adequado para análise granulométrica do material que utilizamos. Voltaremos a falar dos erros introduzidos pelo peneiramento quando da discussão dos resultados experimentais.

2.1.3. EQUIPAMENTO DE CONTAGEM.

Foi usada uma cadeia de contagem Hewlett-Packard composta de cristal de poço de duas por duas polegadas, scaler-timer, fonte de alta tensão e impressora.

O cristal de poço foi colocado verticalmente dentro de blindagem de chumbo construída no IPR.

2.1.4. MATERIAL ESTUDADO.

O material usado nos testes foi uma hematita fornecida pelo Centro de Pesquisa de Minérios da CVRD S.A.

Esta hematita, denominada "blue-dust", ocorre naturalmente em partículas na área de mineração da CVRD em Itabira.

Foi-nos fornecida lavada e concentrada em separador magnético. Este material será moído em grandes quantidades na usina de peletização da CVRD em Tubarão pois, no estado natural, sua superfície específica é insuficiente para o processo de fabricação de pellets.

A escolha do material teve, portanto, seu aspecto prático pois a continuação do presente estudo pode vir a ter considerável importância econômica.

A tabela I apresenta os resultados das análises físicas e químicas do material empregado: a análise química foi feita pela Divisão de Química do IPR; os dados de densidade aparente e real do minério foram fornecidos pela CVRD.

A tabela II apresenta os resultados de análise granulométrica do material fornecido pela CVRD. São apresentados os dados referentes ao peneiramento de três amostras de 100 gramas cada, peneiradas a seco e a úmido segundo a técnica descrita em 2.3.6.

TABELA I

29

Densidade aparente do minério solto: $2,5 \text{ g/cm}^3$ Densidade real do minério: $5,2 \text{ g/cm}^3$.

Análise Química (dados da D.Q. do IPR).

Fe	67,8%
Fe ₂ O ₃	96,9%
Si O ₂	1,7%
Al ₂ O ₃	1,2%
Fe O	0,1%
Mg O	Não detectado
Ca O	Não detectado
Mn	Não detectado
P ₂ O ₅	0,06%
Perda por ignição	0,4%

Peneiras	Sêco		Úmido	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão
+45	1,57	0,06	1,47	0,15
45x60	2,63	0,07	2,61	0,11
60x80	5,37	0,20	6,19	0,63
80x120	19,25	0,39	16,94	0,90
120x170	32,82	0,80	35,14	1,63
170x230	24,01	0,36	24,20	0,61
230x325	9,73	0,75	8,25	0,23
-325	4,62	0,30	5,20	0,05

2.2. PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES BÁSICAS E DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM ESTADO ESTACIONÁRIO.

2.2.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

Vimos na Introdução que as duas funções básicas mostram:

- a) - Como desaparece, por moagem, o material de uma dada fração granulométrica (função de seleção) e
- b) - Como se reparte, entre as frações inferiores, o material que desapareceu da fração considerada (função de quebramento).

Tendo em vista que a variação do peso do material em uma dada fração granulométrica se faz tanto por perda de material (por quebramento) como por ganho de material (por quebramento, ocorrido nas frações superiores) torna-se evidente a necessidade do uso de um traçador para a determinação das funções básicas e o traçador radioativo im põe-se como a escolha natural.

Entre os vários motivos pelos quais o traçador radioativo é o mais vantajoso dos possíveis traçadores podemos apontar a seletividade, sensibilidade, facilidade de detecção e principalmente, a perfeita concordância de características físicas e químicas do traçador e do materia l traçado pois, de um modo geral, pode-se irradiar uma parcela do material a ser estudado e usá-la como traçador.

O processo para determinação das funções de seleção e de quebramento, que veremos nos parágrafos seguintes, envolve, em última análise, o conhecimento da distribuição de atividade nas diversas frações granulométricas do material estudado, em função do tempo.

Sejam:

$A_i(t)$ = atividade específica do material na fração granulométrica i , no intervalo t , em $\mu\text{Ci}/\text{grama}$.

$w_i(t)$ = peso do material da fração i após t unidades de tempo de moagem, em gramas.

A atividade total da amostra peneirada será:

$$A = \sum_{i=1}^{i=n} A_i(t) w_i(t) \text{ em } \mu\text{Ci} \quad (2.2.1-1)$$

Seja $w_i(t)$ a fração de atividade presente na fração granulométrica i , no instante t ou, desde que se suponha uma marcação mássica uniforme, a fração de peso do material radioativo presente na fração i no instante t .

Podemos escrever:

$$w_i^*(t) = \frac{A_i(t) w_i(t)}{\sum_{i=1}^{i=n} A_i(t) w_i(t)} \quad (2.2.1-2)$$

Dada a dificuldade de se medir a atividade específica $A_i(t)$ em termos absolutos ($\mu\text{Ci}/\text{grama}$) normalizamos as condições de contagem: todas as amostras foram conta

das em idênticas condições de geometria, discriminação, etc. Assim sendo, haverá um fator constante que relaciona a atividade específica em $\mu\text{Ci}/\text{grama}$ com o número de cpm/grama obtidos na determinação da atividade das amostras. Este fator constante, que aparecerá no numerador e denominador de (2.2.1-2) cancela-se: em outras palavras podemos empregar diretamente os resultados experimentais (em cpm/grama) na obtenção da fração de atividade no intervalo granulométrico i .

Entretanto, caso se empregue um radioisótopo de meia vida curta impõe-se a correção de decaimento.

No caso em estudo a meia-vida do radioisótopo empregado (Fe-59, 45 dias) era bastante grande em relação ao tempo de contagem das amostras referentes a cada penetramento (cêrca de uma hora) tendo sido desnecessária a correção do decaimento.

2.2.2. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE SELEÇÃO.

Para a determinação de função de seleção pode-se usar a equação (1.3.4-4), lembrando que nela $\frac{dw_i(t)}{dt}$ é a taxa de variação de $w_i(t)$ apenas por quebramento. Para o caso da fração superior a aplicação é imediata e leva diretamente a:

$$w_1(t) = w_1(0) e^{-S_1 \cdot t} \quad (2.2.2-1)$$

Para as demais frações, devido ao material que se quebra nas frações superiores e cai na fração em estudo, é imperioso o uso do traçador e a fórmula é válida para a fração marcada.

$$w_i^*(t) = w_i^*(0) e^{-S_i t} \quad (2.2.2-2)$$

A maneira prática de se determinar S_i é fazer medidas de $w_i^*(t)$ (ou $w_j(t)$) para vários tempos de moagem, lançar os resultados em papel semi-logarítmico e ajustar, pelo método dos mínimos quadrados, uma reta aos pontos experimentais. A inclinação desta reta é igual a $-S_i$.

Deve-se notar que o exposto acima é válido se S for constante e independente de t . Para valores de S_i variáveis com o tempo pode-se calcular uma média usando uma aproximação por diferenças finitas de equação (1.3.3-11) proposta por Gardner e Austin. Como a constância de S é uma de nossas hipóteses básicas deixamos de comentar aqui este caso. Examinaremos a hipótese de constância de S na discussão dos resultados experimentais.

O processo descrito acima para determinação de S exige que se marque cada uma das frações granulométricas do material que se deseja estudar (com exceção de fração superior, conforme explicado). Envolve, portanto, um longo e tedioso trabalho experimental. Em nosso estudo optamos por um processo alternativo que será descrito no parágrafo 2.2.4.

2.2.3. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE QUEBRAMENTO.

Inicialmente devemos notar que, a rigor, a determinação da função de quebramento, para qualquer fração granulométrica considerada, exige o emprêgo de um traçador. Uma alternativa ao método de traçador (método da fração única) que comentaremos ligeiramente no parágrafo seguinte tem o grave defeito de deixar de levar em conta o ambiente de moagem que, segundo Kelsall e Reid (14), é um dado importante na simulação da operação de moagem.

Antes de explicar o método empregado para a determinação de função de quebramento vejamos, numericamente, o que ela significa: Se b_{31} , por exemplo, é igual a 0,30 isto quer dizer que, do material que se quebra na fração 1, 30% cai, diretamente na fração 3.

Note-se que usamos a notação e definição de Reid pois é a solução de Reid que usaremos neste estudo.

A partir do exemplo dado acima torna-se fácil generalizar; podemos escrever:

$$b_{ij} = \frac{w_i^*(t_2) - w_i^*(t_1)}{w_j^*(t_1) - w_j^*(t_2)} \quad (i > j) \quad (2.2.3-1)$$

Quando se emprega um traçador é conveniente que t_1 seja igual a zero; a partir deste ponto passaremos por tanto a assim considerá-lo.

Lembremos que, como sô estamos interessados no quebramento primário do material da fração j para a fração i , não deve existir traçador inicialmente senão na

tração j ou seja $w_i^*(0) = 0$ para todo $i \neq j$.

Além disto t_2 deve ser suficientemente pequeno para que o quebramento secundário seja desprezível.

Nenhuma destas condições pode ser realizada na prática: é impossível obter-se $w_i^*(0) = 0$ para todo $i \neq j$ devido ao erro de peneiramento já mencionado anteriormente e de que voltaremos a falar na discussão dos resultados; se t_2 for muito pequeno o erro nas diferenças do denominador e numerador de (2.2.3-1) pode se tornar excessivamente grande.

Estas condições podem, entretanto, ser aproximadas: a primeira ($w_i^*(0) = 0$ para todo $i \neq j$), por meio de uma cuidadosa preparação do traçador e a segunda (t_2 pequeno) por meio da técnica que exporemos a seguir:

Reescrevamos a fórmula (2.2.3-1) para $t_1 = 0$

$$b_{ij} = \frac{w_i^*(t_2) - w_i^*(0)}{w_j^*(0) - w_j^*(t_2)} \quad (2.2.3-2)$$

Como t_2 não pode ser muito pequeno haverá influência do quebramento secundário na determinação de b_{ij} , influência que crescerá com t_2 .

Verifica-se experimentalmente que embora b_{ij} varie com t_2 esta variação é relativamente pequena para tempos de moagem curtos. A técnica empregada por nós foi repetir-se a determinação de b_{ij} para dois valores de t_2 , lançar os valores encontrados para b_{ij} em um gráfico (t como variável independente) e determinar por extrapolação

linear o valor de b_{ij} para $t = 0$. Esta técnica pode ser empregada com relativo sucesso se os valores de b_{ij} determinados para os dois valores de t_2 não diferirem entre si de modo apreciável. Caso isto aconteça julgamos mais conveniente usar o valor de b_{ij} determinado para o menor dos t_2 (quando o quebramento secundário deve ter menor influência) para os cálculos de previsão de granulometria.

2.2.4. ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE SELEÇÃO E QUEBRAMENTO.

Pelo visto nos dois parágrafos anteriores verificamos que as funções de seleção e quebramento para todas as frações granulométricas podem, em princípio, ser determinados pelos métodos expostos nestes parágrafos.

A partir destes valores poder-se-ia, com o emprego de equação (1.3.4-8) proposta por Reid, fazer-se a previsão de granulometria para qualquer tempo de moagem (caso estudássemos a moagem em batelada) ou a granulometria de estado estacionário (caso de moagem contínua) que é o objetivo deste estudo.

Isto, entretanto, envolveria a necessidade de se fazer a marcação de cada uma das frações granulométricas do material em estudo e moagens separados para a determinação das funções básicas de cada uma destas frações. A quantidade de trabalho necessária para um estudo desta natureza é enorme e o tornaria pouco prático.

Por isto, em nosso trabalho, determinamos experimentalmente a função de quebramento da fração granulométrica superior e aplicamos a observação feita por Gardner e Austin a respeito de normalização de função de quebramento. Usando a notação de Reid podemos escrever que

$$b_{ij} = b_{(i-j+1)1} \quad (2.2.4-1)$$

para todo $i < n$ (n sendo o número de intervalos granulométricos em estudo). Para $i = n$ podemos escrever, tendo em vista que a soma das funções de quebramento de uma dada fração granulométrica deve ser igual a 1:

$$b_{nj} = 1 - \sum_{k=1}^{n-1} b_{kj} \quad (2.2.4-2)$$

Deste modo, com apenas a marcação de fração superior podemos obter as funções de quebramento de todas as frações em estudo.

As funções de seleção foram determinadas a partir das funções de quebramento e da distribuição de atividade entre as frações granulométricas para diferentes tempos de moagem, supondo-se a função de seleção constante e independente do tempo.

Para isto aplicamos um método de cálculo inverso que será explicado quando descrevermos o programa de computador usado para a previsão de granulometria de estado estacionário.

Conforme mencionado na Introdução não existe ainda explicação teórica para a constância da função de seleção nem para a normalização da função de quebramento. Para verificar se tais propriedades se aplicam ao material e sistema que empregamos fizemos também a marcação e moagem para uma fração inferior analisando os resultados do mesmo modo que para o caso da fração superior. Os resul

tados deste teste, que não foram usados para previsão de granulometria, são apresentados na discussão dos resultados experimentais.

Conforme mencionado no parágrafo anterior existe um método, o da fração única, proposto por Klimpel (16), que evita o uso de traçador para a determinação das funções de quebramento.

Klimpel inicia a moagem com apenas uma fração granulométrica no moinho e a partir de pequenos incrementos de moagem determina valores da função de quebramento e também os extrapola para o tempo zero de modo a eliminar a influência do quebramento secundário. As funções de seleção são determinadas por cálculo inverso. Como se vê é, conceitualmente, bastante semelhante ao método empregado por nós. Tem a vantagem de evitar o emprego de um traçador (radioativo no nosso caso) e a grande desvantagem de deixar de levar em conta o ambiente de moagem.

Gardner está convencido (comunicação verbal) de que o método de fração única, por este motivo, deve ser evitado.

2.2.5. DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE ESTADO ESTACIONÁRIO.

A equação (1.3.4-8), solução do modelo de Reid, permite a previsão de granulometria para qualquer tempo de moagem desde que se conheçam as função de seleção e quebramento das várias frações granulométricas envolvidas e a distribuição granulométrica inicial do material moído.

Vimos nos parágrafos anteriores como se obtêm estas funções: estamos, pois, em condições de fazer uma previsão de granulometria para o caso de moagem em batelada.

No caso da moagem em regime contínuo temos que resolver o problema adicional causado pelo fato de que o material que entra no moinho em um dado instante t abandona o moinho parceladamente a tempos que, teoricamente, podem variar entre $t+dt$ e infinito. Em outras palavras, o material apresenta uma distribuição de tempos de permanência no interior do moinho.

Seja $C(t)$ a função que descreve esta distribuição de tempos de permanência. $C(t)$ é definida de tal modo que $C(t) dt$ é a fração do material que tendo entrado no moinho em $t=0$ o abandona entre t e $t+dt$. Sendo $C(t)$ definida em termos de fração de material segue-se imediatamente que

$$\int_0^{\infty} C(t) dt = 1 \quad (2.2.5-1)$$

A partir da curva $C(t)$ podemos também determinar o tempo médio de permanência do material no interior do moinho: este tempo médio é dado por

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t C(t) dt \quad (2.2.5-2)$$

A figura 1 mostra o aspecto típico de uma curva de distribuição de tempo de permanência

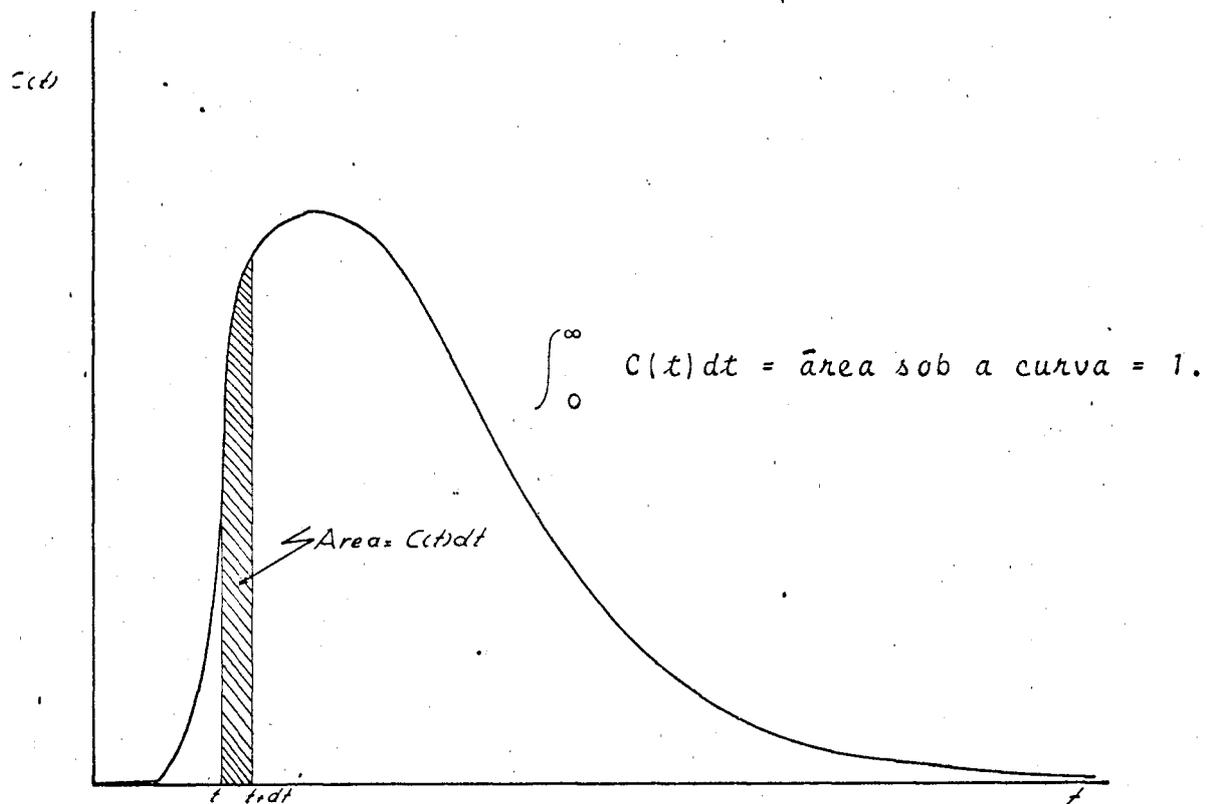


Fig. 1

Note-se que pela definição acima podemos apenas determinar para qualquer instante $t > 0$, qual fração do material que tendo entrado no moinho em $t = 0$ o abandona entre t e $t+dt$, e o tempo médio de permanência. No caso do presente estudo não é exatamente nisto em que estamos interessados.

Supondo que o sistema esteja em estado estacionário (vazão de entrada e saída iguais e constantes; granulometrias de entrada e saída constantes) nosso interesse

é saber por quanto tempo permaneceu no interior do moinho cada uma das frações (não confundir com frações granulométricas) que compõem uma amostra colhida à saída do mesmo.

Pode-se mostrar que a mesma curva $C(t)$ fornece esta informação. Para se obter a granulometria de estado estacionário devemos combinar a informação dada pela curva $C(t)$ com a equação de Reid.

Seja $w_i(t)$ a fração de material que tendo permanecido no interior do moinho por t unidades de tempo tem à saída do mesmo dimensões que o situam no intervalo granulométrico i . Do produto de moagem a fração $C(t) dt$ é composto de material de tempo de permanência igual a t unidades de tempo.

Portanto

$$w_i(t) C(t) dt \quad (2.2.5-3)$$

é a fração de material que, estando situado no intervalo i após a moagem, proveio de material com tempo de permanência igual a t . Mas o material situado no intervalo i após a moagem pode ser originário também de material com outros tempos de permanência.

Portanto, a fração de material que situada no intervalo granulométrico i , para o caso de estado estacionário, é dada por

$$w_i = \int_0^{\infty} w_i(t) C(t) dt \quad (2.2.5-4)$$

Esta fórmula foi aplicada para todas as frações granulométricas à exceção da fração inferior. Para esta a granulometria de estudo estacionário foi calculada por

$$w_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} w_i \quad (2.2.5-5)$$

onde n é o número de frações granulométricas em estudo.

A função distribuição de tempos de permanência pode ser facilmente obtida por meio do emprego de um traçador do seguinte modo: injeta-se, para $t=0$, um pulso unitário de traçador no sistema. Após a injeção colhem-se a mostras na saída do sistema a intervalos de tempos regulares e verifica-se o teor de traçador em cada uma destas a mostras. Considerando-se o caso do traçador radioativo este teor será medido pela atividade específica das amostras. Seja $c(t)$ esta atividade específica em cpm/grama. Não se pode empregar diretamente este valor de $c(t)$ porque a área sob esta curva $c(t)$ não é unitária. Os dados experimentais devem então ser normalizados pela fórmula abaixo:

$$C(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (2.2.5-6)$$

A curva $C(t)$ assim obtida pode ser então empregada diretamente na fórmula (2.2.5-4). Deve-se notar que

a normalização foi feita apenas em relação à área sob a curva. O tempo foi mantido em unidades de tempo real pois assim o exige a fórmula de Reid.

No caso em que devemos comparar dois sistemas, este tipo de normalização não é suficiente. Como neste trabalho estudamos moinhos de bolas, de duas câmaras e de barras empregamos a normalização descrita por Levenspiel (17): a curva $c(t)$ versus t é transformada em uma curva $C(\Theta)$ versus Θ segundo as fórmulas abaixo:

$$C(\Theta) = \frac{\bar{x} c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (2.2.5-7)$$

$$\Theta = \frac{t}{\bar{x}} \quad (2.2.5-8)$$

onde \bar{x} é o tempo médio de permanência.

Como se pode ver pelas fórmulas acima a curva $C(\Theta)$ versus Θ é adimensional tanto em ordenadas como em abcissas e a área sob ela é unitária sendo assim bastante conveniente do ponto de vista da comparação de sistemas. Todas as curvas de distribuição de tempos de permanência apresentados na discussão dos resultados experimentais são curvas normalizadas deste modo.

Deve-se notar que para a obtenção da granulometria de estado estacionário, fórmula (2.2.5-4), fizemos a suposição implícita de que o moinho transfere todas as frações granulométricas presentes no material em estudo,

de sua entrada para sua saída, de uma mesma maneira. Na discussão dos resultados experimentais examinaremos com mais detalhes esta suposição.

2.3. TÉCNICA EXPERIMENTAL.

2.3.1. PREPARAÇÃO DO MATERIAL.

Dada a distribuição granulométrica de hematita fornecida pela CVRD S.A. e não sendo interessante do ponto de vista experimental (ver discussão dos resultados) trabalhar com uma porcentagem de material muito pequena na fração superior resolvemos eliminar todo material acima de 250 microns na preparação do minério a ser moído.

Assim sendo, a preparação do material a ser moído consistia em uma secagem prévia em estufa, peneiramento manual de todo o minério na peneira de 60 mesh e uma cuidadosa homogeneização do material a moer, ou seja, do material que passou pela peneira de 60 mesh.

2.3.2. IRRADIAÇÃO DO MATERIAL.

Ao longo de todo o nosso trabalho escolhemos como frações marcadas para acompanhar a evolução de moagem as frações 60x80 e 120x170.

As amostras para irradiação foram preparadas por um cuidadoso peneiramento no qual se tentou, tanto quanto possível, conservar a granulometria natural da fração escolhida para o estudo.

Usamos para cada experiência de moagem uma massa de cerca de 17 gramas, valor este escolhido de modo a permitir que a injeção do traçador pudesse ser feita de um modo bastante rápido, de modo a aproximar-se a um pulso.

A determinação da atividade a empregar deve levar em conta que forçosamente deveremos colher amostras para peneiramento e posterior contagem na região situada no início da curva de distribuição de tempos de permanência, ou seja, na região de baixa atividade específica das amostras colhidas. Além disto, uma boa determinação da curva de distribuição de tempos de permanência exige a contagem de amostras colhidas na região da cauda e, também, de baixa atividade específica.

Estimamos (e nossa estimativa revelou-se correta) que 40 microcuries seriam suficientes para, dentro de um tempo de contagem relativamente curto, conseguir-se a desejada precisão estatística. No caso de moinhos maiores seremos forçados a sacrificar a rapidez das contagens em favor da segurança.

Note-se que o emprêgo desta atividade relativamente alta para uma experiência em escala de laboratório é devida à distribuição de tempos de permanência do material no interior do moinho que se verifica na moagem em regime contínuo. Para o caso da moagem em batelada pode-se comodamente trabalhar com uma atividade quatro a cinco vezes menor que a atividade que empregamos.

O traçador natural para um minério de ferro de alto teor é o Fe-59 e este foi o traçador radioativo escolhido.

Sendo a seção de choque do Fe-58 para neutrons térmicos relativamente pequena o uso do Fe-59 como traçador levou a uma irradiação de cerca de 1000 kwh na mesa giratória do Reator Triga do IPR (fluxo de aproximadamente $6,0 \times 10^{11}$ n/cm²/s).

Amostras para um grande número de experiências foram irradiadas simultaneamente. Para que a atividade de todas estas amostras fosse a mesma a mesa do reator foi girada durante todo o período de irradiação. Tentamos, sempre que possível aproveitar as irradiações longas de rotina do reator para a preparação do nosso traçador radioativo.

Após o término da irradiação as amostras foram deixadas a decair durante cerca de uma semana de modo a que todos os isótopos de meia vida curta tivessem desaparecido quando da utilização das amostras. O decaimento destes isótopos foi acompanhado, quando da irradiação da primeira série de amostras, no analisador multicanal da Divisão de Química do IPR.

2.3.3. INJEÇÃO DO TRAÇADOR.

2.3.3.1. MOAGEM CONTÍNUA.

Do ponto de vista teórico a injeção do material radioativo deveria ser feita de um modo a não perturbar o ambiente de moagem, ou seja, deveríamos introduzir o traçador radioativo no material com que alimentamos o moinho sem alterar a distribuição granulométrica deste material. Isto não foi possível por que, sendo o moinho e vazão empregados muito pequenos, a massa de traçador que poderíamos empregar também seria pequena: o fluxo de nosso reator é insuficiente para ativar adequadamente esta massa em um tempo de irradiação razoável. Além disto, e principalmente, o número de grãos presentes na amostra radioativa seria também pequeno tornando ainda mais crítico o problema já delicado da amostragem (ver discussão dos resultados experimentais).

Assim sendo optamos por injeções com uma massa de cerca de 25 gramas, fortemente distorcida quanto à distribuição granulométrica, pois a maior parte desta massa era composta da fração radioativa, admitindo que esta massa é desprezível (do ponto de vista de alterar o ambiente de moagem) em relação à massa de minério presente no interior do moinho (cerca de 1,5 kg) -

Antes da injeção a amostra a injetar era peneirada (do modo descrito no parágrafo 2.3.5) para a determinação da distribuição de atividade nas diversas frações granulométricas. Após o peneiramento e contagem as diversas frações eram novamente misturadas e injetadas no moinho.

A injeção durava cerca de 5 segundos, tempo este suficientemente pequeno em relação ao tempo médio de permanência (da ordem de 5 minutos) para que a injeção pudesse ser considerada como um pulso de traçador.

2.3.3.2. MOAGEM DESCONTÍNUA.

Neste caso a introdução do material radioativo foi feita sem se alterar a distribuição granulométrica natural retirando-se da carga do moinho uma massa igual e de mesma fração que o traçador radioativo.

2.3.4. MOAGEM.

2.3.4.1. MOAGEM CONTÍNUA.

Durante todos os testes em regime contínuo trabalhou-se com uma alimentação descontínua de 125 gramas a cada meio minuto.

Para o início do teste colocavam-se os corpos moedores e uma carga de minério ligeiramente superior a que esperávamos para o estado estacionário no interior do mo

inho que era então posto a funcionar sendo alimentado como descrito acima.

O moinho era então alimentado por um tempo equivalente a pelo menos três vezes o tempo médio de permanência do material no moinho, na configuração em estudo. Este tempo é suficiente para que se atinjam as condições de estado estacionário de vazão e granulometria.

A injeção do traçador era feita após este tempo de espera. Como a massa de traçador a injetar era condideravelmente menor que a massa de minério com que se alimentava o moinho (25 gramas contra 125 gramas) logo após o término da injeção do traçador injetava-se mais 100 gramas de minério para não perturbar o estado estacionário de vazão do moinho.

Logo após a injeção de traçador iniciava-se a coleta de amostras para análise granulométrica e para determinação da curva de distribuição de tempos de permanência. O tempo de amostragem foi de 30 segundos e a frequência foi de duas amostragens por minuto até 5 minutos após a injeção. Daí por diante a frequência foi de uma amostra por minuto. A coleta de amostras prolongava-se por um tempo da ordem de quatro a cinco vezes o tempo médio de permanência do material no moinho.

Apesar de todas as precauções tomadas a moagem em regime contínuo, sendo feita com a entrada e saída do moinho abertas, produzia bastante pó.

Por isto, os operadores usaram máscaras contra pó fornecidas pela D.S.R. do IPR durante todo o período de moagem. Estas máscaras foram também usadas toda vez que o manuseio do minério (com o traçador incorporado) pudesse dar origem à formação de pó.

2.3.4.2. MOAGEM EM BATELADA.

Nos casos em que determinamos as frações de seleção e quebramento em uma experiência em batelada a moagem foi feita com o moinho totalmente fechado. Após intervalos de tempo preestabelecidos parava-se o moinho, e colhiam-se amostras para análise granulométrica. A moagem só era reiniciada após a reincorporação do material retirado para análise à carga do moinho.

Quanto à segurança, no caso de moagem em batelada, a dose medida na superfície externa do moinho era de cerca de quatro mR/hora, não causando maiores problemas durante a realização de experiência. Na moagem em regime contínuo a dose variava com o estágio da moagem sendo entretanto, sempre inferior ao valor de 4 mR/hora mencionado acima.

2.3.5. AMOSTRAGEM.

2.3.5.1. REGIME CONTÍNUO.

Conforme descrito em 2.3.4.1. colhemos amostra de meio minuto à saída do moinho para a análise granulométrica.

Do ponto de vista teórico, como devemos relacionar o tempo de moagem com a distribuição de atividade nas várias frações granulométricas, o ideal seria colher a amostra em um intervalo de tempo infinitamente pequeno.

O tempo de meio minuto para a coleta de amostra representa um compromisso entre a precisão de determinação do tempo de moagem e a obtenção de uma amostra com massa suficiente para a análise granulométrica.

Na prática isto significa que, por exemplo, a amostra à qual atribuímos um tempo de moagem de 5 minutos

contêm, na realidade, material radioativo que permaneceu no interior do moinho de 4,75 a 5,25 minutos. Desde que a quebra de material nas várias frações não se faz de uma maneira linear, a coleta de amostras, no nosso caso, introduzia um erro sistemático nos resultados experimentais, erro este praticamente impossível de se quantificar.

Além disto, a amostra pode eventualmente não ser representativa da massa de minério presente no interior do moinho sendo-o, apenas, do minério que se encontra próximo à saída do mesmo. Na discussão dos resultados experimentais voltaremos a discutir o problema de amostragem.

2.3.5.2. MOAGEM EM BATELADA:

Neste caso é bem mais fácil conseguir-se uma amostra representativa do material moído.

Além disto pode-se medir o tempo de moagem com precisão muito boa (cronômetro) deixando-se de introduzir o erro sistemático mencionado acima.

2.3.6. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.

A análise granulométrica do material moído é o ponto crítico do presente estudo, devido ao erro de penejamento (ver discussão dos resultados). Este erro de penejamento, impossível de ser eliminado, provém do fato de que partículas de dimensões próximas (acima ou abaixo) à dimensão da malha da peneira podem, aleatoriamente, passar ou não para a peneira inferior.

Chamaremos a este erro de erro estatístico de penejamento.

No caso do material em estudo existe ainda o problema adicional de que as partículas mais finas tem ten

dência a aderir às partículas maiores. Isto causa sérios problemas quando a porcentagem de finos presentes na amostra a peneirar é grande. O problema pode ser parcialmente resolvido pelo peneiramento a úmido.

Verificamos experimentalmente que no caso da moagem em regime contínuo o problema não era muito grave: uma mesma amostra peneirada repetidas vezes a seco e a úmido apresentava distribuições granulométricas médias para estes dois tipos de peneiramento ligeiramente diferentes mas estas diferenças podiam ser perfeitamente explicadas pelo erro estatístico de peneiramento.

Para a moagem em batelada, entretanto, torna-se imperioso o uso do peneiramento a úmido.

Assim sendo para a moagem em regime contínuo empregamos o peneiramento a seco e para a moagem em batelada empregamos, na maior parte dos casos, peneiramento a seco e a úmido de modo a poder comparar resultados - obtidos por peneiramento a seco e a úmido.

Os peneiramentos foram feitos do seguinte modo:

2.3.6.1. PENEIRAMENTO A SECO, MOAGEM EM REGIME CONTÍNUO.

As amostras colhidas para peneiramento tinham, em média, 125 gramas. Cada uma destas amostras de 125 gramas corresponde a um tempo de moagem.

Decidimos, para maior controle, peneirar independentemente duas amostras de 50 gramas retiradas de amostras de 50 gramas a amostra original foi cuidadosamente homogeneizada. Peneirando amostras independentemente nos sa intenção era a de eliminar erros-grosseiros (peneiras furadas, pesagem, etc) bem como adquirir maior experiência no que se refere a erros estatísticos de peneiramento.

Foi usada a seguinte série de peneiras (USBS): 80, 120, 170, 230 e 325.

As amostras foram peneiradas durante 15 minutos.

As diversas frações granulométricas obtidas foram pesadas em uma balança Mettler P 1200 com uma sensibilidade de 10 mg.

2.3.6.2. PENEIRAMENTO A ÚMIDO, MOAGEM EM BATELADA.

Também neste caso foram peneiradas independentemente duas amostras para cada tempo de moagem. Em geral usamos amostras de 100 gramas e o peneiramento foi feito inicialmente a seco (5 minutos) e a seguir a úmido (10 minutos) com uma vazão de 1 litro de água por minuto. As diversas frações granulométricas foram retiradas das peneiras, secadas em estufa e pesadas na mesma balança mencionada acima.

O peneiramento a seco das amostras colhidas em experiências de moagem em batelada foram feitos do mesmo modo que os referentes à moagem contínua.

2.3.7. DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADES ESPECÍFICAS.

2.3.7.1. AMOSTRAS PROVENIENTES DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.

A partir de cada fração granulométrica obtida por peneiramento foram pesadas, sempre que possível, três amostras de uma grama para contagem. Tomou-se todo o cuidado possível para que estas três amostras fossem representativas da fração granulométrica cuja atividade específica se procurava determinar.

Estas amostras foram contadas no equipamento descrito em 2.1.3. de modo a que, no pior caso, o desvio pa

drão da medida fosse inferior a 2% do valor medido. Não julgamos necessário atingir uma maior precisão porque os outros erros experimentais (principalmente o erro estatístico de peneiramento) são sensivelmente superiores a 2%.

2.3.7.2. AMOSTRAS COLHIDAS PARA A DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE PERMANÊNCIA.

As amostras colhidas para a determinação da distribuição de tempos de permanência foram homogeneizadas e a partir de cada uma delas foram pesadas vinte gramas para contagem. Cada uma destas amostras foi contada por um minuto.

A precisão obtida nestas contagens foi também, em geral, melhor que 2%. As amostras correspondentes a tempo da região da cauda da curva foram contadas com precisão inferior a 2%. Entretanto, isto não leva a erros sérios pois, pelo tipo de cálculos feitos a partir da distribuição de tempos de permanência, estes erros tendem a se cancelar.

2.4. PROGRAMA DE COMPUTADOR.

2.4.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

O método de cálculo empregado para a determinação das funções de seleção exige, para que seja prático, o uso intensivo de um computador digital.

Isto nos leva a considerar o computador como ferramenta e parte do método experimental.

Nossos programas foram escritos para o Computador IBM 1130 da EEUFMG e para o Computador IBM/360 do Centro de Computação da UFMG.

Embora vários programas tenham sido usados no início dos trabalhos chegamos à conclusão que a massa de dados experimentais justificava a unificação destes programas. Esta unificação não só poupa tempo na análise dos resultados como elimina qualquer possível tendenciosidade nesta análise.

Descreveremos a seguir este programa unificado que foi escrito para o caso da moagem contínua, duas frações marcadas, e apresentaremos o diagrama de blocos respectivo para que o leitor possa avaliar as diversas possibilidades de uso deste programa para situações diferentes daquelas para as quais ele foi especificamente escrito. Em Apêndice apresentamos a listagem completa deste programa unificado, bem como uma tabela indicando todos os símbolos nele usados.

2.4.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA BÁSICO E DIAGRAMA DE BLOCOS (SIMPLIFICADO).

Como dito no parágrafo anterior o programa de computador foi escrito com a finalidade básica de poupar tempo análise dos resultados.

Os primeiros dados fornecidos ao computador são: o número de intervalos granulométricos do material em estudo, o número de incrementos de tempo de moagem usados e o número de vezes que se deseja executar o programa.

A seguir inicia-se a execução do programa propriamente dito: são fornecidos ao computador os dados referentes aos peneiramentos e contagens: para cada tempo de moagens feitos independentemente (instruções 003 e 004).

O computador calcula a partir destes dados a fração de atividade presente em cada intervalo de peneira

(instruções 007 a 014) e imprime uma tabela de resultados para cada peneiramento efetuado (instruções 018 a 023).

Recordemos que fizemos dois peneiramentos e contagens independentes para cada tempo de moagem. Nos cálculos subseqüentes usamos como atividade presente no intervalo genérico i a média aritmética das atividades presentes nos intervalos i das duas amostras peneiradas independentemente. O cálculo desta atividade média e impressão de tabela correspondente são feitos da instrução 023 + 1 ã instrução 028.

Obtida a atividade média em cada fração granulomētrica estamos em condições de calcular as funções de quebramento. Estas são calculadas pela fórmula:

$$B(I, J) = \frac{w(I, J) - w(I, 1)}{w(1, 1) - w(1, J)} \quad (2.4.2-1)$$

onde, genéricamente, $w(I, J)$ significa a fração de atividade presente no intervalo de número de ordem I após o tempo de moagem de número de ordem J ; $J = 1$ identifica a a mostra injetada (tempo de moagem de zero minuto).

$B(I, J)$ significa, na notação de Reid, b_{ij} determinado para o tempo de moagem de número de ordem J .

A seguir o programa extrapola linearmente para o tempo de moagem zero os dois primeiros valores obtidos para $B(I, J)$, define o valor de b_{1j} (na notação Fortran, $B(1, J)$) como sendo igual a zero e, desde que a soma das funções de quebramento b_{ij} deve ser igual a 1, para evi

tar possíveis imprecisões nestes cálculos as normaliza de modo a que a soma seja unitária.

Note-se que na fórmula (2.4.2-1) empregamos a atividade presente na primeira fração granulométrica ($w(1,1)$). No caso da segunda injeção de traçador (fração marcada 120 x 170) fizemos a análise granulométrica com a série completa de peneiras (embora nas duas primeiras frações granulométricas não existisse atividade) para poder verificar a condição de estado estacionário da distribuição granulométrica. Por isso, quando da análise dos resultados da segunda injeção, redefinimos a ordem das peneiras para poder usar a fórmula (2.4.2-1). A impressão dos resultados obtidos é feita logo a seguir.

O cálculo das funções de quebramento descrito é realizado da instrução 028 + 1 à instrução 039.

A seguir, da instrução 039 + 1 à instrução 0,79 o programa executa a rotina de cálculo inverso para a determinação das funções de seleção. A impressão de resultados incluída nesta parte do programa justifica-se pelo fato de que esta parte do programa, com ligeiras modificações, pode ser usada para o caso da moagem em batelada. Descrevemos no parágrafo seguinte o método de cálculo inverso empregado.

O cálculo do tempo médio de permanência do material no interior do moinho e as normalizações necessárias à previsão de granulometria de estado estacionário e à comparação de diversas configurações de moagem é feito da instrução 080 à instrução 091. Nestes cálculos empregamos as fórmulas já mostradas no parágrafo 2.2. e a subrotina de integração numérica QSF da biblioteca de subrotinas científicas da IBM.

Parte-se a seguir para o cálculo da distribuição granulométrica de estado estacionário usando-se as fórmulas mencionadas em 2.2.5. (solução de Reid). Para este cálculo fornece-se ao computador a distribuição granulométrica do material com que se alimenta o moinho. Esta parte do programa compreende as instruções de número 092 a 100.

A seguir é calculada a distribuição granulométrica de estado estacionário, experimental, a partir dos dados de peneiramento das amostras. Consideramos como fração de peso de material no intervalo granulométrico i , em estado estacionário, a média aritmética das frações de peso no mesmo intervalo i obtidas em cada peneiramento. Como as amostras referentes ao material injetado (tempo de moagem igual a zero) tem sua distribuição granulométrica fortemente distorcida os dados referentes a estas amostras não foram usados no cálculo da distribuição granulométrica de estado estacionário. O programa calcula também o desvio padrão das frações de peso para cada intervalo granulométrico.

Uma vez obtidas as distribuições granulométricas de estado estacionário calculadas e experimental passamos ao cálculo de um fator que nos permita avaliar a qualidade de da previsão de granulometria.

Este fator, que denominamos fator de ajuste, é calculado por

$$\text{Fator de ajuste} = \frac{\sum_{I=1}^{I_{MAX}} \frac{|WSE(I) - WS(I)|}{WSE(I)}}{I_{MAX}}$$

onde

$WSE(I)$ = fração de pêsos no intervalo I , experi
mental.

$WS(I)$ = fração de pêsos no intervalo I , calcula
da.

$IMAX$ = número de intervalos granulométricos
considerados:

Este fator de ajuste, como se vê, é a média dos desvios absolutos entre os valores calculado e experimen
tal, desvios estes medidos em relação ao valor experimen
tal.

Outro fator de ajuste, que denominamos desvio mê
dio quadrático em relação ao valor experimental, foi cal
culado separadamente para comparação dos resultados d'êste trabalho com os obtidos por R.M. Moreira (18) e é defini
do como

$$\left[\frac{\sum_{I=1}^{IMAX} \left[\frac{WSE(I) - WS(I)}{WSE(I)} \right]^2}{IMAX - 1} \right] \quad (2.4.2-3)$$

Estes dois fatores, definidos arbitrariamente, de
vem ser considerados apenas como uma primeira indica
ção da qualidade da previsão de granulometria porque ambos são
fortemente influenciados pelo valor absoluto da fra
ção de material presente em cada um dos intervalos granu-

lométricos.

A decisão de considerar aceitáveis ou não os valores das funções de seleção e quebramento e, conseqüentemente, considerar aceitável a previsão de granulometria deve ser tomada tendo-se em vista a situação prática na qual estes resultados serão usados.

Depois de ter calculado a distribuição granulométrica de estado estacionário experimental, o desvio padrão e o fator de ajuste o programa imprime uma tabela contendo todas as informações referentes à moagem contínua. Os cálculos e impressão mencionados são feitos de instrução 104 a 120.

No caso da segunda fração marcada, caso em que não se faz a previsão de granulometria o programa deixa de executar as instruções 092 a 100 (previsão de granulometria pela solução de Reid) e o cálculo dos fatores de ajuste. Calcula, entretanto a granulometria de estado estacionário experimental com respectivos desvios-padrão e imprime uma tabela de resultados (instruções 122 a 126).

Conforme descrito até o momento o programa executa uma série de cálculos que permite a análise completa de uma experiência de moagem contínua com duas frações marcadas e com duas amostras peneiradas e contadas independentemente para cada tempo de moagem.

Entretanto, tendo em vista o erro estatístico de peneiramento, resolvemos acrescentar cálculos adicionais que descrevemos a seguir.

Nossa suposição é que o moinho opera em condições estacionárias de vazão e distribuição granulométrica. Assim sendo, todas as amostras colhidas para peneiramento deveriam exibir a mesma distribuição granulométrica o que,

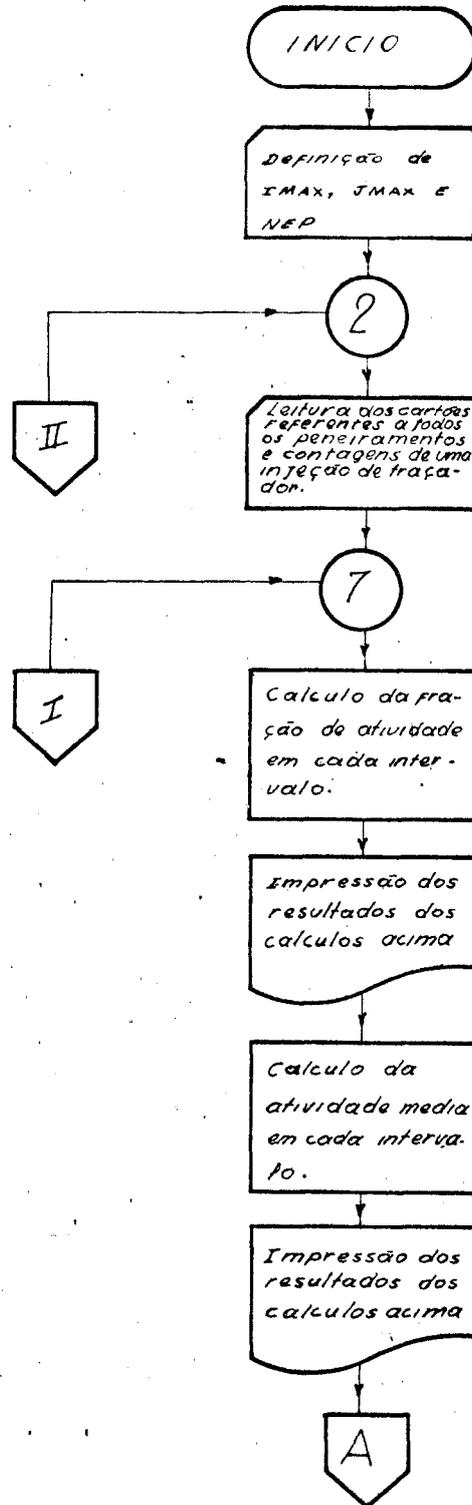
na realidade, não ocorre.

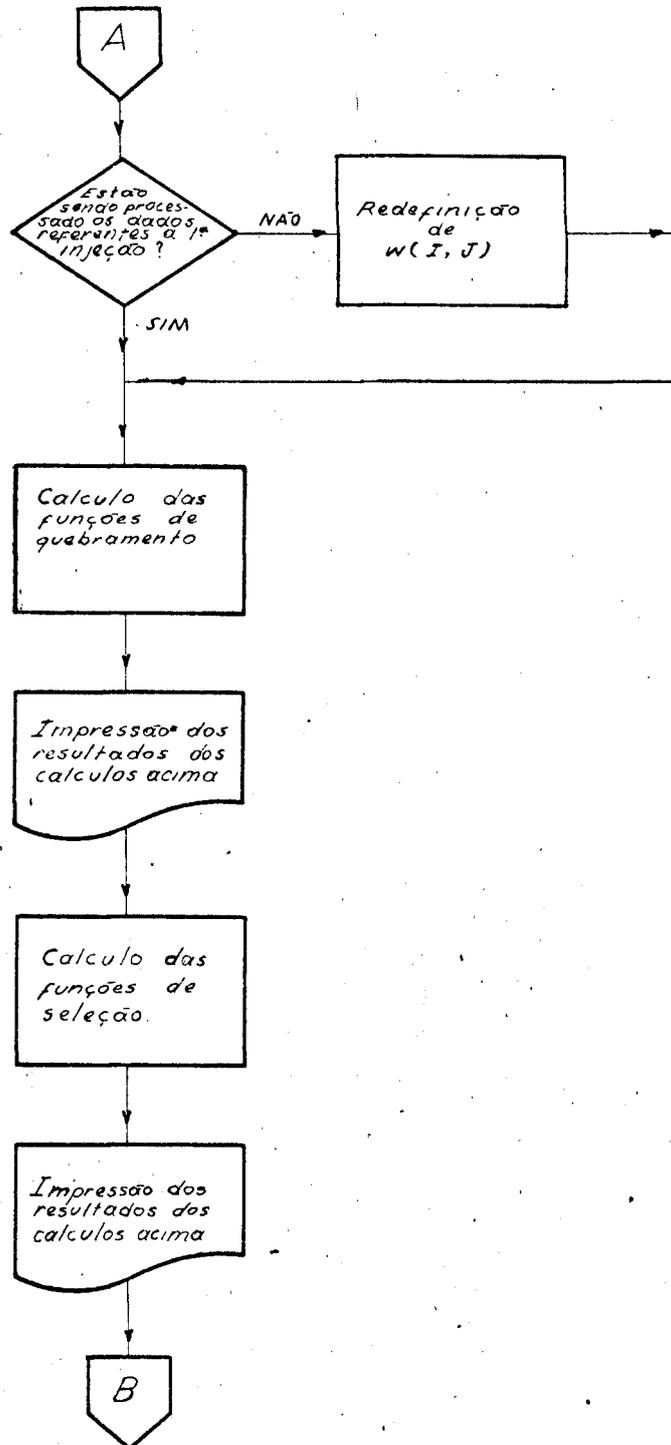
Em condições ideais (amostragem representativa, ausência de erros grosseiros, etc) deve-se atribuir ao erro estatístico de peneiramento as variações observadas nas distribuições granulométricas.

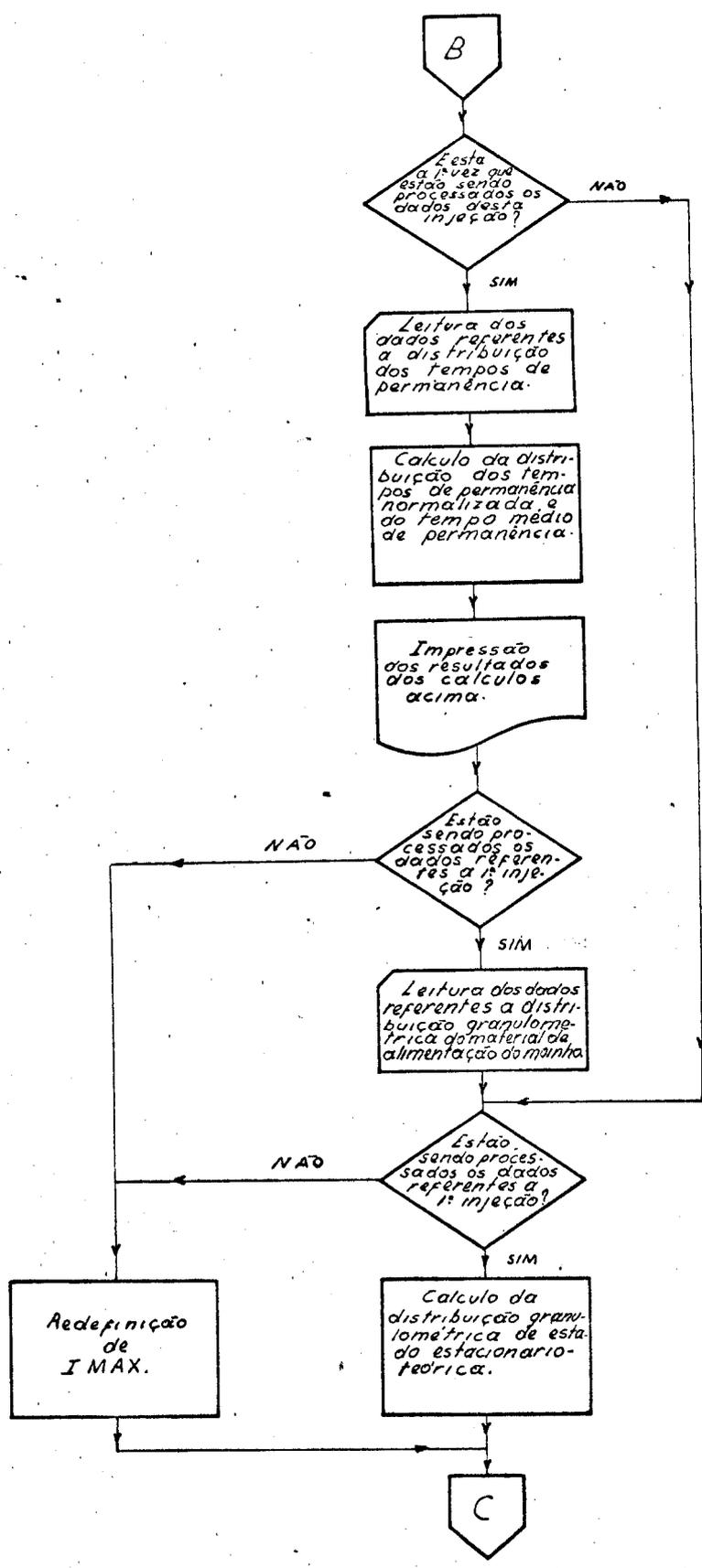
O programa de computador foi então escrito de modo a refazer todo o cálculo descrito anteriormente usando a distribuição granulométrica de estado estacionário, que é a distribuição média, em lugar das distribuições efetivamente observadas em cada peneiramento. Para isto redefinimos a variável Pêso (I, J1) (instruções 111+1 a 112) e após o término da primeira série de cálculos (instrução-126) voltamos à instrução 007 para, de novo, calcular as funções de quebramento, de seleção, granulometria de estado estacionário, etc.

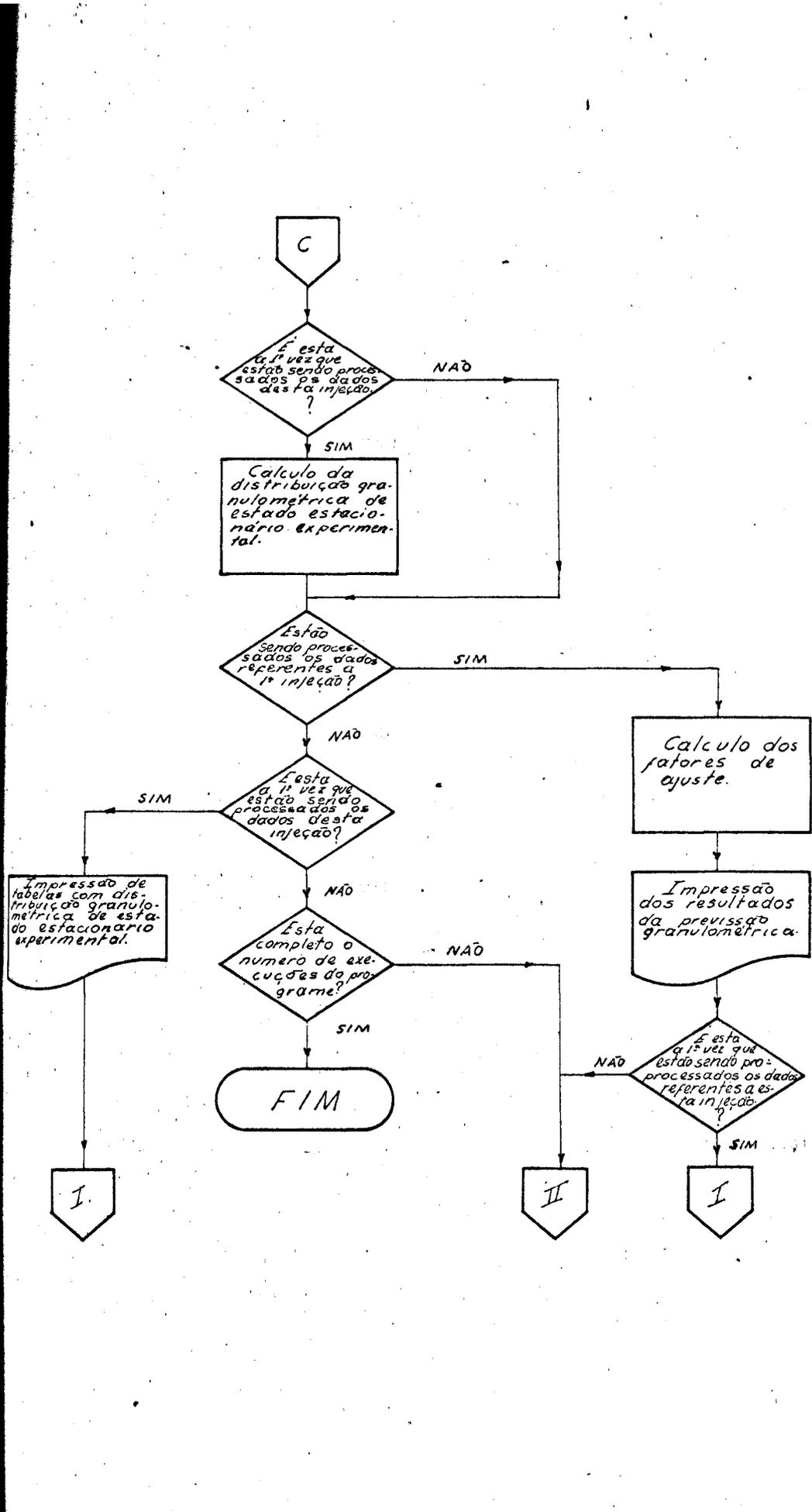
Apresentamos a seguir um diagrama de blocos, simplificado, mostrando a parte lógica do programa. Este diagrama não pretende ser completo (ou seja, não pretende mostrar todos os cálculos feitos) destinando-se apenas a mostrar ao leitor como as diferentes etapas de cálculo descritos neste parágrafo se interrelacionam. Neste diagrama foram adotados, quando possível, os símbolos recomendados pela International Organization for Standardization.

Como se pode ver pelo diagrama de blocos o programa é bastante versátil permitindo, com ligeiras modificações, previsão de granulometria na moagem em batelada, entrada de dados experimentais (funções de seleção e quebramento) calculados a parte, etc.









2.4.3. PROCESSO DE CÁLCULO INVERSO DAS FUNÇÕES DE SELEÇÃO.

Como foi dito no parágrafo anterior as funções de seleção são calculadas por um processo de cálculo inverso.

Os dados de partida para este cálculo são as funções de quebramento, determinadas experimentalmente e supostas normalizáveis, e a distribuição de atividade nas diversas frações granulométricas em função do tempo de moagem.

Por definição a função de seleção deve ter valor compreendido entre zero e um. O processo de cálculo inverso procura, neste intervalo, o conjunto de funções de seleção que minimiza a somatório dos quadrados dos desvios entre os valores experimentais e calculados. Para economia de tempo de computador usou-se o método de Fibonacci nesta pesquisa.

É a seguinte a marcha do cálculo:

Determina-se inicialmente o valor de S_1 . Para isto fixam-se dois valores para S_1 : $S_1' = 3/8$ e $S_1'' = 5/8$. Para cada um destes valores e usando-se as fórmulas da solução de Reid calculamos os valores da fração de atividade no primeiro intervalo granulométrico para cada tempo de moagem.

Sejam $w_c(t)$ estes valores e $w_1(t)$ os valores experimentais correspondentes. Calculam-se então os somatórios dos quadrados das diferenças:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} \left(w_c(t_j) - w_1(t_j) \right)^2 \quad (2.4.3-1)$$

onde t_j são os tempos de moagem empregados.

Suponhamos, para fixar idéias, que o valor de $S_1 = 3/8$ tenha fornecido o menor somatório. Redefine-se então o intervalo dentro do qual estamos procurando S_1 : ao invés de procurar S_1 no intervalo 0 a 1 passamos a procurá-lo no intervalo 0 a $5/8$. Estabelecemos dois novos valores para S_1 : $S_1' = 3/8 \times (5/8 - 0) = 15/64$ e $S_1'' = 5/8 \times (5/8 - 0) = 25/64$.

Com estes novos valores de S_1 recalculamos $w_c(t)$ e tornamos a comparar os valores obtidos para $w_c(t)$ com os valores experimentais $w_j(t)$ pela fórmula (2.4.3-1). Conhecido o valor de S_1 que dá origem ao menor somatório tornamos a redefinir o intervalo de pesquisa, a estabelecer novos valores para S_1' e S_1'' etc., e o processo continua até que os valores calculados para S_1' e S_1'' difiram entre si de menos que 0,000000001. Neste ponto o processo reiterativo termina e atribui-se a S_1 o valor da média aritmética de S_1' e S_1'' .

Uma vez obtido o valor de S_1 usamos este valor e as funções de quebramento determinados experimentalmente para, pelo mesmo processo, calcular S_2 e, assim por diante, até que todas as funções de seleção tenham sido calculadas.

Como se pode compreender este é um processo que somente o uso do computador digital de grande velocidade permite empregar. Pode parecer estranho levar-se o cálculo até o ponto mencionado acima ($|S_i' - S_i''| \leq 0.000000001$). Isto se deve ao fato de que, pelo método de Fibonacci são sempre atribuídos os mesmos valores para S_i' e S_i'' durante a pesquisa de S_i . Se dois valores de S_i forem muito próximos um do outro o programa pode, eventualmente, atribuir

buir o mesmo valor para estes dois S_i , o que ocasionará problemas com o denominador de equação (1.3.4-11). Por isto o cálculo foi levado até este ponto. Entretanto, na impressão dos resultados, usamos menos casas decimais, porque esta precisão de 10^{-9} não tem sentido físico.

Este método de cálculo, que poupa um enorme trabalho experimental, apresenta como desvantagem o fato de que cada uma das funções de seleção calculadas, à exceção da primeira, depende das anteriores. Assim sendo pequenos erros experimentais podem se propagar através das funções de seleção fazendo com que as últimas funções calculadas se afastem bastante da realidade. Gardner (comunicação verbal) acredita que não se deve empregar diretamente o método para uma série muito grande de peneiras sendo preferível a marcação e estudo independente de algumas frações intermediárias.

2.5. CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS.

2.5.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

Quando começamos a estudar o problema de moagem nosso objetivo básico era desenvolver a técnica para a previsão de granulometria de estado estacionário para o caso de moagem contínua.

Como nossa intenção é aplicar esta técnica a moinhos em escala industrial tentamos, inicialmente, obter dados para a determinação das funções de seleção e quebra e da curva de distribuição de tempos de permanência a partir de um único teste feito com o moinho operando em regime contínuo. Este processo revelou-se em certos casos (ver discussão dos resultados), claramente inadequado.

Por isto redefinimos nosso objetivo e passamos a estudar também o caso em que a determinação das funções de seleção e quebramento é feita em um teste em batelada e a determinação da curva de distribuição de tempos de permanência é feita em um teste contínuo.

Apresentamos a seguir a relação das configurações estudadas e o código usado para identificá-las.

2.5.2. CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS.

2.5.2.1. MOINHO DE BOLAS COM UMA CÂMARA.

Nestas experiências foram usadas como corpos moedores 400 bolas de 19 milímetros de diâmetro. A saída do moinho foi conservada mais ou menos aberta de acordo com o volume de minério que se desejava ter no interior do mesmo.

a) Moagem em regime contínuo.

Foram realizadas duas experiências completas com o moinho montado de tal modo que a massa de minério no interior do mesmo fôsse da ordem de 1,6 kg. Estas experiências receberão os códigos:

1C-Bo-1600-C-S-1

1C-Bo-1600-C-S-2 em que 1C significa uma câmara, Bo significa bolas, 1600 é a massa de minério, C significa regime contínuo, S significa peneiramento a seco e o último algarismo é o número de ordem da experiência.

Foram realizadas também duas experiências completas com o moinho montado de modo a reter em seu interior cerca de 2,4 kg de minério. Os códigos para estas experiências serão:

1C-Bo-2400-C-S-1

1C-Bo-2400-C-S-2

b) Moagem em batelada.

Foram feitas duas previsões de granulometria de estado estacionário para o caso de carga de minério de 1,6 kg e duas para o caso de 2,4 kg. Os dados referentes às funções de seleção e quebramento foram obtidos na referência [18] e os demais dados pertinentes das experiências mencionadas acima. Nos códigos para estes casos B significa determinação das funções de seleção e quebramento em um teste em batelada e U significa que os peneiramentos das amostras relacionadas com esta determinação foram feitos a úmido. São os seguintes os códigos usados:

1C-Bo-1600-B-U-1

1C-Bo-1600-B-U-2

1C-Bo-2400-B-U-1

1C-Bo-2400-B-U-2

2.5.2.2. MOINHO DE BOLAS COM DUAS CÂMARAS

Nestas experiências o moinho foi dividido ao meio por um septo perfurado. Na primeira câmara (mais próxima à entrada do moinho) foram colocadas 52 bolas de 25 milímetros de diâmetro e, na segunda câmara, 204 bolas de 19 milímetros de diâmetro. Deste modo tínhamos massas aproximadamente iguais de corpos moedores em ambas as câmaras. A saída do moinho foi conservada totalmente aberta.

a) Moagem em regime contínuo.

Foram feitas duas experiências completas. A massa de minério contida no interior do moinho, durante as experiências, foi da ordem de 0,9 kg. Estas experiências terão como código:

2C-Bo-900-C-S-1

2C-Bo-900-C-S-2

b) Moagem em batelada.

Foram também realizadas duas experiências completas, usando-se 900 gramas de minério no interior do moinho. Os peneiramentos necessários à obtenção das funções de seleção e quebramento foram feitos a seco em uma das experiências e a úmido na outra. Os demais dados necessários à previsão de granulometria foram retirados das experiências em regime contínuo. Os códigos para estas experiências serão:

2C-Bo-900-B-S-1

2C-Bo-900-B-U-1

2.5.2.3. MOINHO DE BARRAS COM UMA CÂMARA

Nestas experiências foram usadas como corpos moedores vinte barras de aço, cilíndricas, de 19 milímetros de diâmetro e 28 centímetros de comprimento. A saída do moinho foi conservada totalmente aberta.

a) Moagem em regime contínuo.

Foram realizadas duas experiências completas. A massa de minério contida no interior do moinho, durante as experiências, foi da ordem de 1,6 kg. Usaremos como código para estas experiências:

1C-Ba-1600-C-S-1

1C-Ba-1600-C-S-2

b) Moagem em batelada.

Foram realizadas quatro experiências completas, com 1600 gramas de minério no interior do moinho. Os peneiramentos necessários ao cálculo das funções de seleção e quebramento foram feitos a seco em duas experiências e

a úmido nas outras duas. Os demais dados necessários à previsão de granulometria foram retirados das experiências em regime contínuo. Usaremos como código para estas experiências:

1C-Ba-1600-B-S-1

1C-Ba-1600-B-S-2

1C-Ba-1600-B-U-1

1C-Ba-1600-B-U-2

2.5.3. PARÂMETROS MANTIDOS CONSTANTES.

Em todas as experiências em regime contínuo foi usada a mesma vazão de minério, de 250 gramas de minério por minuto.

Foram também mantidas constantes a velocidade do moinho (60 rpm) e a massa dos corpos moedores que, em todos os casos estudados foi da ordem de 10 kg.

2.5.4. EXPERIÊNCIAS COMPLEMENTARES.

Por motivos que explicaremos na discussão dos resultados, fizemos uma série de experiências complementares para determinar as distribuições de tempos de permanência das diversas frações granulométricas do material a moer e ainda uma moagem para determinar a granulometria de estado estacionário experimental, para o caso da moagem contínua, moinho de barras, com material de alimentação abaixo de 120 meshes. Esta experiência forneceu também dados para o cálculo da variância da distribuição de tempos de permanência, normalizada. Estes dados serão usados no Apêndice III.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

Devido a problemas que surgiram quando da previsão de granulometria de estado estacionário, que abordaremos na discussão dos resultados, julgamos conveniente analisar os dados experimentais por outros métodos além do apresentado na descrição do programa de computador. Descreveremos a seguir estes métodos e apresentaremos ao longo deste capítulo, implícita ou explicitamente, os motivos que nos levaram a adotar o método que levou aos resultados aqui mostrados.

Um conjunto completo dos dados experimentais necessários às previsões de granulometria, que inclui também os resultados destas previsões em forma numérica, é apresentado no Apêndice II. Estes dados são apresentados em tabelas impressas pelo próprio computador. Embora os dados tenham sido apresentados, em geral, com quatro algarismos significativos em certos casos alguns destes algarismos não tem significado físico. Neste capítulo apresentamos apenas as curvas de distribuição granulométrica resultantes da previsão de granulometria porque os resultados numéricos mencionados acima compreendem um número excessivo de folhas para que possamos aqui incluí-los.

3.2. MÉTODOS EMPREGADOS NA ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

No caso específico da moagem um regime contínuo o primeiro método que empregamos na tentativa de melhorar

as previsões de granulometria foi o descrito quando da a apresentação do programa de computador (ver páginas 59 e 60). Para isto recalculamos as distribuições de atividade nas amostras a partir do peso médio de material presente nas diversas frações granulométricas. Este método não apresentou melhoria sistemática nas previsões de granulometria efetuadas por motivos que veremos quando discutirmos o erro estatístico de peneiramento e foi, conseqüentemente, abandonado.

No caso da moagem em batelada os resultados foram analisados, basicamente, por dois processos: no primeiro usamos a distribuição de atividade nas frações granulométricas das amostras estudadas para o cálculo das funções de quebramento e seleção, como descrito no programa de computador; no segundo, usamos a distribuição de atividade para o cálculo das funções de quebramento (único método possível) e a distribuição de peso nas diversas frações granulométricas para o cálculo das funções de seleção. Este segundo método, que só pode ser aplicado no caso da moagem em batelada, apresentou resultados consistentemente melhores que o primeiro (discutiremos as causas quando tratarmos do problema da amostragem) e foi o adotado.

Outro ponto que pode ser questionado é a técnica de extrapolar para o tempo $t = 0$ os resultados de duas determinações de função de quebramento (feitas para tempos de moagem diferentes) na tentativa de simular um incremento diferencial de moagem. Estávamos face à alternativa de usar o valor extrapolado das funções de quebramento ou o valor determinado para o menor dos incrementos de moagem. Analisamos os resultados pelos dois processos:

os valores extrapolados apresentaram resultados sistematicamente melhores. Isto e o fato de que este processo foi o usado com sucesso por outros autores (16,18) levou-nos a adotá-lo.

Tentamos ainda, visto termos sempre duas experiências em cada configuração de moagem, usar no cálculo das funções de seleção e na previsão de granulometria a média dos valores observados experimentalmente para as funções de quebramento. Esta técnica levou, na maioria dos casos, a melhores resultados na previsão de granulometria. Acreditamos que se um número maior de experiências tivesse sido feito em cada configuração esta melhoria teria sido sistemática.

3.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Apresentamos nas páginas seguintes (figuras 2 a 9) os resultados da previsão de granulometria de estado estacionário, objetivo deste trabalho. As curvas de distribuição granulométrica aqui apresentadas o são na forma clássica para este tipo de resultados: lançamos, em papel log-log, a fração de peso de material acumulada até o limite superior do intervalo granulométrico versus este mesmo limite superior (em microns). Em cada uma destas figuras são apresentados:

- a distribuição granulométrica do material com que se alimentou o moinho,
- a distribuição granulométrica experimental de estado estacionário; juntamente com esta, em forma de barras verticais, a faixa na qual os valores usados para o cálculo desta distribuição variaram,

- a previsão de granulometria feita a partir dos dados obtidos diretamente na experiência em regime contínuo (inclusive funções de seleção e quebramento), e,
- as previsões de granulometria feitas a partir de funções de seleção e quebramento determinadas em um teste em batelada e da distribuição de tempos de permanência determinada no mesmo teste em regime contínuo cujos resultados são apresentados na figura.

Constam, em cada figura, os códigos correspondentes às experiências cujos resultados nela apresentamos.

Apresentamos a seguir (figura 10) curvas típicas da distribuição de tempos de permanência para cada uma das configurações estudadas. Estas curvas, para possibilitar a comparação entre as várias configurações, são apresentadas em unidades adimensionais (curvas $C(\theta)$ versus θ). Por motivos que veremos posteriormente é mostrada também a curva de distribuição de tempos de permanência de um "misturador perfeito". Todas as curvas mostradas nesta figura foram obtidas a partir de injeção de traçador feita com material radioativo na faixa de 60 x 80 meshes.

Durante a discussão dos resultados apresentaremos os dados e figuras adicionais que se fizerem necessários.

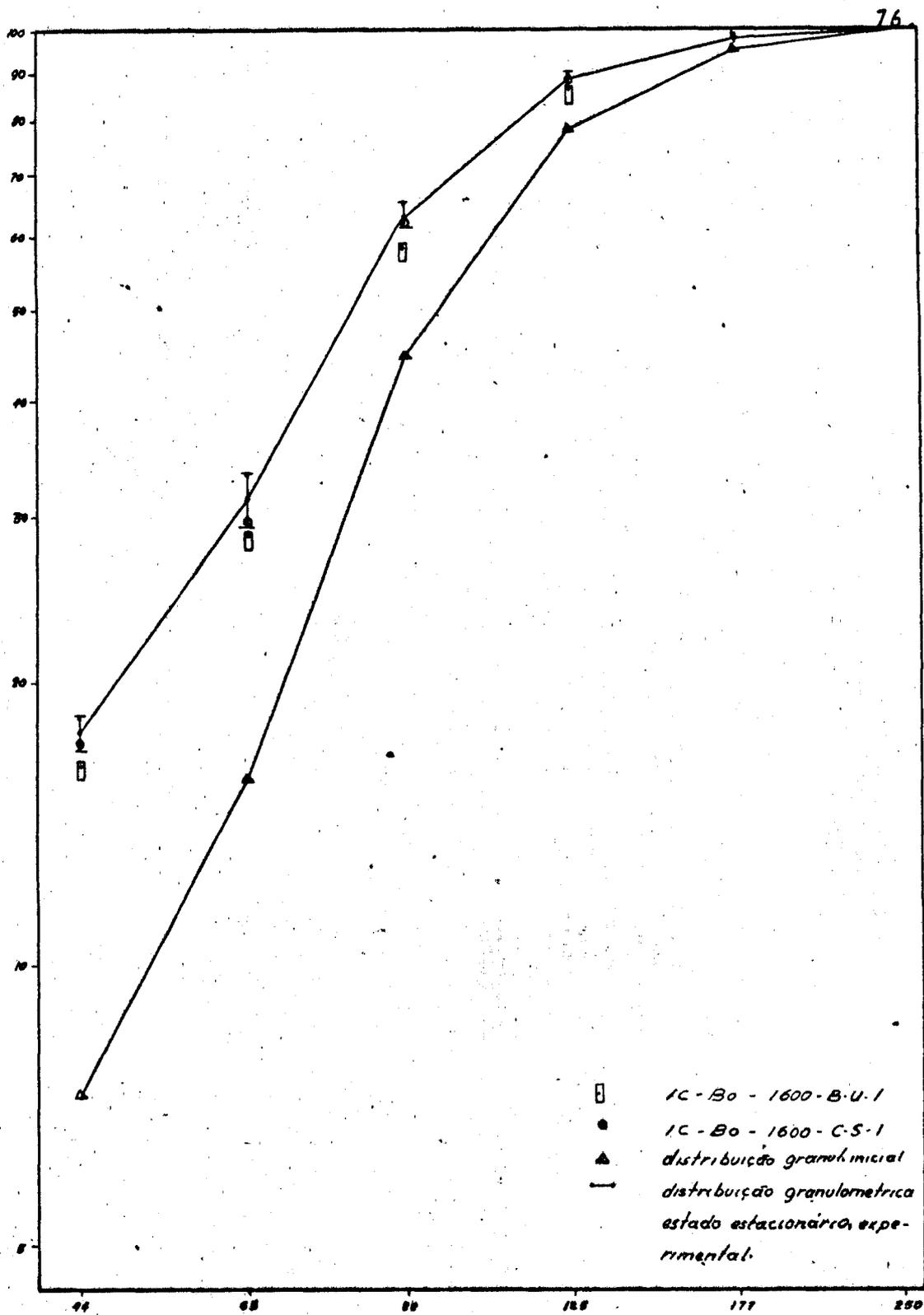


Fig. 2

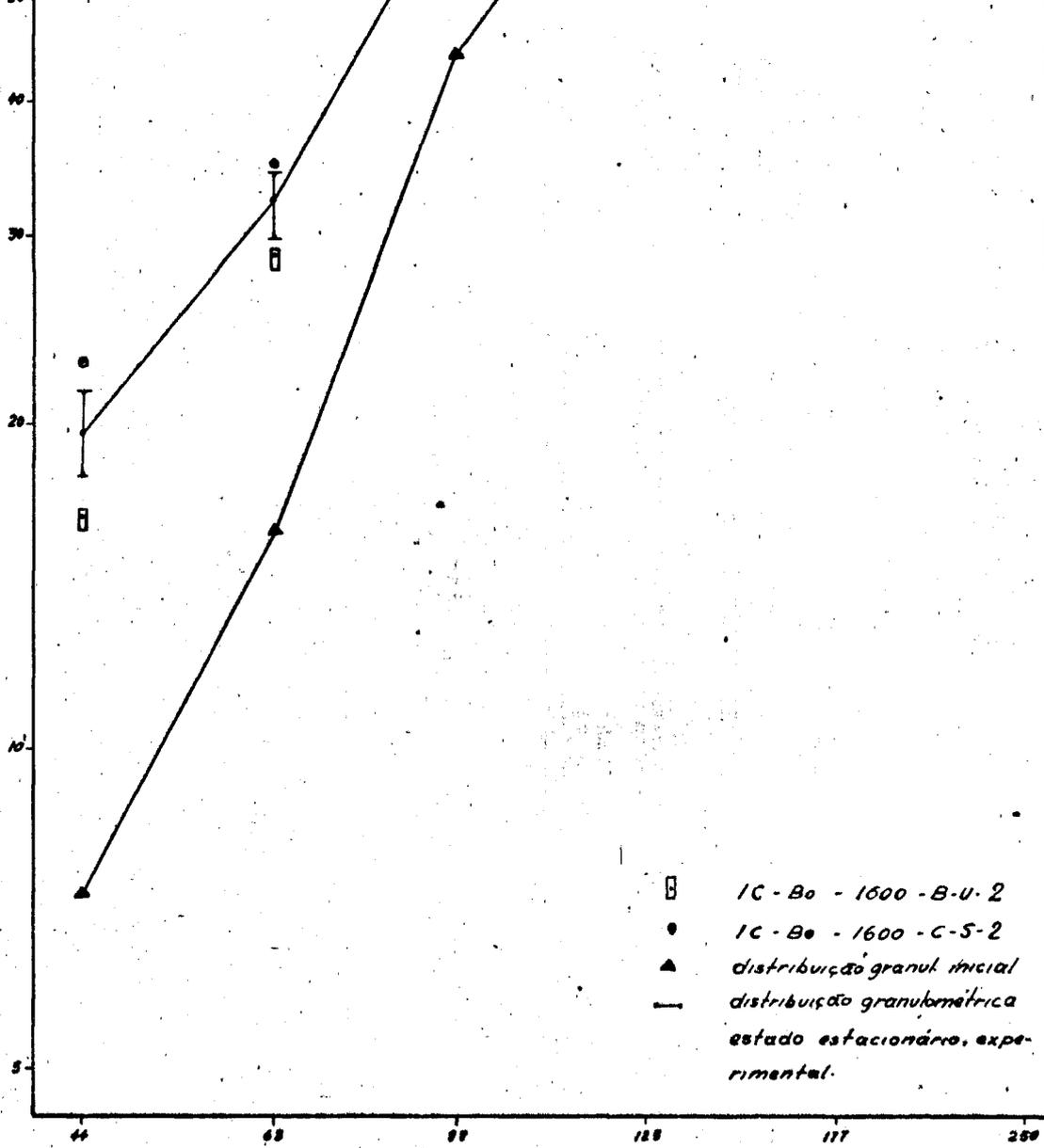


Fig. 3

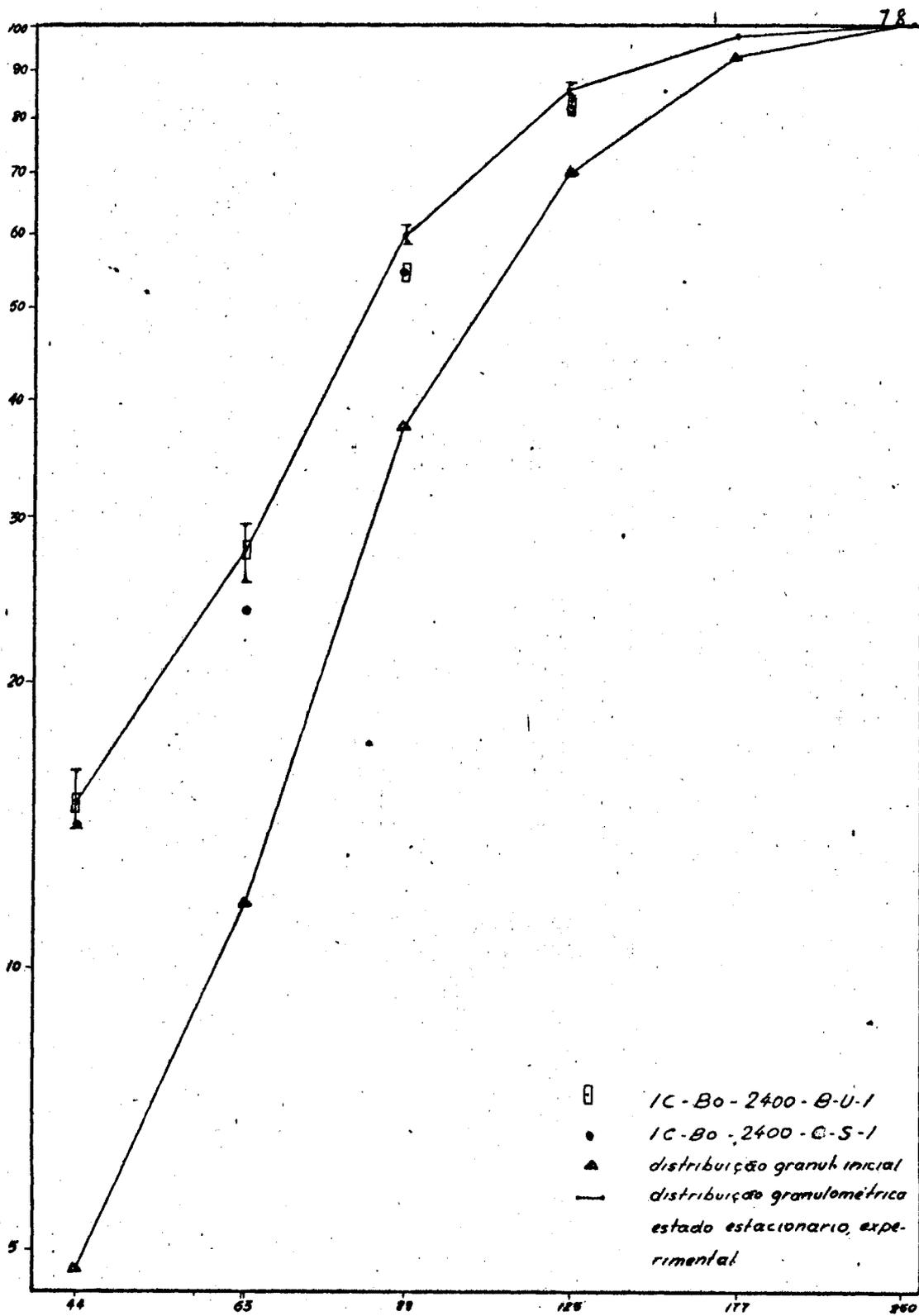
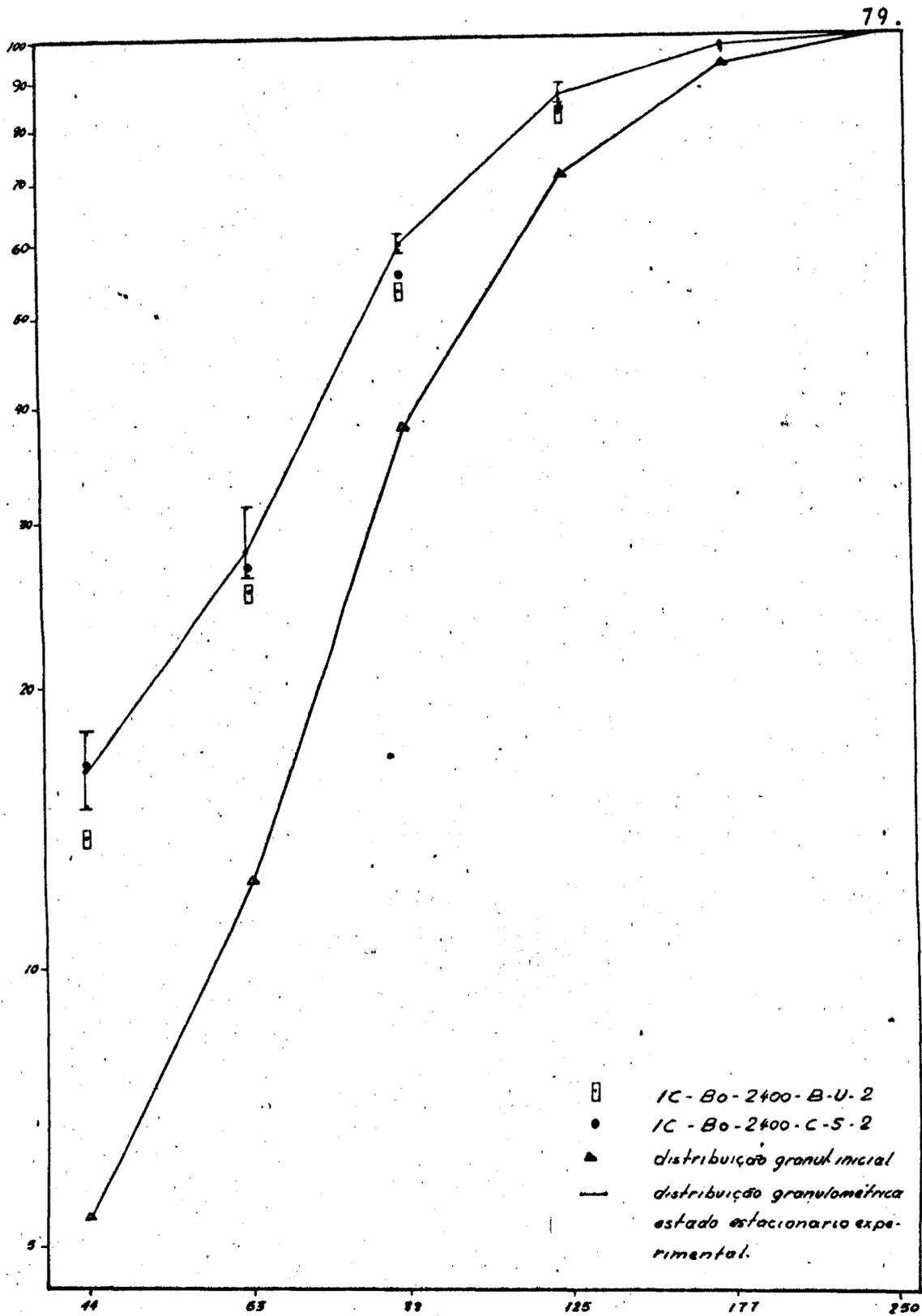


Fig. 4



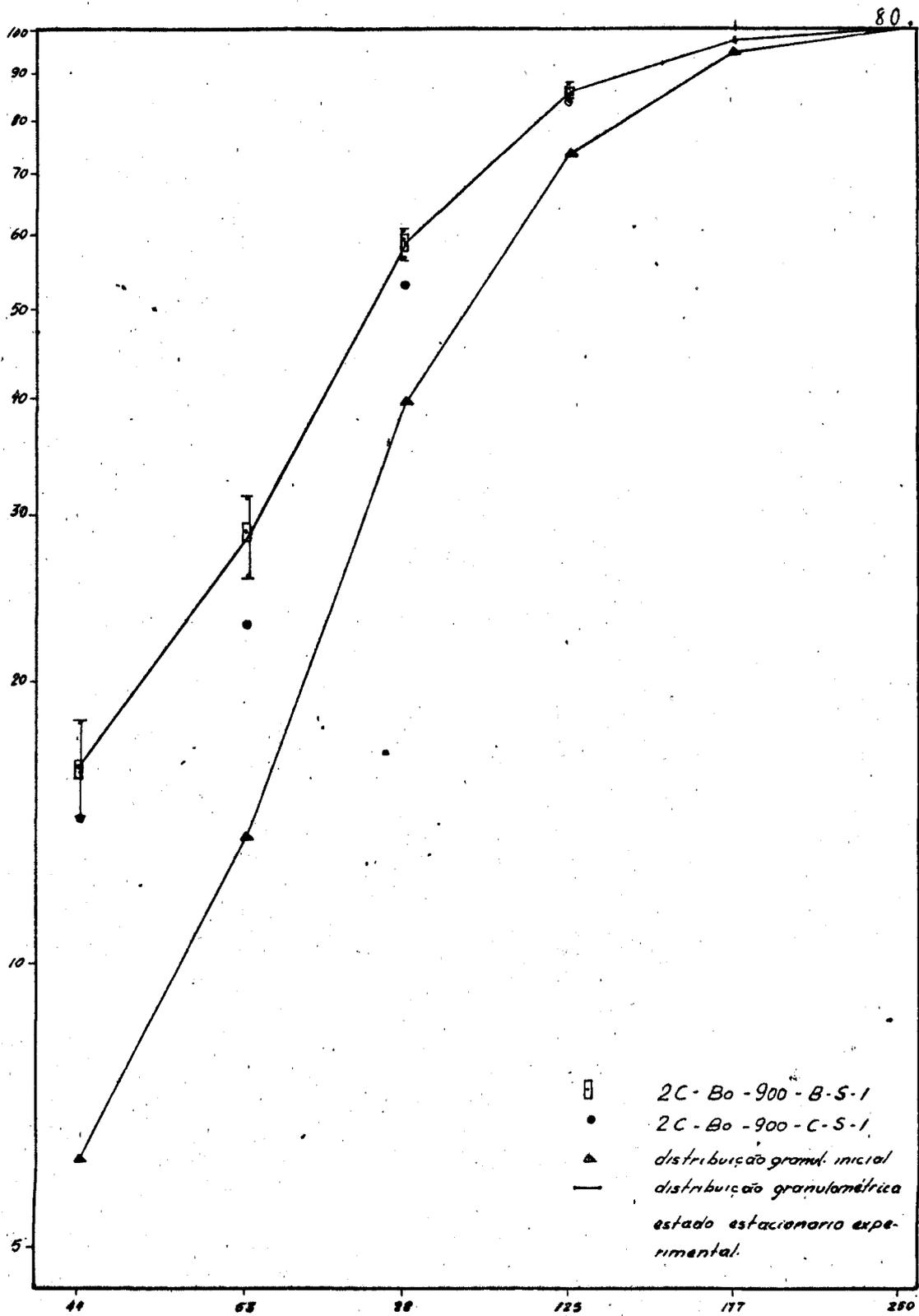


Fig. 6

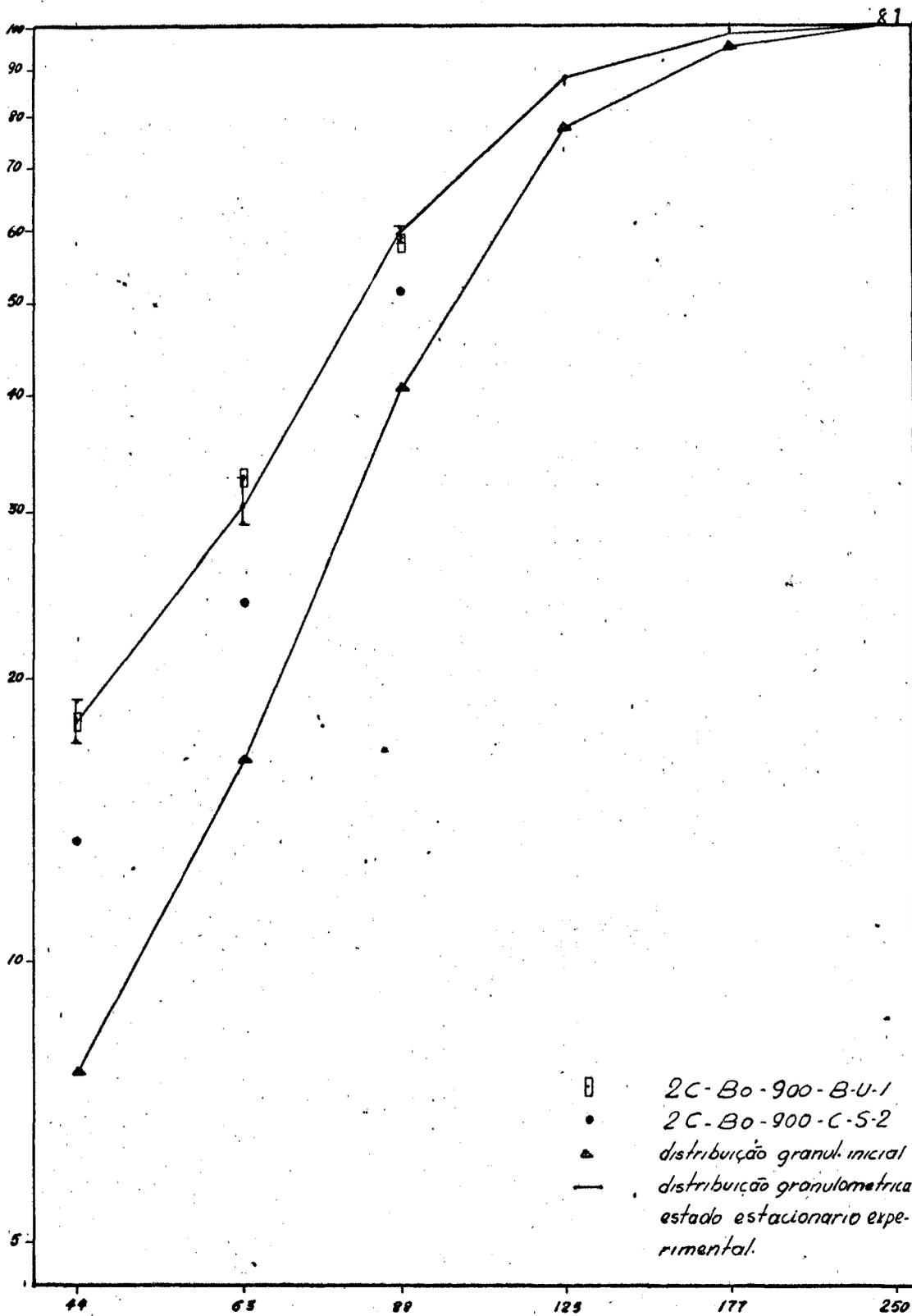


Fig. 7

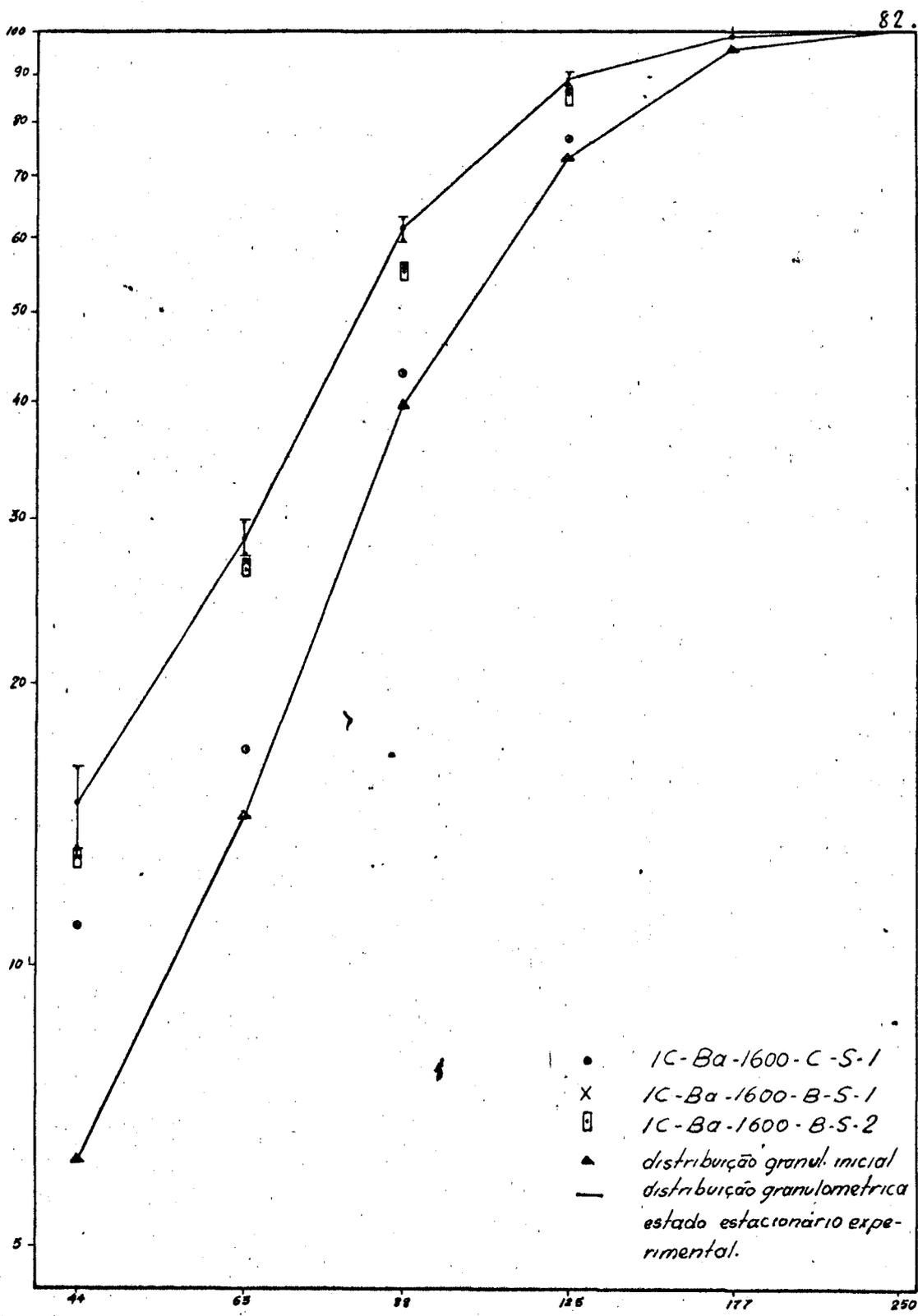


Fig. 8

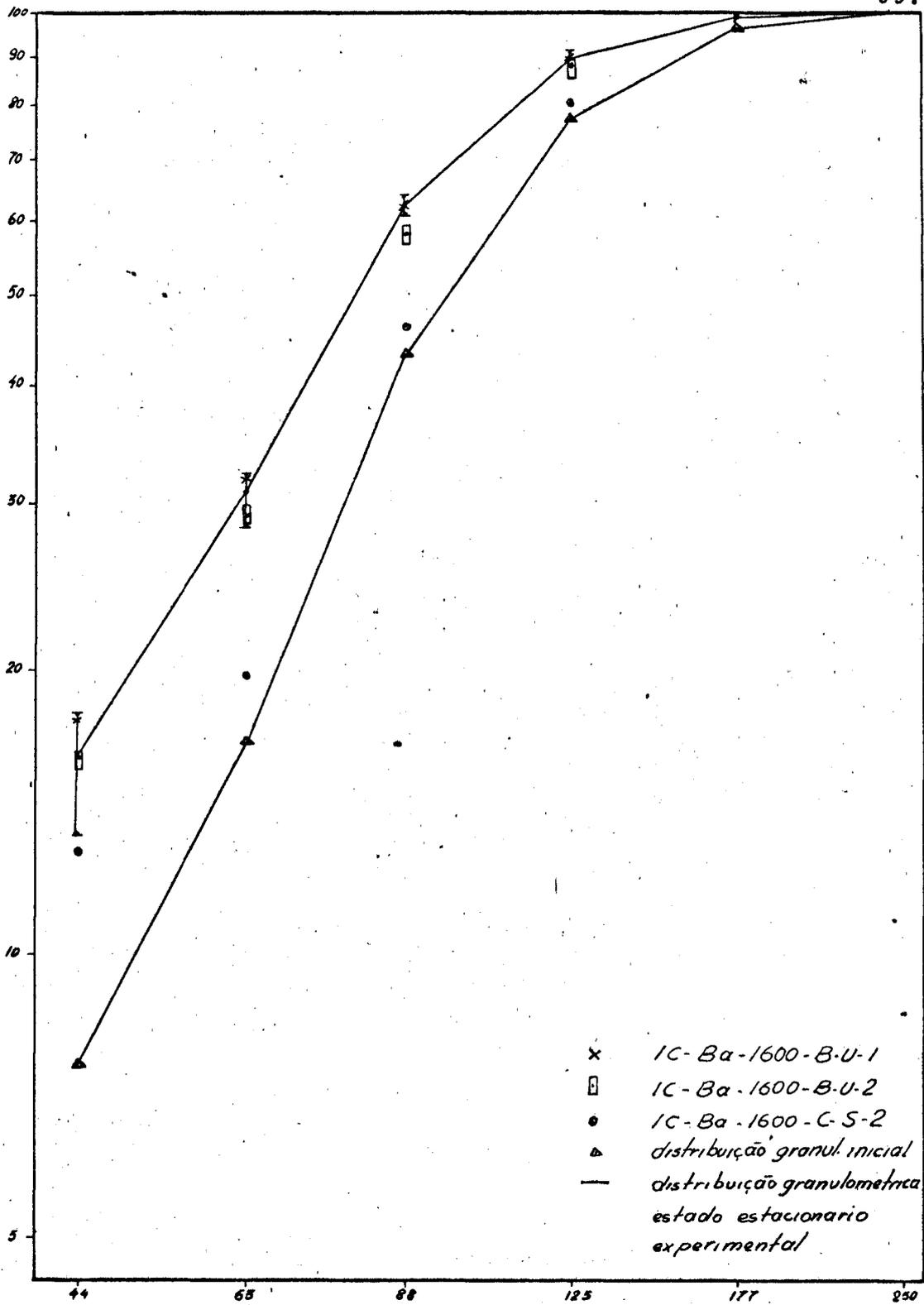


Fig. 9

- 1C-B0 - 1600
- △ 1C-B0 - 2700
- X 2C-B0 - 900
- 1C-Ba - 1600
- Misturador perfeito

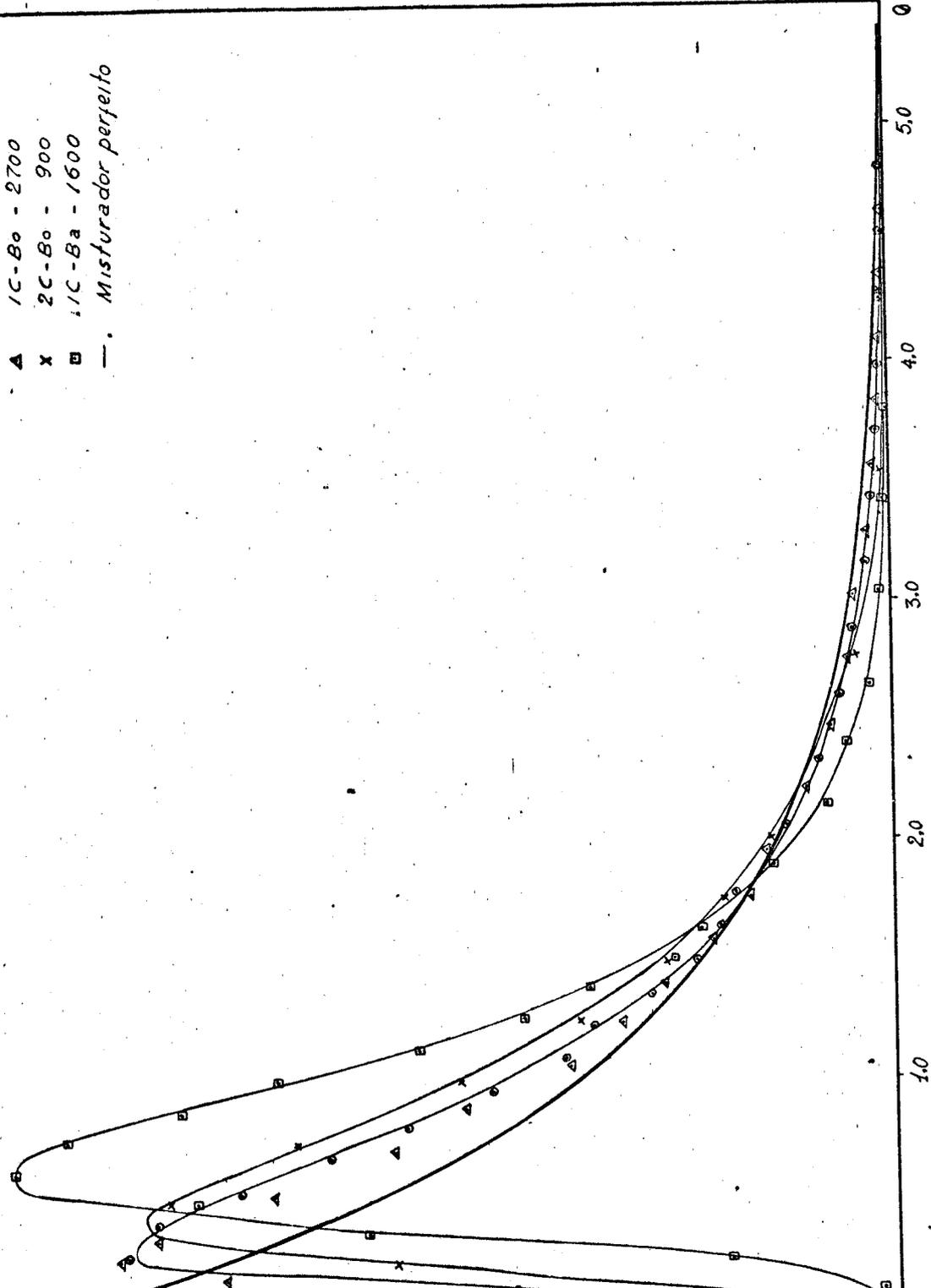


Fig. 10

3.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

A análise dos resultados das previsões de granulometria feitas a partir de funções de seleção e quebramento determinadas em um teste em regime contínuo mostrou uma clara correlação entre a qualidade do ajuste obtido e o tipo de distribuição de tempos de permanência do material no interior do moinho. Comparando as curvas de distribuição de tempos de permanência obtidas com a curva do misturador perfeito (modelo clássico usado em cinética de processos, muito bem descrito em (17), e cuja curva de resposta a um impulso é $C(\theta) = e^{-\theta}$) verificamos que quanto mais o comportamento do moinho se afastava do comportamento do misturador perfeito (ver figura 10), pior o ajuste. O caso mais desfavorável era o caso do moinho de barras. O estudo cuidadoso deste caso revelou que, surpreendentemente, a fração de atividade presente no último intervalo granulométrico diminuía com o tempo em lugar de aumentar, como seria natural. Afastada a hipótese de um erro grosseiro restava como explicação para este comportamento anômalo o fato de que possivelmente, a fração mais fina do material (-325 meshes) estava a atravessar o moinho mais rapidamente que as outras frações granulométricas. Fizemos então uma série de testes para verificar se isto ocorria. Um conjunto típico de resultados é mostrado, em unidades adimensionais, na figura 11. Estes resultados foram obtidos fazendo-se a injeção de material radioativo composto apenas da fração granulométrica que se desejava estudar e, das amostras colhidas à saída do moinho, recuperava-se (por peneiramento) para contagem esta mesma fração granulométrica. Deve-se notar que, à exceção da curva apresentada para a fração -325 meshes, não

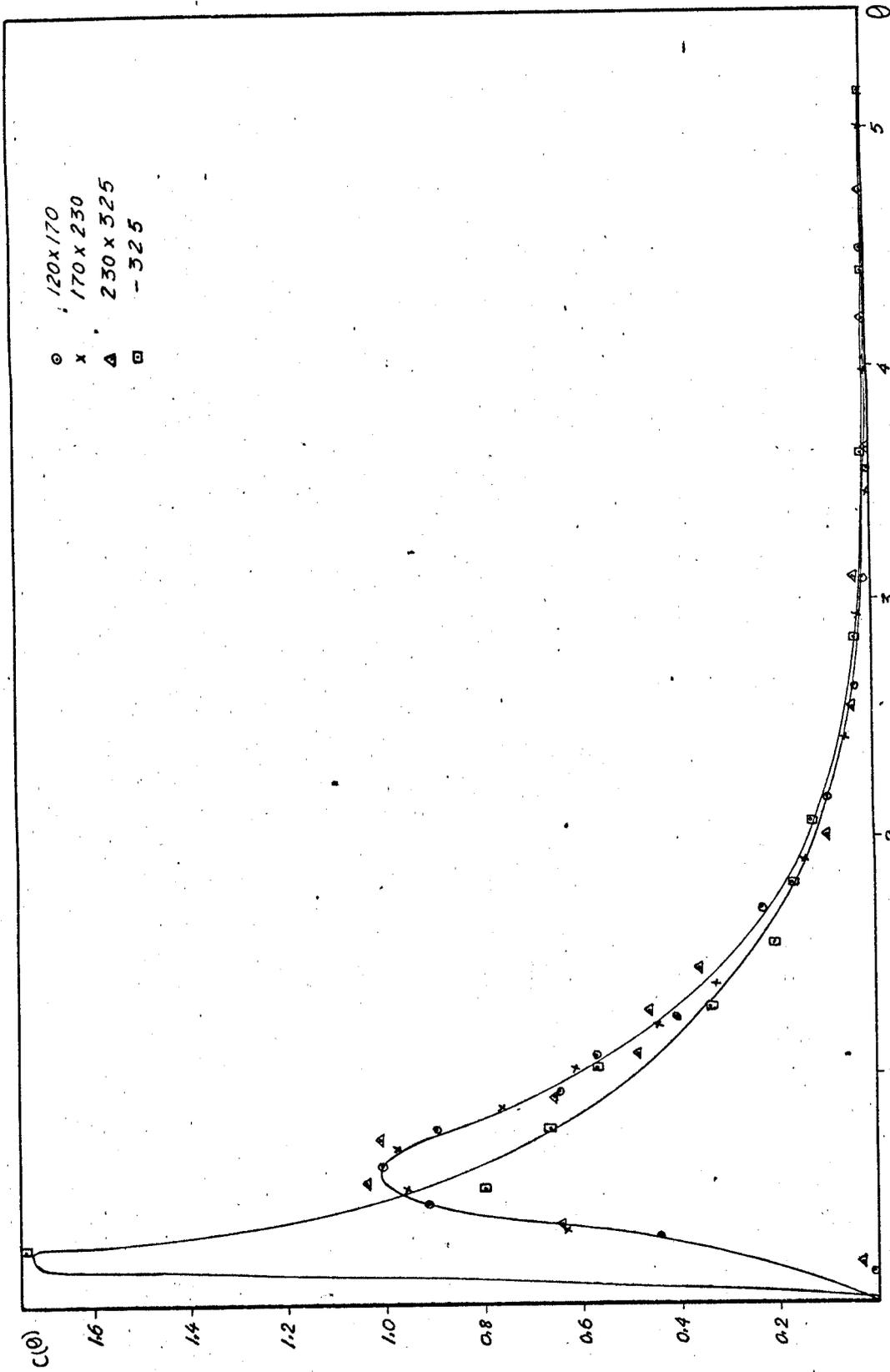


Fig. 11

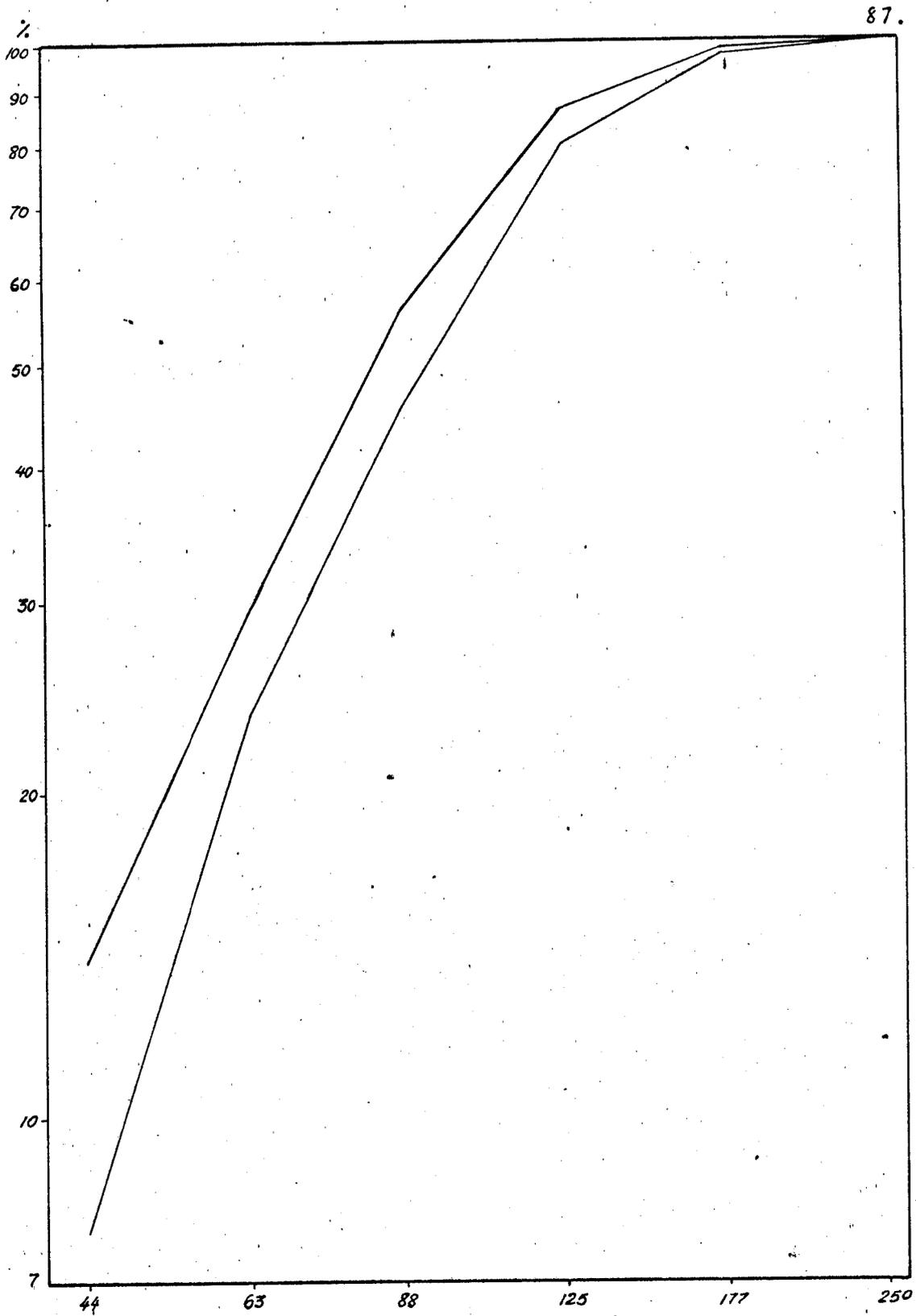


Fig. 12

se pode dizer que estas curvas representam a distribuição de tempos de permanência das frações marcadas porque, no interior do moinho, estas frações perdem traçador (por moagem) e, por definição, isto não pode ocorrer quando se procura a distribuição de tempos de permanência.

Pela figura 11 verifica-se claramente que, na realidade, a fração -325, pelo menos, atravessa o moinho mais rapidamente que as demais. Esta observação foi posteriormente confirmada na literatura (19).

Foi este resultado que nos levou a tentar determinar as funções de seleção e quebramento em um teste em batelada e usar estes resultados, em conjunto com a curva de distribuição de tempos de permanência obtida em regime contínuo, para a previsão de granulometria.

Deve-se notar que, conforme mencionado no parágrafo 2.2.5. (páginas 43 e 44), a técnica de previsão empregada continha a suposição implícita de que todas as frações granulométricas apresentavam a mesma distribuição de tempos de permanência o que, conforme verificamos, não ocorre. A explicação para o razoável ajuste obtido é que, embora tenhamos determinado a distribuição de tempos de permanência a partir de uma injeção de traçador na faixa 60 x 80 meshes o que provavelmente medimos foi uma distribuição de tempos de permanência média pois todas as frações granulométricas estavam presentes nas amostras que contamos para esta determinação.

Os resultados experimentais mostram que a técnica de determinar as funções de seleção e quebramento num teste em batelada leva a melhores previsões de granulometria. Isto, mais a estreita correlação entre o afastamento das características do "misturador perfeito" e a qualidade do ajuste, nos levam a concluir que, realmente, a

distribuição de tempos de permanência do material no interior do moinho tem influência capital na determinação das funções de seleção e quebramento. Portanto a técnica de determiná-las a partir de uma experiência em regime contínuo será tanto mais válida quanto mais próximo do comportamento do "misturador perfeito" estiver o comportamento do moinho na configuração estudada. A figura 12 apresenta uma prova adicional de que o moinho de barras está longe de se comportar como tal: nesta figura apresentamos a distribuição granulométrica do material na saída e no interior do moinho. Se o misturamento no interior do moinho fôsse satisfatório estas duas curvas deveriam se sobrepor.

Um outro problema extremamente sério nestas experiências (pelo menos no caso de um moinho em escala de laboratório) é o da amostragem. Devemos aqui considerar dois casos. Consideremos em primeiro lugar o caso da moagem em regime contínuo: neste caso somos obrigados a simplesmente coletar as amostras à saída do moinho e, consequentemente, não temos nenhum dado para afirmar que nossa amostra é representativa do material presente no interior do mesmo (no caso do moinho de barras, claramente, não o é). Além desta falta de controle sobre a amostragem somos obrigados a trabalhar com amostras pequenas (ver página 49) e, por isto, a quantidade de material em algumas frações granulométricas (principalmente na primeira fração que influi não são em todas as funções de quebramento - ver fórmula 2.4.2-1 - como também em todas as funções de seleção - ver processo de cálculo inverso) é extremamente pequena. No caso da moagem em batelada o problema da massa de material na primeira fração granulométrica é ainda

mais crítico porque, à medida que o tempo de moagem aumenta, a fração de peso de material no primeiro intervalo granulométrico tende para zero. Assim, mesmo quando se trabalha com amostras maiores (o que pode piorar as condições de peneiramento) o problema continua a existir. O moinho de barras é ainda, sob este aspecto, o caso mais crítico devido a apresentar um gradiente de granulometria (no sentido longitudinal) conforme é mencionado em (19).

Note-se que até o momento não mencionamos o erro estatístico de contagens. É nossa opinião que este erro é de pequena importância no presente trabalho e, de qualquer modo pode ser tornado desprezível desde que se contém as amostras por um tempo suficientemente longo. Muito mais importante que a estatística de contagens é o que chamaremos de estatística de grãos radioativos, ou seja, o número de grãos radioativos presentes nas amostras estudadas. Este número é forçosamente pequeno e, em vista dos problemas de amostragem já mencionados e do erro de peneiramento que veremos a seguir, constitui a mais provável fonte de erros num trabalho como o presente.

Os problemas de amostragem e de estatística de grãos, combinados, explicam porque a determinação da função de seleção a partir da distribuição de pesos levou sistematicamente a resultados melhores que a determinação a partir da distribuição de atividade: embora ainda existissem os problemas de amostragem e de pequena massa de material nas frações granulométricas estes problemas não foram exacerbados pelo problema adicional de estatística de grãos radioativos.

Outro erro a merecer atenção é o erro estatístico de peneiramento, várias vezes citado no decorrer deste trabalho. Nunca é demais frisar que não se trata nem de

um erro grosseiro nem de um erro sistemático. O erro estatístico de peneiramento é inerente ao processo de determinação de granulometria por meio de peneiras: as partículas de dimensões ligeiramente inferiores às da malha da peneira apresentam uma probabilidade não nula de serem retidas na mesma. Obviamente o problema se torna mais sério à medida que a forma dos grãos se afasta da forma esférica. De acordo com Gardner (20) este problema só se torna sério devido ao número relativamente pequeno de grãos radioativos presente na amostra a peneirar. Verificamos experimentalmente ao fazer os dois peneiramentos independentes das amostras referentes a um mesmo tempo de moagem que, se a massa de material em uma dada fração granulométrica da primeira amostra era, por exemplo, menor que a massa correspondente na segunda amostra, de um modo geral a atividade específica desta fração granulométrica da primeira amostra era maior que a correspondente da segunda amostra.

Resumindo, a um decréscimo de massa correspondia, geralmente, um acréscimo de atividade específica, e vice-versa, um fenômeno tendendo a contrabalançar o outro. Isto nos leva a crer que o erro estatístico de peneiramento é relativamente menos importante que os erros de amostragem e de estatística de grãos. Pensamos, entretanto que este assunto merece uma atenção maior para que estas observações sejam confirmadas. A literatura é pobre quanto ao erro de peneiramento sendo uma das únicas referências de que temos conhecimento a já citada referência (20).

As observações acima mencionadas podem explicar o insucesso do método de análise mencionado no início do parágrafo 3.2. pois ao tomarmos o peso médio de material presente em cada intervalo granulométrico deixamos de nos

beneficiar do efeito compensatório da variação de atividade específica.

Uma outra explicação seria ainda o problema de se saber se o moinho exibia, realmente, um estado estacionário de distribuição granulométrica. O espalhamento dos resultados referentes às distribuições granulométricas das amostras usadas para o cálculo da granulometria de estado estacionário (desvio padrão da ordem de 10%, em média, do valor medido) talvez seja um pouco grande para ser explicado por erro estatístico de peneiramento (que segundo Gardner é da ordem de 5%) vindo a reforçar a hipótese da inexistência de estado estacionário. Os problemas de amostragem, no entanto, impedem que se chegue a uma conclusão definitiva.

Conforme já mencionamos implicitamente, durante nossas experiências não ficou claramente definida a propriedade de normalização das funções de quebramento mencionadas pela primeira vez à página 13. Ficou patente, porém, que quando havia uma tendência à normalização (ou seja, quando as funções de quebramento calculadas a partir das injeções 60 x 80 e 120 x 170 tinham aproximadamente o mesmo valor) os resultados de previsão de granulometria eram melhores.

Vários autores (13, 16, 20), trabalhando com materiais e configurações de moagem bastante variados, verificaram, entretanto, a existência da propriedade de normalização. Acreditamos não ser demais insistir que se trata, apenas, de verificação experimental, sem base teórica, e que pode não se aplicar ao caso em estudo.

Apesar disto acreditamos que a propriedade de normalização se aplica a este trabalho e que os erros experimentais inevitáveis já mencionados, principalmente o pe

queno número de grãos radioativos na primeira fração granulométrica, é que não nos permitiram observá-la. Nossa convicção decorre dos precedentes citados e do fato de que os melhores ajustes se verificaram simultaneamente com a tendência à normalização.

Quanto às funções de seleção, nos casos em que era possível a determinação direta (para as duas frações marcadas) verificou-se que em apenas alguns casos o gráfico do logaritmo da fração marcada versus tempo de moagem podia se ajustar a uma linha reta, ou seja, as funções de seleção referentes a estas frações marcadas não eram constantes e independentes do tempo.

Ora, a suposição da constância de S e sua independência em relação ao tempo é básica para a solução de Reid e, como o próprio autor reconhece (12), isto nem sempre acontece.

Discussão de talhada acerca da constância de S e dos casos em que ela não ocorre (em geral devido a não homogeneidade do material em estudo) é encontrada em (20) e (18). Nesta última referência o autor, que usou exatamente o mesmo material que nós, chegou à conclusão que as causas prováveis da variação de S com o tempo eram a não homogeneidade do material moído e a modificação do ambiente de moagem. Esta última hipótese deve ser afastada porque no caso da moagem contínua o ambiente de moagem se conserva relativamente constante. Resta então a hipótese de não homogeneidade do material moído. O próprio aspecto deste material antes e após a moagem vem confirmar esta hipótese pois, se antes da moagem os grãos se apresentam com aspecto bastante brilhante, após a mesma se apresentam baços o que sugere uma diferente estrutura crist

lina para os grãos de menor dimensão.

De qualquer modo a variação de S não é muito acentuada, principalmente para tempos relativamente pequenos de moagem, o que explica que se consigam ajustes razoáveis a partir da hipótese de que S é constante e independente do tempo. Entretanto, mais uma vez somos forçados a admitir que os erros experimentais (neste caso a influência da distribuição de tempos de permanência e problemas de amostragem e estatística de grãos) não nos permitem chegar a uma conclusão definitiva sôbre a constância de S .

A determinação das funções de seleção a partir da injeção 60 x 80 e 120 x 170 não apresentou boa concordância em alguns casos. Acreditamos que os erros experimentais bem como a propagação do erro no cálculo inverso das funções de seleção (ver parágrafo 2.4.3.) são os responsáveis por esta má concordância.

A propagação do erro causada pelo cálculo inverso explica também porque a previsão de granulometria nas experiências mencionadas em 2.5.2.1.b foi relativamente pior que as previsões obtidas para as mencionadas em 2.5.2.1.a. O motivo é que as funções de seleção usadas, obtidas na referência (18) foram calculadas para uma série de oito intervalos granulométricos e nós usamos apenas as correspondentes aos seis últimos (região de nosso interesse). Usamos, portanto, funções de seleção que já traziam em si os erros acumulados na determinação das duas primeiras funções de seleção.

Finalizando, queremos frizar que as funções de quebramento variaram relativamente pouco para as várias configurações estudadas, sendo aparentemente apenas fun

ção do material. Isto é confirmado por outros autores (16,21,22), que trabalharam com outros materiais, sugerindo portanto que deve ser possível uma explicação para os valores obtidos, bem como para as propriedades de normalização observadas, a partir das características fisicas do material em estudo.

4.1. CONCLUSÕES.

O presente trabalho permite concluir, como o fizeram outros autores, que o modelo proposto por Gardner e Austin e a solução proposta por Reid podem ser usados para a previsão de granulometria quer no caso da moagem em batelada, quer no caso da moagem contínua.

Mostrou também que no caso em que se pretende determinar simultaneamente as funções de seleção e quebra e a distribuição de tempos de permanência em um único teste feito em regime contínuo deve-se esperar uma influência considerável das características de transferência de massa apresentadas pelo moinho nos resultados experimentais.

Conclui-se que a política mais segura é determinar as funções básicas em um teste em batelada e fazer-se a determinação da distribuição de tempos de permanência em um teste à parte.

Outra conclusão importante é que na análise da experiência em batelada deve-se levar em conta a distribuição de atividade nas amostras apenas para a determinação das funções de quebra. Neste cálculo o emprego do traçador radioativo é virtualmente indispensável. Para a determinação das funções de seleção deve-se partir das distribuições granulométricas para minimizar os erros de amostragem.

Os erros experimentais envolvidos não permitem afirmar-se categoricamente que as hipóteses acerca das funções básicas foram satisfeitas. Entretanto, a razoável concordância da previsão de granulometria de estado esta

cionário mostra que, se as hipóteses não forem totalmente verdadeiras, pelo menos se aproximam bastante da realidade.

Resumindo, podemos concluir que a teoria proposta por Gardner e Austin é, em geral, válida. Esta validade já havia sido demonstrada para o caso do moinho Hardgrove (20) e, por vários autores (13,18,21,22,) para o moinho de bolas de uma câmara. Entretanto, dentro da literatura a que tivemos acesso, não é relativa sua aplicação ao moinho de bolas de duas câmaras nem ao moinho de barras. Os resultados deste trabalho mostram que a teoria pode também ser aplicada a estes casos.

Quanto à técnica experimental podemos dizer que não é segura, a não ser em casos especiais, a determinação direta (num teste contínuo) das funções básicas. Entretanto, seja no caso da determinação direta, seja no caso da determinação das funções básicas em um teste em batelada, o número de variáveis que pode influir no resultado final é muito grande e todo o cuidado possível deve ser tomado durante todo o trabalho experimental.

Finalmente, a pequena variação das funções de quebramento nos vários casos estudados, é uma observação interessante (embora não original) que suscita o interesse por um estudo mais aprofundado desta função. A verificação de qualquer tipo de correlação entre função de quebramento e características físicas do material moído será um grande avanço na formulação da teoria da operação unitária de moagem.

4.2. TRABALHO FUTURO

Conforme mencionado o objetivo do presente trabalho era estudar a técnica experimental para o caso de

estudos futuros em escala industrial.

Conforme vimos na discussão dos resultados os problemas causados por diferentes distribuições de tempos de permanência para as várias frações granulométricas podem levar a resultados totalmente inaceitáveis. O uso da técnica de determinação das funções básicas e da distribuição de tempos de permanência em experiências independentes é virtualmente impossível na prática industrial: a quantidade de material, tempo e dinheiro envolvidos na realização de testes em batelada em um moinho industrial tornam este processo pouco atraente.

Dois caminhos podem ser considerados para a solução do problema.

O primeiro deles é tentar descobrir fatores de escala que permitam extrapolar os resultados obtidos em uma experiência em escala de laboratório para a escala industrial. Este caminho, que provavelmente é muito árduo, tem duas grandes vantagens: em primeiro lugar deverá dar origem a um conhecimento mais detalhado dos fenômenos que ocorrem durante a operação de moagem com evidente melhoria da teoria a respeito. Em segundo lugar, e não menos importante, permitirá a obtenção, em laboratório, de dados extremamente importantes para o projeto e, principalmente, para a operação das instalações industriais de moagem.

Outro caminho a seguir é estudar detalhadamente o problema da transferência das diversas frações granulométricas da entrada à saída do moinho. Resolvido o problema da determinação precisa das distribuições de tempos de permanência das diversas frações granulométricas, o que não é todo fácil devido às perdas de traçador (que

abandona a fração marcada por efeito da moagem), não será muito difícil a determinação das funções básicas em um teste em regime contínuo. Este teste pode ser feito com relativa facilidade em escala industrial porque não será necessário interferir com a operação da instalação de moagem. Obtidas as funções básicas e as distribuições de tempos de permanência para todas as frações granulométricas envolvidas a previsão de granulometria se torna bastante simples. Este caminho será o que, provavelmente, produzirá resultados mais rapidamente. Terá, além disto, a vantagem de fornecer dados importantes para a elaboração de um modelo matemático para a operação de moagem em regime contínuo no qual já se encontram incorporadas as características de transferência de massa do sistema em estudo. Uma primeira tentativa de elaboração de um modelo deste tipo é apresentada no Apêndice III.

Finalmente, a bibliografia que estudados mostra que a operação de peneiramento é ainda pouco compreendida e, em vista dos problemas que poderá vir apresentar, merece uma maior atenção. Este estudo pode, com facilidade, ser feito com a ajuda de traçadores radioativos. Para o caso específico dos estudos de moagem por meio de traçadores radioativos parece-nos bastante atraente, entretanto, fazer-se a determinação da distribuição de atividade das amostras colhidas por meio da técnica de decantação descrita por Gardner (23). Esta técnica, que tanto quanto sabemos, não foi ainda utilizada nos estudos de moagem, dispensaria o peneiramento das amostras (com todas as vantagens daí decorrentes), seria provavelmente mais rápida e mais adequada ao tratamento automático dos dados experimentais obtidos.

- (1) BICKLE, W.H., "Crushing and Grinding, A Bibliography", Department of Scientific and Industrial Research, Her Majesty's Stationery Office, Londres, 1958.
- (2) RITTINGER, R.P. von, "Textbook of Mineral Dressing", Ernst und Korn, Berlin, 1867.
- (3) KICK, F., Dinglers Polytech. J., 247, p. 1, 1883.
- (4) KICK, F., Dinglers Polytech. J., 250, p. 141, 1883.
- (5) BOND, F.C., Chem. Engn., 59, p. 242, 1952.
- (6) GRIFFITH, A.A., Phil. Trans. Roy. Soc., Londres, 221A, p. 163, 1920.
- (7) EPSTEIN, B., J. Franklin Inst., 244, p. 471, 1947
- (8) BROADBENT, S.R. e CALLCOTT, T.G., J. Inst. Fuel, 29 p. 191, 1956.
- (9) GARDNER, R.P. e AUSTIN, L.G., Proceedings of the First Eu European Symposium on Size Reduction, p. 127, Verlag Chemie GMBH, Frankfurt,
- (10) SEDLATSCHKE, K. e BASS, L, von, Powder Metallurgy Bull., 6, p. 148, 1953.
- (11) GAUDIN, A.M., SPEDDER, H.R. e KAUFMAN, D.F., Mining Engineering, 3, p. 969, 1951.
- (12) REID, K.J., Chem. Eng. Sci., 20, p. 953, 1965.
- (13) KELSALL, D.F. e REID, K.J., Proc. A.I.Ch.E./I.Chem E. Joint Meeting, Londres, 1965, Seção 4, p. 14.
- (14) KELSALL, D.F. e REID, K.J., Preprint 17D, A.I.Ch.E. 58th Annual Meeting, Philadelphia, 1965.

- (15) ROSE, H.E. e SULLIVAN, R.M.E., "A Treatise on the Internal Mechanics of Ball, Tube and Rod Mills", Chem. Publ. Co. Inc., New York, 1958.
- (16) KLIMPEL, R.R., Ph.D Thesis, Pennsylvania State University, 1964.
- (17) LEVENSPIEL, O., "Chemical Reaction Engineering", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967.
- (18) MOREIRA, R.M., Tese de Mestrado, Curso de Ciências e Técnicas Nucleares, U.F.M.G., 1971.
- (19) N. DRAPER, B.E. e LYNCH, A.J., Mech. and Chem. Trans. I. of Eng., Australia, MG 4 No. 2, p. 207, 1968.
- (20) GARDNER, R.P., Ph. D. Thesis, Pennsylvania State University, 1961.
- (21) BEATTIE, A.N., M.Sc. Thesis, Pennsylvania State University, 1965.
- (22) FERGUSON, J.T., M.Sc. Thesis, North Carolina State University, 1970.
- (23) GARDNER, R.P. e ELY, R.L. (Jr.), "Radioisotope Measurement Applications in Engineering", Reinhold Publ. Corp., New York, 1967.

APENDICE I

PROGRAMA DE COMPUTADOR

PROGRAMA PARA PREVISAO DE GRANULOMETRIA - / MOCON							
DOUBLE PRECISION PESO(7,10),BG(10),CB(7,10),FPI(7,10),FPA(7,10) 2,CC(7,10),CT(7,10),FAI(7,10),FAA(7,10),T(5),W(7,5),B(7,7),A(15,15) 3,S(7),WC(7,5),VAR(7),XSUM(5),YSUM(5),VARI(7),WA(7,5),WCA(7,5),CBI(
460),TI(60),CLIQ(60),C2(60),Z1(60),Z2(60),DF(60),TETA(60),F(60),WO(
57),WS(7),E(7),Y(7),WDA(7),WSA(7),PESOM(7),STD(7),WSE(7),WSEA(7),DI							
6F(7),DF1(60),TEMPO(10)							
DOUBLE PRECISION PX, SOMA, ERRO, XUUU, XL, XJ, XLL, GONUM, XUU, SUMU, SUML,							
2XJMAX, XI, CSUM, BG1, H, TMP, QUADR, FQ							
READ(1,1)IMAX, JMAX, NEP							
1 FORMAT(3I10)							
JIMAX=JMAX * 2							
2 NEP=NEP-1							
00 1 2 3 4 5 6 7							
ENTRADA DOS DADOS REFERENTES A CADA PENEIRAMENTO							
3 DO 4 J1=1, JIMAX							
READ(1,5)NF,TEMPO(J1),(PESO(I,J1),I=1,IMAX)							
READ(1,6)BG(J1),(CB(I,J1),I=1,IMAX)							
4 CONTINUE							
5 FORMAT(1I10,7F10.2)							
6 FORMAT(7F10.0)							
CALCULO DA FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO							
PX=0.							
7 DO 14 J1=1, JIMAX							
SOMA=0.							
DO 8 I=1, IMAX							
8 SOMA=SOMA + PESO(I, J1)							
DO 9 I=1, IMAX							
9 FPI(I, J1)=PESO(I, J1)/SOMA							
FPA(1, J1)=1.							
DO 10 I=2, IMAX							
10 FPA(I, J1)=FPA(I-1, J1)-FPI(I-1, J1)							
DO 11 I=1, IMAX							
CC(I, J1)=CB(I, J1)-BG(J1)							
11 CT(I, J1)=CC(I, J1)*PESO(I, J1)							
SOMA=0.							
DO 12 I=1, IMAX							
12 SOMA=SOMA+CT(I, J1)							
DO 13 I=1, IMAX							
13 FAI(I, J1)=CT(I, J1)/SOMA							
FAA(1, J1)=1.							
DO 14 I=2, IMAX							
14 FAA(I, J1)=FAA(I-1, J1)-FAI(I-1, J1)							
PX=PX+1.							
00 1 2 3 4 5 6 7							
IMPRESSAO DE RESULTADOS							
NI=0							
DO 23 J1=1, JIMAX							
NI=NI+1							
NX=NI							
15 NX=NX-2							

```

IF(NX)16,18,15
16 WRITE(3,17)
17 FORMAT(1H1)
18 WRITE(3,19)NF,TEMPO(J1)
19 FORMAT(////////,10X,'FRACAO NUMERO',I3,15X,'TEMPO DE MOAGEM',F5.1,2X
2,'MIN.',//)
WRITE(3,20)
20 FORMAT(10X,'I',4X,'PESO(I)',3X,'FPI(I)',4X,'FPA(I)',6X,'CB(I)',7X,
2'CC(I)',7X,'CT(I)',5X,'FAI(I)',4X,'FAA(I)',//)
DO 21 I=1,IMAX
21 WRITE(3,22)I,PESO(I,J1),FPI(I,J1),FPA(I,J1),CB(I,J1),CC(I,J1),CT(I
2,J1),FAI(I,J1),FAA(I,J1)
22 FORMAT(10X,I1,F10.2,2F10.4,3F12.0,2F10.4)
23 CONTINUE

```

CALCULO DA FAI MEDIA REFERENTE A CADA TEMPO DE MOAGEM

```

DO 24 I=1,IMAX
DO 24 J1=1,J1MAX,2
J=(J1+1)/2
T(J)=TEMPO(J1)
24 W(I,J)=(FAI(I,J1)+FAI(I,J1+1))/2
WRITE(3,17)
WRITE(3,25)NF
25 FORMAT(////////,10X,'FRACAO NUMERO',2X,I1,10X,'FRACAO DE ATIVIDADE E
2M CADA INTERVALO DE PENETRA VERSUS TEMPO',////////)
WRITE(3,26)(T(J),J=1,JMAX)
26 FORMAT(24X,F4.1,' MIN',4X,F4.1,' MIN',F8.1,' MIN',F8.1,' MIN',//)
DO 28 I=1,IMAX
WRITE(3,27)I,(W(I,J),J=1,JMAX)
27 FORMAT(19X,I1,4F12.4)
28 CONTINUE

```

CALCULO DAS FUNCOES DE QUEBRAMENTO ($B(I,J)=B(I,1)$ PARA O TEMPO J)
VERIFICACAO DA FRACAO SENDO PROCESSADA E CORRESPONDENTE
MODIFICACAO DE W(I,J)

```

IF(NF-2)31,29,31
29 IMAX=IMAX-2
DO 30 J=1,JMAX
DO 30 I=1,IMAX
30 W(I,J)=W(I+2,J)
31 DO 32 I=2,IMAX
DO 32 J=2,JMAX
32 B(I,J)=(W(I,J)-W(I,1))/(W(1,1)-W(I,1))
EXTRAPOLACAO LINEAR DA B(I,J) PARA T(1), OU SEJA, PARA T=0 MIN. 7
DEFINICAO DE B(1,J) E NORMALIZACAO DE B(I,1)
DO 33 I=2,IMAX
33 B(I,1)=(B(I,3)*T(2)-B(I,2)*T(3))/(T(2)-T(3))
DO 34 J=1,JMAX
34 B(1,J)=0.0000
SOMA=0.
DO 35 I=1,IMAX
35 SOMA=SOMA+B(I,1)

```

```

DO 36 I=1,IMAX
36 B(I,1)=B(I,1)/SOMA
WRITE(3,37)
37 FORMAT(////,22X,'FUNCOES DE QUEBRAMENTO VERSUS TEMPO',//)
WRITE(3,26)(T(J),J=1,JMAX)
DO 39 I=1,IMAX
38 FORMAT(1BX,'B(',I1,',',J1)',1X,4F12.4)
39 WRITE(3,38)I,(B(I,J),J=1,JMAX)

CALCULO DAS FUNCOES DE SELECAO

IMAX1=IMAX-1
DO 40 N=2,IMAX
DO 40 I=N,IMAX
40 B(I,N)=B(I-1,N-1)
DO 42 N=2,IMAX
SOMA=1.
DO 41 I=N,IMAX1
41 SOMA=SOMA-B(I,N)
42 B(IMAX,N)=SOMA
ERRO=.000000001
XUUU=1.0
A(1,1)=W(1,1)
I=1
43 XL=0.
XU=XUUU
44 XLL=(3./8.)*(XU-XL)+XL
S(I)=XLL
GONUM=-1.
GO TO 53
45 XUU=(5./8.)*(XU-XL)+XL
S(I)=XUU
GONUM=1.
GO TO 53
46 CONTINUE
IF(XUU-XLL-ERRO)47,47,48
47 S(I)=(XUU+XLL)/2.
GO TO 51
48 IF(SUMU-SUML)49,49,50
49 XL=XLL
GO TO 44
50 XU=XUU
GO TO 44
51 CONTINUE
I=I+1
IF(I-IMAX1)43,43,52
52 CONTINUE
S(IMAX)=0.0000
GO TO 62
53 I1=I-1
IF(I-1)54,57,54
54 CONTINUE
DO 55 N=1,I1
A(N,I)=0.
DO 55 K=N,I1
55 A(N,I)=A(N,I)+S(K)*B(I,K)*A(N,K)/(S(I)-S(N))

```

	A(I,I)=W(I,1)						
	DO 56 K=1, I1						
56	A(I,I)=A(I,I)-A(K,I)						
57	CONTINUE						
	DO 58 J=1, JMAX						
	WC(I,J)=0.						
	DO 58 N=1, I						
58	WC(I,J)=WC(I,J)+A(N,I)*DEXP(-S(N)*T(J))						
	SOMA=0.						
	DO 59 J=1, JMAX						
59	SOMA=SOMA+(W(I,J)-WC(I,J))**2						
	IF(GONUM)60,60,61						
60	SUML=SOMA						
	GO TO 45	2	3	4	5	6	7
61	SUMI=SOMA						
	GO TO 46						
62	CONTINUE						
	WC(I,I)=W(I,1)						
	DO 63 J=2, JMAX						
63	WC(I,J)=W(I,1)*DEXP(-S(I)*T(J))						
	IMAX1=IMAX-1						
	DO 65 J=1, JMAX						
	SOMA=1.						
	DO 64 I=1, IMAX1						
64	SOMA=SOMA-WC(I,J)						
65	WC(IMAX,J)=SOMA						
	XJMAX=JMAX						
	DO 66 I=1, IMAX						
	XI=I						
	VAR(I)=0.						
	DO 66 N=1, I						
	DO 66 J=2, JMAX						
66	VAR(I)=VAR(I)+(W(N,J)-WC(N,J))**2/(XI*XJMAX=2.)						
	DO 70 I=2, IMAX						
	DO 67 J=2, JMAX						
67	XSUM(J)=T(J)*A(I,I)*DEXP(-S(I)*T(J))						
	I1=I-1						
	DO 68 J=2, JMAX						
	YSUM(J)=0.						
	DO 68 N=1, I1						
	DO 68 K=N, I1						
68	YSUM(J)=YSUM(J)+(DEXP(-S(N)*T(J))-DEXP(-S(I)*T(J)))*S(K)*B(I,K)*A(2N,K)/((S(I)-S(N))**2)						
	CSUM=0.						
	DO 69 J=2, JMAX						
69	CSUM=CSUM+((XSUM(J)+YSUM(J))**2)						
70	VAR1(I)=(1./CSUM)*VAR(I)		4	5	6	7	
	SOMA=0.						
	DO 71 J=1, JMAX						
	WA(1,J)=1.						
	WCA(1,J)=1.						
	SOMA=SOMA+(T(J)*A(1,1)*DEXP(-S(1)*T(J))**2)						
	DO 71 I=2, IMAX						
	WA(I,J)=WA(I-1,J)-W(I-1,J)						
71	WCA(I,J)=WCA(I-1,J)-WC(I-1,J)						
	VAR1(I)=VAR(I)/SOMA						

```

WRITE(3,17)
WRITE(3,72)NF
72 FORMAT(10X,'FRACAO NUMERO',2X,I1,/)
WRITE(3,73)
73 FORMAT(10X,'FUNCOES DE QUERRAMENTO')
WRITE(3,74)(B(I,1),I=1,IMAX)
74 FORMAT(10X,7F10.4)
WRITE(3,75)
75 FORMAT(///,10X,'FUNCOES DE SELECAO')
WRITE(3,74)(S(I),I=1,IMAX)
DO 79 J=1,JMAX
WRITE(3,76)T(J)
76 FORMAT(//,35X,'TEMPO=',F5.1,' MIN.',/)
WRITE(3,77)
77 FORMAT(14X,'T',4X,'W(I,J)',3X,'WC(I,J)',3X,'WA(I,J)',3X,'WCA(I,J)',
2,3X,'VAR(I)',3X,'VAR1(I)',/)
78 FORMAT(10X,I5,6F10.4)
DO 79 I=1,IMAX
79 WRITE(3,78)I,W(I,J),WC(I,J),WA(I,J),WCA(I,J),VAR(I),VAR1(I)

CALCULO DO TMP E NORMALIZACAO DA CURVA DO TEMPO DE PERMANENCIA:

IF(IPX-2.)80,93,93
80 READ(1,81)NDTP,BG1
81 FORMAT(I10,F10.0)
READ(1,82)(CB1(J),J=1,NDTP)
82 FORMAT(8F10.2)
TI(1)=0.
DO 83 J=2,NDTP
83 TI(J)=TI(J-1)+1.
DO 84 J=1,NDTP
CLIQ(J)=CB1(J)-BG1
84 C2(J)=TI(J)*CLIQ(J)
H=1.
CALL QSF(H,CLIQ,Z1,NDTP)
CALL QSF(H,C2,Z2,NDTP)
TMP=Z2(NDTP)/Z1(NDTP)
DO 85 J=1,NDTP
DF(J)=CLIQ(J)/Z1(NDTP)
DF1(J)=TMP*CLIQ(J)/Z1(NDTP)
85 TETA(J)=TI(J)/TMP
F(1)=DF(1)
DO 86 J=2,NDTP
86 F(J)=F(J-1)+DF(J)
WRITE(3,87)NF
87 FORMAT(1H1,10X,'FRACAO NUMERO',I3,10X,'DISTRIBUICAO DO TEMPO DE PE
RMANENCIA',/)
WRITE(3,88)TMP
88 FORMAT(11X,'TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA',F10.2,2X,' MIN.',/)
WRITE(3,89)
89 FORMAT(13X,'TI(J)',4X,'CB1(J)',4X,'CLIQ(J)',4X,'DF(J)',5X,'F(J)',7
2X,'TETA(J)',2X,'DF1(J)',/)
90 FORMAT(13X,F4.0,2F11.0,2F10.4,F10.2,F10.4)
DO 91 J=1,NDTP
91 WRITE(3,90)TI(J),CB1(J),CLIQ(J),DF(J),F(J),TETA(J),DF1(J)

```

PREVISÃO DE GRANULOMETRIA - OPERAÇÃO CONTINUA, ESTADO ESTACIONÁRIO							
	IF(NF-2)92,102,102						
92	READ(1,82)(WD(I),I=1,IMAX)						
93	IF(NF-2)94,102,102						
94	A(I,1)=WD(1)						
	DO 96 I=2,IMAX						
	I1=I-1						
	DO 95 N=1,I1						
	A(N,I)=0.						
	DO 95 J=N,I1						
95	A(N,I)=A(N,I)+S(J)*B(I,J)*A(N,J)/(S(I)-S(N))						
	A(I,I)=WD(I)						
	DO 96 N=1,I1						
96	A(I,I)=A(I,I)-A(N,I)						
	DO 97 I=1,IMAX						
97	WS(I)=0.						
	DO 100 K=1,NDTP						
	DO 98 I=1,IMAX						
98	E(I)=DEXP(-S(I)*TI(K))						
	DO 99 I=1,IMAX						
	Y(I)=0.						
	DO 99 N=1,I						
99	Y(I)=Y(I)+A(N,I)*E(N)						
	DO 100 I=1,IMAX						
100	WS(I)=WS(I)+Y(I)*DF(K)						
	WOA(1)=1.						
	WSA(1)=1.						
	DO 101 I=2,IMAX						
	WOA(I)=WOA(I-1)-WD(I-1)						
101	WSA(I)=WSA(I-1)-WS(I-1)						
	GO TO 103						
102	IMAX=IMAX+2						
103	IF(PX-2.)104,113,113						
104	DO 106 I=1,IMAX						
	SOMA=0.						
	DO 105 J1=3,J1MAX						
105	SOMA=SOMA+PESO(I,J1)						
106	PESOM(I)=SOMA/(J1MAX-2)						
	SOMA=0.						
	DO 107 I=1,IMAX						
107	SOMA=SOMA+PESOM(I)						
	DO 108 I=1,IMAX						
108	WSE(I)=PESOM(I)/SOMA						
	DO 110 I=1,IMAX						
	QUADR=0.						
	DO 109 J1=3,J1MAX						
109	QUADR=QUADR+FPI(I,J1)**2						
	QUADR=QUADR/(J1MAX-2)						
110	STD(I)=DSQRT(QUADR-WSE(I)**2)						
	WSEA(1)=1.						
	DO 111 I=2,IMAX						
111	WSEA(I)=WSEA(I-1)-WSE(I-1)						
	DO 112 I=1,IMAX						
	DO 112 J1=3,J1MAX						
112	PESO(I,J1)=PESOM(I)						

```

113 IF(NF-2)114,121,121
114 FQ=0.
    DO 115 I=1,IMAX
    DIF(I)=DABS(WSE(I)-WS(I))
115 FQ=FQ+DIF(I)/WSE(I)
    FQ=FQ/IMAX
    WRITE(3,116)NF
116 FORMAT(/////,10X,'FRACAO NUMERO',2X,I1,10X,'RESULTADOS DA MOAGEM C
CONTINUA',///)
    WRITE(3,73)
    WRITE(3,74)(B(I,1),I=1,IMAX)
    WRITE(3,75)
    WRITE(3,74)(S(I),I=1,IMAX)
    WRITE(3,117)
117 FORMAT(/////,10X,'I',4X,'WO(I)',3X,'WSE(I)',4X,'WS(I)',3X,'STD(I)',
23X,'DIF(I)',3X,'WOA(I)',3X,'WSEA(I)',2X,'WSA(I)',//)
118 FORMAT(10X,I1,8F9.4)
    DO 119 I=1,IMAX
119 WRITE(3,118)I,WO(I),WSE(I),WS(I),STD(I),DIF(I),WOA(I),WSEA(I),WSA(
2I)
    WRITE(3,120)FQ
120 FORMAT(///,10X,'FATOR DE AJUSTE =',F6.4)
    IF(PX-2.)7,3,3
121 IF(PX-2.)122,127,127
122 WRITE(3,123)NF
123 FORMAT(/////,10X,'FRACAO NUMERO',2X,I1,10X,'DISTRIBUICAO GRANULOME
TRICA DO PRODUTO',///)
    IMAX=IMAX - 2
    WRITE(3,73)
    WRITE(3,74)(B(I,1),I=1,IMAX)
    WRITE(3,75)
    WRITE(3,74)(S(I),I=1,IMAX)
    IMAX=IMAX + 2
    WRITE(3,124)
124 FORMAT(///,20X,'I',5X,'PESOM(I)',3X,'WSE(I)',5X,'WSEA(I)',4X,'STD(
2I)',//)
125 FORMAT(20X,I1,3F11.2,3F11.4)
    DO 126 I=1,IMAX
126 WRITE(3,125)I,PESOM(I),WSE(I),WSEA(I),STD(I)
    GO TO 7
127 IF(NEP)128,128,2
128 CALL EXIT
    END

```

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50

Apresentamos a seguir uma lista dos principais símbolos usados no programa de computador, bem como seu significado. Os símbolos aqui apresentados são na ordem em que aparecem no programa. Deixamos de incluir os que, no decorrer do programa, servem apenas como passo intermediário nos cálculos feitos.

- IMAX = número de intervalos granulométricos do material em estudo.
- JMAX = número de incrementos de moagem usados.
- NEP = número de vezes que se deseja executar o programa.
- J1MAX = número total de amostras penéiradas.
- NF = número de ordem da injeção de traçador radioativo.
- TEMPO(J1) = tempo de moagem correspondente à amostra de número de ordem J1.
- PESO(I, J1) = massa de material na fração granulométrica I, da amostra de número de ordem J1.
- BG(J1) = background da amostra de número de ordem J1
- CB(I, J1) = contagem bruta do material da fração granulométrica I da amostra de número J1.
- PX = variável usada para definir se os cálculos serão feitos a partir do peso real presente em cada fração granulométrica ou a partir do peso médio.

- FPI(I, J1) = fração de pêsos no intervalo granulométrico I da amostra de número de ordem J1.
- FPA(I, J1) = Idem, acumulada até o limite superior do intervalo granulométrico.
- CC(I, J1) = contagem corrigida do material da fração granulométrica I da amostra de número de ordem J1
- CT(I, J1) = contagem total no intervalo granulométrico I da amostra de número de ordem J1.
- FAI(I, J1) = fração de atividade no intervalo granulométrico I da amostra de número de ordem J1.
- FAA(I, J1) = Idem, acumulada até o limite superior do intervalo granulométrico.
- NI e NX = variáveis usadas para definir o modo de impressão das tabelas.
- T(J) = tempo de moagem de número de ordem J.
- W(I, J) = fração de atividade no intervalo I para o tempo de moagem J, média, experimental.
- B(I, J) = função de quebramento $b_{i,j}$ (notação de Reid) extrapolada para o tempo de moagem zero.
- ERRO = erro máximo admissível no processo de cálculo inverso das funções de seleção.
- XUUU = máximo do intervalo inicial no processo de Fibonacci.
- XL = mínimo do intervalo no processo de Fibonacci.
- XU = máximo do intervalo no processo de Fibonacci.
- S(I) = função de seleção referente à fração granulo-

métrica I.

- $A(N, I)$ = coeficientes da solução de Reid
- $WC(I, J)$ = fração de atividade no intervalo granulométrico I para o tempo de moagem J, calculada.
- $SUML$ = soma dos quadrados das diferenças $W - WC$, para $S(I) = XL$.
- $SUMU$ = Idem, para $S(I) = XU$
- $VAR(I)$ = variância
- $WA(I, J)$ = fração de atividade acumulada até o limite superior do intervalo I para o tempo de moagem J, experimental
- $WCA(I, J)$ = Idem, calculada
- $NDTP$ = número de dados empregados para a determinação da distribuição de tempos de permanência.
- $CB1(J)$ = contagem bruta da amostra colhida para determinação da distribuição de tempos de permanência, no tempo J.
- $T1(J)$ = instante em que foi colhida a amostra $CB1(J)$.
- $CLIQ(J)$ = contagem líquida da amostra colhida no tempo J.
- TMP = tempo médio de permanência do minério no interior do moinho.
- $DF(J)$ = contagem líquida da amostra colhida no tempo J, normalizada de modo a que a área sob a curva $DF(J)$ seja igual a 1.
- $DF1(J)$ = ordenada da curva de distribuição de tempos de permanência, normalizada.

- TETA(J) = abcissa da curva de distribuição de tempos de permanência, normalizada
- F(J) = integral, de zero a J, de DF(J)
- WO(I) = distribuição granulométrica inicial
- WS(I) = distribuição granulométrica de estado estacionário, calculada-
- USE(I) = Idem, experimental.
- WOA(I) = distribuição granulométrica inicial, acumulada até o limite superior do intervalo I.
- PESOM(I) = peso médio do material da fração granulométrica I.
- STD(I) = desvio padrão das FPI(I,J1).
- WSEA(I) = distribuição granulométrica de estado estacionário, experimental, acumulada até o limite superior do intervalo I.
- WSA(I) = Idem, calculada
- FQ = fator de ajuste.

APÊNCIDE II

DADOS EXPERIMENTAIS.

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.3636 0.2229 0.1630 0.0597 0.1908

FUNCOES DE SELECAO

0.2399 0.1008 0.0590 0.0150 0.0064 0.0

I	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0476	0.0192	0.0145	0.0026	0.0047	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1702	0.0922	0.1005	0.0028	0.0084	0.9524	0.9808	0.9855
3	0.3362	0.2591	0.2570	0.0061	0.0021	0.7822	0.8886	0.8849
4	0.2884	0.3175	0.3193	0.0075	0.0018	0.4460	0.6295	0.6279
5	0.0349	0.1354	0.1323	0.0101	0.0030	0.1576	0.3120	0.3086
6	0.0727	0.1766	0.1746	0.0052	0.0020	0.0727	0.1766	0.1762

FATOR DE AJUSTE.0639

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1177

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7,22 minutos

EXPERIENCIA 1C-Bo-1600-C-S-1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7,22 minutos

FUNCOES DE SELECAO

0.1372 0.0793 0.0435 0.0230 0.0176 0.0

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4616 0.2087 0.1271 0.0814 0.1254

I	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0476	0.0192	0.0220	0.0026	0.0028	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1702	0.0922	0.1121	0.0028	0.0199	0.9524	0.9808	0.9780
3	0.3362	0.2591	0.2815	0.0061	0.0224	0.7822	0.8886	0.8660
4	0.2884	0.3175	0.2985	0.0075	0.0190	0.4460	0.6295	0.5845
5	0.0849	0.1354	0.1228	0.0101	0.0126	0.1576	0.3120	0.2860
6	0.0727	0.1716	0.1617	0.0052	0.0099	0.0727	0.1766	0.1632

FATOR DE AJUSTE 0.1094

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL 0.1342

EXPERIÊNCIA 1C-Bo-1600-B-U-1

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4659 0.1952 0.1363 0.0496 0.1530

FUNCOES DE SELECAO

0.2703 0.1369 0.0817 0.0284 0.0498 0.0

I	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0569	0.0180	0.0149	0.0011	0.0031	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1686	0.0365	0.0865	0.0034	0.0000	0.9431	0.9320	0.9851
3	0.3329	0.2513	0.2356	0.0034	0.0157	0.7745	0.8955	0.8986
4	0.2828	0.3214	0.3146	0.0102	0.0068	0.4416	0.6442	0.6630
5	0.0862	0.1280	0.1202	0.0080	0.0078	0.1588	0.3228	0.3484
6	0.0726	0.1948	0.2283	0.0140	0.0335	0.0726	0.1948	0.2282

FATOR DE AJUSTE.0815

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1160

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7,36 minutos

EXPERIENCIA 1C-Bo-1600-C-S-2

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7,36 minutos.

FUNCOES DE SELECAO

0.1372 0.0793 0.0435 0.0230 0.0176 0.0

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4816 0.2087 0.1271 0.0814 0.1254

I	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0569	0.0130	0.0257	0.0011	0.0077	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1686	0.0865	0.1117	0.0034	0.0252	0.9431	0.9820	0.9743
3	0.3329	0.2513	0.2794	0.0034	0.0281	0.7745	0.8955	0.8626
4	0.2828	0.3214	0.2949	0.0102	0.0265	0.4416	0.6442	0.5832
5	0.0862	0.1230	0.1249	0.0080	0.0031	0.1588	0.3228	0.2883
6	0.0726	0.1948	0.1637	0.0140	0.0311	0.0726	0.1948	0.1635

FATOR DE AJUSTE 0.1829

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL 0.2502

EXPERIENCIA IC-Bo-1600-B-U-2

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.3296 0.2087 0.1776 0.0848 0.1993

FUNCOES DE SELECAO

0.1691 0.0465 0.0284 0.0017 0.0116 0.0

I	WD(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WQA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0704	0.0230	0.0207	0.0014	0.0023	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.2314	0.1172	0.1594	0.0067	0.0422	0.9296	0.9770	0.9793
3	0.3235	0.2619	0.2733	0.0042	0.0114	0.6982	0.8597	0.8198
4	0.2581	0.3211	0.3087	0.0077	0.0124	0.3747	0.5973	0.5465
5	0.0690	0.1277	0.0972	0.0127	0.0305	0.1166	0.2767	0.2378
6	0.0476	0.1490	0.1397	0.0064	0.0093	0.0476	0.1490	0.1406

FATOR DE AJUSTE 1.405

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.2019

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 11,15 minutos

EXPERIENCIA IC-Bo-2400-C-S-1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 11,15 minutos

FUNCOES DE SELECAO

0.1012 0.0071 0.0265 0.0102 0.0000 0.0

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4195 0.1584 0.1475 0.1118 0.1628

I	W0(I)	WSE(I)	WS(I)	ST0(I)	DIF(I)	W0A(I)	WSEFA(I)	WSA(I)
1	0.0704	0.0230	0.0304	0.0014	0.0074	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.2314	0.1172	0.1363	0.0067	0.0191	0.9296	0.9770	0.9696
3	0.3235	0.2619	0.2890	0.0042	0.0271	0.8982	0.8598	0.8332
4	0.2581	0.3211	0.2859	0.0077	0.0352	0.3747	0.5979	0.5442
5	0.0690	0.1277	0.1172	0.0127	0.0105	0.1166	0.2760	0.2583
6	0.0476	0.1490	0.1403	0.0064	0.0027	0.0476	0.1491	0.1411

FATOR DE AJUSTE 0.1402

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL 0.1313

EXPERIENCIA IC-Bo-2400-B-U-1

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MDAGEM CONTINUA

FUNCÕES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.3675 0.2159 0.1541 0.0725 0.1900

FUNCÕES DE SELECAO

0.1828 0.0598 0.0339 0.0104 0.0190 0.0

I	WD(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0666	0.0209	0.0203	0.0008	0.0006	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.2246	0.1106	0.1469	0.0097	0.0363	0.9334	0.9791	0.9797
3	0.3327	0.2699	0.2794	0.0156	0.0095	0.7088	0.8685	0.8329
4	0.2526	0.3174	0.2870	0.0179	0.0304	0.3761	0.5986	0.5534
5	0.0698	0.1189	0.1013	0.0063	0.0176	0.1235	0.2912	0.2664
6	0.0537	0.1623	0.1660	0.0100	0.0037	0.0537	0.1623	0.1651

FATOR DE AJUSTE .1102

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1683

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 10,08 minutos EXPERIENCIA 1C-Bo-2400-C-S-2

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 10,08 minutos

FUNCOES DE SELECAO

0.1012 0.0671 0.0285 0.0102 0.0000 0.0

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4195 0.1584 0.1475 0.1118 0.1628

I	WC(I)	WSE(I)	WS(I)	SD(I)	DIF(I)	WCA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0666	0.0209	0.0309	0.0000	0.0100	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.2246	0.1106	0.1385	0.0097	0.0278	0.9334	0.9791	0.9691
3	0.3327	0.2699	0.2994	0.0156	0.0295	0.7088	0.8685	0.8307
4	0.2526	0.3174	0.2797	0.0179	0.0375	0.3761	0.5986	0.5312
5	0.0693	0.1189	0.1137	0.0083	0.0052	0.1235	0.2812	0.2514
6	0.0537	0.1625	0.1385	0.0100	0.0238	0.0537	0.1625	0.1376

FATOR DE AJUSTE 0.1910

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL 0.2607

EXPERIENCIA IC-Bo-2400-B-0-2

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4273 0.1606 0.1248 0.0763 0.2110

FUNCOES DE SELECAO

0.4095 0.1295 0.0507 0.0000 0.0274 0.0

I	WD(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0490	0.0203	0.0143	0.0030	0.0060	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.2127	0.1175	0.1423	0.0098	0.0248	0.9510	0.9797	0.9857
3	0.3408	0.2719	0.3118	0.0084	0.0399	0.7383	0.8621	0.8434
4	0.2610	0.3054	0.3021	0.0134	0.0034	0.3975	0.5902	0.5316
5	0.0747	0.1222	0.0875	0.0078	0.0347	0.1365	0.2848	0.2295
6	0.0618	0.1626	0.1274	0.0153	0.0352	0.0618	0.1626	0.1420

FATOR DE AJUSTE.1941

DESVIDO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.2370

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 3,94 minutos

EXPERIENCIA 2C-Bo-900-C-S-1

FRACAO NUMERO 1		RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA									
FUNCOES DE QUEBRAMENTO											
1	0.0	2	0.4586	3	0.2206	4	0.1408	5	0.0726	6	0.1073
FUNCOES DE SELECAO											
	0.3836		0.2116		0.1006		0.0283		0.0113		0.0
I	WG(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)			
1	0.0490	0.0203	0.0152	0.0030	0.0051	1.0000	1.0000	1.0000			
2	0.2127	0.1175	0.1120	0.0098	0.0055	0.9510	0.9797	0.9548			
3	0.3408	0.2719	0.2773	0.0084	0.0054	0.7383	0.8622	0.8728			
4	0.2610	0.3054	0.3070	0.0134	0.0016	0.3975	0.5903	0.5955			
5	0.0747	0.1222	0.1280	0.0078	0.0058	0.1365	0.2849	0.2884			
6	0.0618	0.1626	0.1458	0.0153	0.0168	0.0618	0.1627	0.1604			
FATOR DE AJUSTE = 0.0789											
DESVIO MEDIO QUADRATICO EM		RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1250									
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		3,94 minutos									
EXPERIENCIA 2C-Bo-900-B-S-1											

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4237 0.1669 0.1231 0.0678 0.2184

FUNCOES DE SELECAO

0.4720 0.1376 0.0343 0.0000 0.0000 0.0

I	WD(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0513	0.0173	0.0133	0.0027	0.0040	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1716	0.1014	0.1163	0.0053	0.0149	0.9487	0.9827	0.9867
3	0.3710	0.2833	0.3543	0.0042	0.0710	0.7771	0.8813	0.8704
4	0.2420	0.2927	0.2756	0.0070	0.0172	0.4061	0.5980	0.5161
5	0.0881	0.1253	0.1061	0.0087	0.0192	0.1641	0.3052	0.2405
6	0.0760	0.1799	0.1226	0.0056	0.0573	0.0760	0.1799	0.1344

FATOR DE AJUSTE.1932

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.2308

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 3,83 minutos

EXPERIENCIA 2C-Bo-900-C-S-2

FRACAO NUMERO 1		RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA							
FUNCOES DE QUEBRAMENTO									
1	0.0	2	0.3620	0.2506	0.1571	5	0.0739	8	0.1564
FUNCOES DE SELECAO									
	0.2923		0.1753	0.0947	0.0421		0.0000		0.0
I	WD(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WDA(I)	WSEA(I)	WSA(I)	
1	0.0513	0.0173	0.0204	0.0027	0.0031	1.0000	1.0000	1.0000	
2	0.1716	0.1014	0.1010	0.0053	0.0004	0.9487	0.9827	0.9796	
3	0.3710	0.2833	0.2894	0.0042	0.0061	0.7771	0.8813	0.8786	
4	0.2420	0.2927	0.2627	0.0070	0.0300	0.4061	0.5980	0.5892	
5	0.0881	0.1253	0.1456	0.0087	0.0203	0.1641	0.3053	0.3265	
6	0.0760	0.1799	0.1691	0.0056	0.0108	0.0760	0.1800	0.1809	
FATOR DE AJUSTE = 0.0878									
DESVIO MEDIO QUADRATICO EM		RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1202							
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		3,83 minutos							
		EXPERIENCIA 2C-Bo-900-B-U-1							

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.0637 0.0875 0.1255 0.1348 0.5886

FUNCOES DE SELECAO

0.4302 0.0000 0.0000 0.0000 0.0551 0.0

I	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0409	0.0106	0.0037	0.0011	0.0068	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.2275	0.0994	0.2306	0.0064	0.1312	0.9591	0.9894	0.9963
3	0.3344	0.2748	0.3387	0.0081	0.0639	0.7316	0.8901	0.7657
4	0.2520	0.3286	0.2575	0.0058	0.0711	0.3972	0.6152	0.4269
5	0.0837	0.1376	0.0593	0.0050	0.0783	0.1452	0.2366	0.1694
6	0.0615	0.1490	0.1134	0.0098	0.0357	0.0615	0.1490	0.1101

FATOR DE AJUSTE.5376

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.7274

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 8,01 minutos

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-C-S-1

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.5017 0.2063 0.1372 0.0619 0.0930

FUNCOES DE SELECAO

0.2051 0.0962 0.0379 0.0180 0.0029 0.0

L	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WDA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0409	0.0106	0.0109	0.0011	0.0003	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.2275	0.0994	0.1241	0.0064	0.0247	0.9591	0.9894	0.9891
3	0.3344	0.2748	0.3054	0.0081	0.0306	0.7316	0.8900	0.8651
4	0.2520	0.3286	0.2896	0.0058	0.0390	0.3972	0.6152	0.5597
5	0.0837	0.1376	0.1394	0.0050	0.0018	0.1452	0.2866	0.2700
6	0.0615	0.1490	0.1339	0.0098	0.0151	0.0615	0.1490	0.1307

FATOR DE AJUSTE = 0.1029

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1408

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 8,01 minutos

EXPERIENCIA IC-Ba-1600-B-S-1

FRACAO NUMERO 1		RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA						
FUNCOES DE QUEBRAMENTO		0.0	0.5734	0.1774	0.1119	0.0632	0.0742	
FUNCOES DE SELECAO		0.1640	0.0936	0.0396	0.0219	0.0102	0.0	
I	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0409	0.0106	0.0137	0.0011	0.0031	1.0000	1.0000	1.000
2	0.2275	0.0994	0.1265	0.0064	0.0271	0.9591	0.9894	0.986
3	0.3344	0.2748	0.3069	0.0081	0.0321	0.7316	0.8900	0.859
4	0.2530	0.3285	0.2870	0.0058	0.0415	0.3972	0.6152	0.552
5	0.0837	0.1376	0.1348	0.0050	0.0028	0.1442	0.2867	0.265
6	0.0615	0.1490	0.1354	0.0098	0.0136	0.0605	0.1491	0.131
FATOR DE AJUSTE = 0.1530								
DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1985								
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 8,01 minutos								
EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-B-S-2								

FRACAO NUMERO 1

RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.0584 0.0723 0.1225 0.1468 0.6001

FUNCOES DE SELECAO

0.4788 0.0000 0.0000 0.0000 0.0455 0.0

I	WQ(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0340	0.0093	0.0024	0.0008	0.0068	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1938	0.0912	0.1944	0.0075	0.1032	0.9660	0.9907	0.9976
3	0.3410	0.2745	0.3411	0.0087	0.0666	0.7722	0.8995	0.8032
4	0.2629	0.3137	0.2651	0.0112	0.0486	0.4312	0.6250	0.4621
5	0.0920	0.1482	0.0687	0.0034	0.0796	0.1683	0.3114	0.1970
6	0.0763	0.1631	0.1220	0.0149	0.0412	0.0763	0.1631	0.1284

FATOR DE AJUSTE .5095

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.6725

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7,82 minutos

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-C-S-2

FRACAO NUMERO 1 RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.5825 0.1689 0.1127 0.0577 0.0781

FUNCOES DE SELECAO

0.2933 0.1121 0.0519 0.0287 0.0217 0.0

I	WQ(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WQA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0340	0.0093	0.0056	0.0008	0.0037	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1938	0.0912	0.0973	0.0075	0.0061	0.9660	0.9907	0.9944
3	0.3410	0.2745	0.2844	0.0087	0.0099	0.7722	0.8995	0.8971
4	0.2629	0.3137	0.2917	0.0112	0.0220	0.4312	0.6250	0.6127
5	0.0920	0.1482	0.1424	0.0034	0.0058	0.1683	0.3113	0.3209
6	0.0763	0.1631	0.1722	0.0149	0.0091	0.0763	0.1631	0.1786

FATOR DE AJUSTE = 0.1103

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1846

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7,82

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-B-U-1

FRACAO NUMERO 1 RESULTADOS DA MOAGEM CONTINUA

FUNCOES DE QUEBRAMENTO

0.0 0.4873 0.2166 0.1288 0.0710 0.0962

FUNCOES DE SELECAO

0.2011 0.0839 0.0375 0.0175 0.0155 0.0

I	WO(I)	WSE(I)	WS(I)	STD(I)	DIF(I)	WOA(I)	WSEA(I)	WSA(I)
1	0.0340	0.0093	0.0091	0.0008	0.0002	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.1938	0.0912	0.1133	0.0075	0.0221	0.9660	0.9907	0.9909
3	0.3410	0.2745	0.2968	0.0087	0.0223	0.7722	0.8995	0.8775
4	0.2629	0.3137	0.2902	0.0112	0.0235	0.4312	0.6250	0.5807
5	0.0920	0.1432	0.1294	0.0034	0.0188	0.1683	0.3113	0.2905
6	0.0763	0.1631	0.1547	0.0149	0.0084	0.0763	0.1631	0.1611

FATOR DE AJUSTE = 0.0991

DESVIO MEDIO QUADRATICO EM RELACAO AO VALOR EXPERIMENTAL = 0.1343

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7,82 minutos

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-B-U-2

FRACAO NUMERO 1

DISTRIBUICAO DO TEMPO DE PERMANENCIA

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA 7.22 MIN.

133.

TI(J)	CB1(J)	CLIQ(J)	DF(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)
0.	147.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0
1.	23067.	22920.	0.0614	0.0614	0.14	0.4438
2.	46305.	46158.	0.1237	0.1852	0.28	0.8937
3.	44416.	44269.	0.1187	0.3038	0.42	0.8571
4.	39383.	39236.	0.1052	0.4090	0.55	0.7597
5.	33997.	33850.	0.0907	0.4997	0.69	0.6554
6.	29469.	29322.	0.0786	0.5783	0.83	0.5677
7.	24226.	24079.	0.0645	0.6429	0.97	0.4662
8.	19807.	19660.	0.0527	0.6956	1.11	0.3806
9.	18195.	18048.	0.0484	0.7439	1.25	0.3494
10.	14692.	14545.	0.0390	0.7829	1.38	0.2816
11.	11841.	11694.	0.0313	0.8143	1.52	0.2264
12.	10499.	10352.	0.0277	0.8420	1.66	0.2004
13.	9657.	9510.	0.0255	0.8675	1.80	0.1841
14.	7794.	7647.	0.0205	0.8880	1.94	0.1481
15.	6620.	6473.	0.0174	0.9053	2.08	0.1253
16.	5550.	5403.	0.0145	0.9198	2.22	0.1046
17.	4549.	4402.	0.0118	0.9316	2.35	0.0852
18.	3942.	3795.	0.0102	0.9418	2.49	0.0735
19.	3413.	3266.	0.0088	0.9506	2.63	0.0632
20.	2915.	2768.	0.0074	0.9580	2.77	0.0536
21.	2523.	2376.	0.0064	0.9643	2.91	0.0460
22.	2547.	2400.	0.0064	0.9708	3.05	0.0465
23.	1755.	1608.	0.0043	0.9751	3.18	0.0311
24.	1473.	1326.	0.0036	0.9786	3.32	0.0257
25.	1313.	1166.	0.0031	0.9818	3.46	0.0226
26.	1210.	1063.	0.0028	0.9846	3.60	0.0206
27.	1010.	863.	0.0023	0.9869	3.74	0.0167
28.	898.	751.	0.0020	0.9889	3.88	0.0145
29.	770.	623.	0.0017	0.9906	4.01	0.0121
30.	732.	585.	0.0016	0.9922	4.15	0.0113
31.	599.	452.	0.0012	0.9934	4.29	0.0088
32.	548.	401.	0.0011	0.9945	4.43	0.0078
33.	439.	292.	0.0008	0.9952	4.57	0.0057
34.	429.	282.	0.0008	0.9960	4.71	0.0055
35.	398.	251.	0.0007	0.9967	4.85	0.0049
136.	2328.	3 181.	0.0005	0.9972	4.98	0.0035
37.	309.	162.	0.0004	0.9976	5.12	0.0031
38.	333.	186.	0.0005	0.9981	5.26	0.0036
39.	256.	109.	0.0003	0.9984	5.40	0.0021

EXPERIENCIA 1C-Bo-1600-C-S-1

FRACAO NUMERO 1		DISTRIBUICAO DO TEMPO DE PERMANENCIA				
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		7.36 MIN.				
TI(J)	CB1(J)	CL1Q(J)	DF(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)
0.	150.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0
1.	13390.	13240.	0.0466	0.0466	0.14	0.3426
2.	34130.	33980.	0.1195	0.1660	0.27	0.8793
3.	32100.	31950.	0.1123	0.2784	0.41	0.8268
4.	31730.	31580.	0.1110	0.3894	0.54	0.8172
5.	26890.	26740.	0.0940	0.4835	0.68	0.6920
6.	22640.	22490.	0.0791	0.5626	0.82	0.5820
7.	19330.	19180.	0.0674	0.6300	0.95	0.4963
8.	16980.	16830.	0.0592	0.6892	1.09	0.4355
9.	14380.	14230.	0.0500	0.7392	1.22	0.3683
10.	11870.	11720.	0.0412	0.7804	1.36	0.3033
11.	10060.	9910.	0.0348	0.8153	1.49	0.2565
12.	8380.	8230.	0.0289	0.8442	1.63	0.2130
13.	7050.	6900.	0.0243	0.8685	1.77	0.1786
14.	6400.	6250.	0.0220	0.8905	1.90	0.1617
15.	5190.	5040.	0.0177	0.9082	2.04	0.1304
16.	4270.	4120.	0.0145	0.9227	2.17	0.1066
17.	3620.	3470.	0.0122	0.9349	2.31	0.0898
18.	2960.	2810.	0.0099	0.9448	2.45	0.0727
19.	2770.	2620.	0.0092	0.9540	2.58	0.0678
20.	2560.	2410.	0.0085	0.9624	2.72	0.0624
21.	1860.	1710.	0.0060	0.9685	2.85	0.0443
22.	1550.	1400.	0.0049	0.9734	2.99	0.0362
23.	1410.	1260.	0.0044	0.9778	3.13	0.0326
24.	1120.	970.	0.0034	0.9812	3.26	0.0251
25.	1010.	860.	0.0030	0.9842	3.40	0.0223
26.	860.	710.	0.0025	0.9867	3.53	0.0184
27.	835.	685.	0.0024	0.9892	3.67	0.0177
28.	640.	490.	0.0017	0.9909	3.80	0.0127
29.	570.	420.	0.0015	0.9924	3.94	0.0109
30.	550.	400.	0.0014	0.9938	4.08	0.0104
31.	530.	380.	0.0013	0.9951	4.21	0.0098
32.	430.	280.	0.0010	0.9961	4.35	0.0072
33.	370.	220.	0.0008	0.9969	4.48	0.0057
34.	320.	170.	0.0006	0.9974	4.62	0.0044
35.	350.	200.	0.0007	0.9982	4.76	0.0052
36.	2325.	175.	0.0006	0.9988	4.89	0.0045
37.	280.	130.	0.0005	0.9992	5.03	0.0034
38.	290.	140.	0.0005	0.9997	5.16	0.0036
39.	260.	110.	0.0004	1.0001	5.30	0.0028
EXPERIENCIA			1C-Bo-1600-C-S-2			

TI(J)	CB1(J)	CLIQ(J)	DF(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)
0.	170.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0
1.	23020.	22850.	0.0346	0.0346	0.09	0.3858
2.	46330.	46160.	0.0699	0.1045	0.18	0.7795
3.	53550.	53380.	0.0809	0.1854	0.27	0.9014
4.	50900.	50730.	0.0768	0.2622	0.36	0.8566
5.	42800.	42630.	0.0646	0.3267	0.45	0.7198
6.	42870.	42700.	0.0647	0.3914	0.54	0.7210
7.	39320.	39150.	0.0593	0.4507	0.63	0.6611
8.	34620.	34450.	0.0522	0.5029	0.72	0.5817
9.	33700.	33530.	0.0508	0.5536	0.81	0.5662
10.	29630.	29460.	0.0446	0.5983	0.90	0.4975
11.	26540.	26370.	0.0399	0.6382	0.99	0.4453
12.	22350.	22180.	0.0336	0.6718	1.08	0.3745
13.	21800.	21630.	0.0328	0.7045	1.17	0.3652
14.	18900.	18630.	0.0282	0.7328	1.26	0.3146
15.	17700.	17530.	0.0265	0.7593	1.35	0.2960
16.	16000.	15830.	0.0240	0.7833	1.43	0.2673
17.	14940.	14770.	0.0224	0.8056	1.52	0.2494
18.	12340.	12170.	0.0184	0.8241	1.61	0.2055
19.	11310.	11140.	0.0169	0.8410	1.70	0.1881
20.	10090.	9920.	0.0150	0.8560	1.79	0.1675
21.	9460.	9290.	0.0141	0.8700	1.88	0.1569
22.	8810.	8640.	0.0131	0.8831	1.97	0.1459
23.	7630.	7460.	0.0113	0.8944	2.06	0.1260
24.	7120.	6950.	0.0105	0.9050	2.15	0.1174
25.	6310.	6140.	0.0093	0.9142	2.24	0.1037
26.	5890.	5720.	0.0087	0.9229	2.33	0.0966
27.	5420.	5250.	0.0080	0.9309	2.42	0.0887
28.	4510.	4340.	0.0066	0.9374	2.51	0.0733
29.	3970.	3800.	0.0058	0.9432	2.60	0.0642
30.	3990.	3820.	0.0058	0.9490	2.69	0.0645
31.	3320.	3150.	0.0048	0.9537	2.78	0.0532
32.	3250.	3080.	0.0047	0.9584	2.87	0.0520
33.	3020.	2850.	0.0043	0.9627	2.96	0.0481
34.	2950.	2780.	0.0042	0.9669	3.05	0.0469
35.	2473.	2303.	0.0035	0.9704	3.14	0.0389
36.	2310.	2140.	0.0032	0.9737	3.23	0.0361
37.	1990.	1820.	0.0028	0.9764	3.32	0.0307
38.	1960.	1790.	0.0027	0.9791	3.41	0.0302
39.	1820.	1650.	0.0025	0.9816	3.50	0.0279
40.	1570.	1400.	0.0021	0.9838	3.59	0.0236
41.	1400.	1230.	0.0019	0.9856	3.68	0.0208
42.	1280.	1110.	0.0017	0.9873	3.77	0.0187
43.	1170.	1000.	0.0015	0.9888	3.86	0.0169
44.	1060.	890.	0.0013	0.9902	3.95	0.0150
45.	960.	790.	0.0012	0.9914	4.04	0.0133
46.	870.	700.	0.0011	0.9924	4.13	0.0118
47.	790.	620.	0.0009	0.9934	4.22	0.0105
48.	730.	560.	0.0008	0.9942	4.30	0.0095
49.	670.	500.	0.0008	0.9950	4.39	0.0084
50.	610.	440.	0.0007	0.9956	4.48	0.0074
51.	560.	390.	0.0006	0.9962	4.57	0.0066
52.	520.	350.	0.0005	0.9967	4.66	0.0059
53.	480.	310.	0.0005	0.9972	4.75	0.0052
54.	450.	280.	0.0004	0.9976	4.84	0.0047
55.	420.	250.	0.0004	0.9980	4.93	0.0042
56.	390.	220.	0.0003	0.9983	5.02	0.0037
57.	360.	190.	0.0003	0.9986	5.11	0.0032
58.	340.	170.	0.0003	0.9989	5.20	0.0029
59.	330.	160.	0.0002	0.9991	5.29	0.0027

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		10.08 MIN.					
TI(J)	CB1(J)	CL10(J)	DE(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)	
0.	160.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.	26880.	26720.	0.0448	0.0448	0.10	0.4514	
2.	53290.	53130.	0.0890	0.1338	0.20	0.8976	
3.	50900.	50740.	0.0850	0.2189	0.30	0.8572	
4.	51100.	50940.	0.0854	0.3042	0.40	0.8606	
5.	45130.	44970.	0.0754	0.3796	0.50	0.7597	
6.	36640.	36480.	0.0611	0.4407	0.60	0.6163	
7.	35100.	34940.	0.0586	0.4993	0.69	0.5903	
8.	31460.	31300.	0.0525	0.5518	0.79	0.5288	
9.	27920.	27760.	0.0465	0.5983	0.89	0.4690	
10.	24760.	24600.	0.0412	0.6395	0.99	0.4156	
11.	23040.	22880.	0.0383	0.6779	1.09	0.3865	
12.	19820.	19660.	0.0329	0.7108	1.19	0.3321	
13.	19080.	18920.	0.0317	0.7425	1.29	0.3196	
14.	16350.	16190.	0.0271	0.7696	1.39	0.2735	
15.	15020.	14860.	0.0249	0.7946	1.49	0.2510	
16.	13150.	12990.	0.0218	0.8163	1.59	0.2195	
17.	11790.	11630.	0.0195	0.8358	1.69	0.1965	
18.	10700.	10540.	0.0177	0.8535	1.79	0.1781	
19.	10100.	9940.	0.0167	0.8701	1.88	0.1679	
20.	8480.	8320.	0.0139	0.8841	1.98	0.1406	
21.	7530.	7370.	0.0124	0.8964	2.08	0.1245	
22.	6670.	6510.	0.0109	0.9073	2.18	0.1100	
23.	6340.	6180.	0.0104	0.9177	2.28	0.1044	
24.	5340.	5180.	0.0087	0.9264	2.38	0.0875	
25.	5060.	4900.	0.0082	0.9346	2.48	0.0828	
26.	4549.	4389.	0.0074	0.9420	2.58	0.0741	
27.	4040.	3880.	0.0065	0.9485	2.68	0.0655	
28.	3740.	3580.	0.0060	0.9545	2.78	0.0605	
29.	3550.	3390.	0.0057	0.9601	2.88	0.0573	
30.	3020.	2860.	0.0048	0.9649	2.98	0.0483	
31.	2780.	2620.	0.0044	0.9693	3.08	0.0443	
32.	2460.	2300.	0.0039	0.9732	3.17	0.0389	
33.	2290.	2130.	0.0036	0.9767	3.27	0.0360	
34.	2080.	1920.	0.0032	0.9800	3.37	0.0324	
35.	1770.	1610.	0.0027	0.9827	3.47	0.0272	
36.	1720.	1560.	0.0026	0.9853	3.57	0.0264	
37.	1380.	1220.	0.0020	0.9873	3.67	0.0206	
38.	1250.	1090.	0.0018	0.9891	3.77	0.0184	
39.	1340.	1180.	0.0020	0.9911	3.87	0.0199	
40.	1010.	850.	0.0014	0.9925	3.97	0.0144	
41.	900.	740.	0.0012	0.9938	4.07	0.0125	
42.	800.	640.	0.0011	0.9949	4.17	0.0108	
43.	720.	560.	0.0009	0.9958	4.27	0.0095	
44.	650.	490.	0.0008	0.9966	4.36	0.0083	
45.	570.	410.	0.0007	0.9973	4.46	0.0069	
46.	540.	380.	0.0006	0.9979	4.56	0.0064	
47.	480.	320.	0.0005	0.9985	4.66	0.0054	
48.	440.	280.	0.0005	0.9990	4.76	0.0047	
49.	400.	240.	0.0004	0.9994	4.86	0.0041	
50.	370.	210.	0.0004	0.9997	4.96	0.0035	
51.	340.	180.	0.0003	1.0000	5.06	0.0030	
52.	320.	160.	0.0003	1.0003	5.16	0.0027	
53.	300.	140.	0.0002	1.0005	5.26	0.0024	
54.	280.	120.	0.0002	1.0007	5.36	0.0020	
55.	260.	100.	0.0002	1.0009	5.46	0.0017	

FRACAO NUMERO 1		DISTRIBUICAO DO TEMPO DE PERMANENCIA				
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		3.94 MIN.				
TI(J)	CB1(J)	CL1Q(J)	DF(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)
0.	170.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0
1.	76150.	75980.	0.1481	0.1481	0.25	0.5829
2.	110000.	109830.	0.2141	0.3622	0.51	0.8426
3.	90880.	90710.	0.1768	0.5391	0.76	0.6959
4.	65900.	65730.	0.1281	0.6672	1.02	0.5043
5.	47560.	47390.	0.0924	0.7596	1.27	0.3636
6.	34620.	34450.	0.0672	0.8267	1.52	0.2643
7.	25870.	25700.	0.0501	0.8768	1.78	0.1972
8.	18700.	18530.	0.0361	0.9130	2.03	0.1422
9.	11180.	11010.	0.0215	0.9344	2.29	0.0845
10.	8650.	8480.	0.0165	0.9510	2.54	0.0651
11.	5930.	5760.	0.0112	0.9622	2.80	0.0442
12.	3790.	3620.	0.0071	0.9692	3.05	0.0278
13.	2770.	2600.	0.0051	0.9743	3.30	0.0199
14.	1830.	1660.	0.0032	0.9775	3.56	0.0127
15.	1380.	1210.	0.0024	0.9799	3.81	0.0093
16.	1030.	860.	0.0017	0.9816	4.07	0.0066
17.	780.	610.	0.0012	0.9828	4.32	0.0047
18.	650.	480.	0.0009	0.9837	4.57	0.0037
19.	420.	250.	0.0005	0.9842	4.83	0.0019
20.	320.	150.	0.0003	0.9845	5.08	0.0012
21.	280.	110.	0.0002	0.9847	5.34	0.0008
22.	340.	170.	0.0003	0.9850	5.59	0.0013
23.	190.	20.	0.0000	0.9851	5.84	0.0002
24.	200.	30.	0.0001	0.9851	6.10	0.0002
25.	210.	40.	0.0001	0.9852	6.35	0.0003
26.	200.	30.	0.0001	0.9853	6.61	0.0002
27.	190.	20.	0.0000	0.9853	6.86	0.0002
28.	190.	20.	0.0000	0.9853	7.11	0.0002
29.	180.	10.	0.0000	0.9854	7.37	0.0001

EXPERIENCIA 2C-Bo-900-C-S-1

FRACAO NUMERO 1		DISTRIBUICAO DO TEMPO DE PERMANENCIA				
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		3.83 MIN.				
TI(J)	CB1(J)	CL1Q(J)	DF(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)
0.	100.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0
1.	47000.	46900.	0.1473	0.1473	0.26	0.5644
2.	71600.	71500.	0.2245	0.3718	0.52	0.8604
3.	58000.	57900.	0.1818	0.5537	0.78	0.6968
4.	42600.	42500.	0.1335	0.6871	1.04	0.5114
5.	30300.	30200.	0.0948	0.7820	1.30	0.3634
6.	20300.	20200.	0.0634	0.8454	1.57	0.2431
7.	14560.	14460.	0.0454	0.8908	1.83	0.1740
8.	9940.	9840.	0.0309	0.9217	2.09	0.1184
9.	6500.	6400.	0.0201	0.9418	2.35	0.0770
10.	4610.	4510.	0.0142	0.9560	2.61	0.0543
11.	3240.	3140.	0.0099	0.9659	2.87	0.0378
12.	2200.	2100.	0.0066	0.9724	3.13	0.0253
13.	1680.	1580.	0.0050	0.9774	3.39	0.0190
14.	1200.	1100.	0.0035	0.9809	3.65	0.0132
15.	800.	700.	0.0022	0.9831	3.91	0.0084
16.	610.	510.	0.0016	0.9847	4.18	0.0061
17.	430.	330.	0.0010	0.9857	4.44	0.0040
18.	305.	205.	0.0006	0.9863	4.70	0.0025
19.	280.	180.	0.0006	0.9869	4.96	0.0022
20.	210.	110.	0.0003	0.9873	5.22	0.0013
21.	160.	60.	0.0002	0.9874	5.48	0.0007
22.	180.	80.	0.0003	0.9877	5.74	0.0010
23.	130.	30.	0.0001	0.9878	6.00	0.0004
24.	120.	20.	0.0001	0.9879	6.26	0.0002
25.	130.	30.	0.0001	0.9879	6.52	0.0004
26.	130.	30.	0.0001	0.9880	6.79	0.0004
27.	120.	20.	0.0001	0.9881	7.05	0.0002
28.	120.	20.	0.0001	0.9882	7.31	0.0002
29.	110.	10.	0.0000	0.9882	7.57	0.0001

EXPERIENCIA 2C-B0-900-C-S-2

FRACAO NUMERO 1		DISTRIBUICAO DO TEMPO DE PERMANENCIA					
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		8.01 MIN.					
TI(J)	CB1(J)	CL1Q(J)	DF(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)	
0.	100.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	
1.	980.	880.	0.0027	0.0027	0.12	0.0214	
2.	11480.	11380.	0.0346	0.0373	0.25	0.2771	
3.	25780.	25680.	0.0781	0.1154	0.37	0.6252	
4.	37060.	36960.	0.1124	0.2278	0.50	0.8999	
5.	37600.	37500.	0.1140	0.3418	0.62	0.9130	
6.	37960.	37860.	0.1151	0.4569	0.75	0.9218	
7.	36020.	35920.	0.1092	0.5661	0.87	0.8746	
8.	29000.	28900.	0.0879	0.6540	1.00	0.7036	
9.	21000.	20900.	0.0636	0.7176	1.12	0.5089	
10.	18750.	18650.	0.0567	0.7743	1.25	0.4541	
11.	15870.	15770.	0.0480	0.8222	1.37	0.3840	
12.	12440.	12340.	0.0375	0.8598	1.50	0.3004	
13.	9460.	9360.	0.0285	0.8882	1.62	0.2279	
14.	7940.	7840.	0.0238	0.9121	1.75	0.1909	
15.	6480.	6380.	0.0194	0.9315	1.87	0.1553	
16.	4530.	4430.	0.0135	0.9449	2.00	0.1079	
17.	4350.	4250.	0.0129	0.9578	2.12	0.1035	
18.	3030.	2930.	0.0089	0.9669	2.25	0.0713	
19.	2610.	2510.	0.0076	0.9744	2.37	0.0611	
20.	2150.	2050.	0.0062	0.9806	2.50	0.0499	
21.	1730.	1630.	0.0050	0.9856	2.62	0.0397	
22.	1280.	1180.	0.0036	0.9892	2.75	0.0287	
23.	1120.	1020.	0.0031	0.9923	2.87	0.0248	
24.	880.	780.	0.0024	0.9946	3.00	0.0190	
25.	880.	780.	0.0024	0.9970	3.12	0.0190	
26.	610.	510.	0.0016	0.9986	3.25	0.0124	
27.	400.	300.	0.0009	0.9995	3.37	0.0073	
28.	430.	330.	0.0010	1.0005	3.50	0.0080	
29.	380.	280.	0.0009	1.0013	3.62	0.0068	
30.	310.	210.	0.0006	1.0020	3.75	0.0051	
31.	210.	110.	0.0003	1.0023	3.87	0.0027	
32.	210.	110.	0.0003	1.0026	4.00	0.0027	
33.	230.	130.	0.0004	1.0030	4.12	0.0032	
34.	170.	70.	0.0002	1.0032	4.25	0.0017	

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-C-S-1

FRACAO NUMERO 1		DISTRIBUICAO DO TEMPO DE PERMANENCIA				
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA		7.82 MIN.				
TI(J)	CB1(J)	CLIQ(J)	DF(J)	F(J)	TETA(J)	DF1(J)
0.	100.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0
1.	870.	770.	0.0022	0.0022	0.13	0.0173
2.	8620.	8520.	0.0244	0.0266	0.26	0.1912
3.	27360.	27260.	0.0782	0.1048	0.38	0.6117
4.	36250.	36150.	0.1037	0.2085	0.51	0.8112
5.	45760.	45660.	0.1310	0.3395	0.64	1.0246
6.	43050.	42950.	0.1232	0.4626	0.77	0.9638
7.	37070.	36970.	0.1060	0.5687	0.89	0.8296
8.	32090.	31990.	0.0917	0.6604	1.02	0.7173
9.	24700.	24600.	0.0706	0.7310	1.15	0.5520
10.	19210.	19110.	0.0548	0.7858	1.28	0.4288
11.	15850.	15750.	0.0452	0.8310	1.41	0.3534
12.	11470.	11370.	0.0326	0.8636	1.53	0.2551
13.	10090.	9990.	0.0287	0.8922	1.66	0.2242
14.	7360.	7260.	0.0208	0.9130	1.79	0.1629
15.	6350.	6250.	0.0179	0.9310	1.92	0.1402
16.	5200.	5100.	0.0146	0.9456	2.05	0.1144
17.	3540.	3440.	0.0099	0.9555	2.17	0.0772
18.	3080.	2980.	0.0085	0.9640	2.30	0.0669
19.	2510.	2410.	0.0069	0.9709	2.43	0.0541
20.	1680.	1580.	0.0045	0.9755	2.56	0.0355
21.	1340.	1240.	0.0036	0.9790	2.68	0.0278
22.	1190.	1090.	0.0031	0.9821	2.81	0.0245
23.	1050.	950.	0.0027	0.9849	2.94	0.0213
24.	740.	640.	0.0018	0.9867	3.07	0.0144
25.	630.	530.	0.0015	0.9882	3.20	0.0119
26.	600.	500.	0.0014	0.9896	3.32	0.0112
27.	460.	360.	0.0010	0.9907	3.45	0.0081
28.	380.	280.	0.0008	0.9915	3.58	0.0063
29.	300.	200.	0.0006	0.9921	3.71	0.0045
30.	280.	180.	0.0005	0.9926	3.83	0.0040
31.	230.	130.	0.0004	0.9929	3.96	0.0029
32.	200.	100.	0.0003	0.9932	4.09	0.0022
33.	180.	80.	0.0002	0.9935	4.22	0.0018
34.	150.	50.	0.0001	0.9936	4.35	0.0011

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-C-S-2

VALORES EXPERIMENTAIS DE TENSÃO VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	11.0MIN	11.0MIN
1	0.8722	0.8343	0.6128	0.6225	0.2298	0.2706	0.1293	0.1262
2	0.1273	0.1648	0.2183	0.2249	0.2492	0.2229	0.1982	0.1859
3	0.0002	0.0004	0.0574	0.0498	0.1446	0.1448	0.1739	0.1880
4	0.0001	0.0002	0.0435	0.0395	0.1346	0.1369	0.1967	0.1899
5	0.0001	0.0001	0.0181	0.0162	0.0784	0.0717	0.0997	0.1136
6	0.0002	0.0002	0.0499	0.0472	0.1634	0.1531	0.2022	0.1965

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	11.0MIN	11.0MIN
1	0.4628	0.4448	0.0208	0.0234	0.0148	0.0194	0.0184	0.0186
2	0.1408	0.1604	0.0960	0.0956	0.0888	0.0896	0.0912	0.0918
3	0.1900	0.1896	0.2598	0.2600	0.2460	0.2640	0.2610	0.2638
4	0.1420	0.1408	0.3288	0.3106	0.3168	0.3184	0.3240	0.3066
5	0.0372	0.0384	0.1230	0.1276	0.1498	0.1310	0.1328	0.1480
6	0.0272	0.0250	0.1716	0.1828	0.1838	0.1776	0.1726	0.1712

EXPERIÊNCIA 1C-Bo-1600-C-S-1

FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.5MIN	4.5MIN	13.0MIN	13.0MIN
0.9536	0.6483	0.6844	0.2918	0.2912	0.0941	0.1092
0.0450	0.1801	0.1523	0.1797	0.1894	0.1731	0.1603
0.0006	0.0580	0.0544	0.1381	0.1386	0.1890	0.1820
0.0003	0.0401	0.0449	0.1382	0.1242	0.2073	0.2208
0.0001	0.0190	0.0153	0.0640	0.0672	0.1069	0.1011
0.0003	0.0545	0.0487	0.1881	0.1894	0.2296	0.2268

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.5MIN	4.5MIN	13.0MIN	13.0MIN
0.4532	0.0180	0.0198	0.0172	0.0176	0.0164	0.0190
0.0952	0.0900	0.0888	0.0804	0.0836	0.0888	0.0872
0.2076	0.2512	0.2552	0.2444	0.2512	0.2526	0.2534
0.1564	0.3166	0.3376	0.3216	0.3044	0.3200	0.3284
0.0512	0.1442	0.1188	0.1234	0.1296	0.1280	0.1238
0.0364	0.1800	0.1798	0.2130	0.2136	0.1942	0.1882

EXPERIENCIA 1C-Bo-1600-C-S-2

NÚMERO	FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO							
	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN		
1	0.9206	0.9541	0.6994	0.7163	0.3140	0.3366	0.1550	0.1655
2	0.0787	0.0451	0.1360	0.1328	0.2109	0.2157	0.1931	0.2242
3	0.0003	0.0003	0.0485	0.0476	0.1299	0.1220	0.1811	0.1644
4	0.0002	0.0003	0.0421	0.0416	0.1216	0.1250	0.1984	0.1923
5	0.0001	0.0001	0.0230	0.0193	0.0879	0.0674	0.0981	0.0914
6	0.0002	0.0002	0.0511	0.0423	0.1357	0.1334	0.1744	0.1622

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

NÚMERO	FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO						
	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN	
1	0.5516	0.0218	0.0240	0.0212	0.0244	0.0220	0.0248
2	0.0948	0.1092	0.1222	0.1104	0.1236	0.1124	0.1256
3	0.1520	0.2576	0.2570	0.2640	0.2648	0.2686	0.2596
4	0.1260	0.3220	0.3264	0.3096	0.3158	0.3192	0.3338
5	0.0428	0.1292	0.1234	0.1538	0.1234	0.1238	0.1126
6	0.0328	0.1602	0.1470	0.1410	0.1480	0.1540	0.1436

EXPERIÊNCIA IC-Bo-2400-C-S-1

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN	15.0MIN
1	0.9506	0.9510	0.7079	0.7074	0.2941	0.3224	0.1570	0.1491
2	0.0488	0.0481	0.1232	0.1438	0.2169	0.2155	0.2118	0.1878
3	0.0003	0.0004	0.0563	0.0475	0.1256	0.1217	0.1801	0.2047
4	0.0002	0.0003	0.0431	0.0364	0.1362	0.1280	0.1894	0.1675
5	0.0001	0.0001	0.0203	0.0176	0.0687	0.0637	0.0908	0.0980
6	0.0001	0.0002	0.0493	0.0474	0.1584	0.1487	0.1709	0.1929

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN	15.0MIN
1	0.5716	0.5720	0.0216	0.0208	0.0200	0.0218	0.0214	0.0198
2	0.0884	0.0852	0.1170	0.1128	0.1116	0.1126	0.1196	0.0898
3	0.1576	0.1540	0.2706	0.2692	0.2578	0.2536	0.2664	0.3020
4	0.1196	0.1212	0.3276	0.3220	0.3252	0.3260	0.3260	0.2776
5	0.0400	0.0416	0.1144	0.1146	0.1190	0.1186	0.1144	0.1322
6	0.0228	0.0260	0.1488	0.1606	0.1664	0.1674	0.1522	0.1786

EXPERIENCIA 1C-Bo-2400-C-S-2

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.9688	0.9696	0.6032	0.6314	0.2475	0.2560	0.1023	0.0923
2	0.0250	0.0257	0.1824	0.1563	0.2140	0.2117	0.1518	0.1864
3	0.0023	0.0021	0.0809	0.0791	0.1718	0.1521	0.1705	0.1472
4	0.0010	0.0010	0.0567	0.0548	0.1378	0.1515	0.1911	0.1977
5	0.0010	0.0006	0.0273	0.0321	0.0839	0.0773	0.1305	0.1418
6	0.0020	0.0010	0.0494	0.0462	0.1451	0.1514	0.2538	0.2346

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0385	0.0395	0.0224	0.0248	0.0096	0.0101	0.0042	0.0038
2	0.1658	0.1452	0.1056	0.1308	0.0672	0.0681	0.0378	0.0502
3	0.3386	0.3445	0.3219	0.3192	0.2921	0.2462	0.1873	0.1756
4	0.2721	0.2845	0.3263	0.3029	0.3133	0.3469	0.3366	0.3372
5	0.1071	0.0912	0.1130	0.1258	0.1542	0.1523	0.1874	0.2035
6	0.0779	0.0950	0.1108	0.0965	0.1636	0.1764	0.2467	0.2297

EXPERIENCIA 2C-Bo-900-B-S-1

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.9517	0.9389	0.4783	0.5435	0.1940	0.2242	0.0830	0.0864
2	0.0480	0.0605	0.2439	0.1900	0.2394	0.2031	0.2108	0.1884
3	0.0001	0.0003	0.0864	0.0722	0.1661	0.1693	0.2321	0.2175
4	0.0002	0.0003	0.0610	0.0628	0.1388	0.1532	0.1963	0.2085
5	0.0	0.0	0.0330	0.0359	0.0859	0.0819	0.0946	0.1139
6	0.0	0.0	0.0974	0.0957	0.1758	0.1683	0.1831	0.1854

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.5732	0.5624	0.0178	0.0224	0.0156	0.0184	0.0150	0.0146
2	0.2296	0.2408	0.0984	0.1110	0.0972	0.0954	0.1048	0.1016
3	0.1920	0.1920	0.2848	0.2808	0.2832	0.2808	0.2916	0.2788
4	0.0052	0.0048	0.3010	0.2928	0.2788	0.2962	0.2964	0.2912
5	0.0	0.0	0.1164	0.1216	0.1362	0.1258	0.1150	0.1370
6	0.0	0.0	0.1816	0.1714	0.1890	0.1834	0.1772	0.1768

EXPERIENCIA 2C-Bo-900-C-S-2

FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.9570	0.9515	0.6233	0.6573	0.2893	0.2767	0.1150	0.1132
2	0.0430	0.0325	0.1610	0.1260	0.2135	0.2126	0.1504	0.1677
3	0.0	0.0063	0.0821	0.0769	0.1535	0.1498	0.1745	0.1349
4	0.0001	0.0047	0.0552	0.0530	0.1245	0.1319	0.1243	0.1910
5	0.0	0.0023	0.0273	0.0314	0.1018	0.0853	0.1738	0.1357
6	0.0	0.0027	0.0512	0.0554	0.1175	0.1437	0.2620	0.2574

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0335	0.0434	0.0234	0.0302	0.0118	0.0120	0.0052	0.0049
2	0.1357	0.1772	0.1121	0.1178	0.0824	0.0850	0.0428	0.0484
3	0.3761	0.3441	0.3518	0.3257	0.2947	0.2659	0.2090	0.1607
4	0.2713	0.2502	0.2893	0.2826	0.2828	0.3066	0.2129	0.3253
5	0.1055	0.0935	0.1061	0.1214	0.1999	0.1588	0.2687	0.2042
6	0.0779	0.0916	0.1173	0.1223	0.1284	0.1717	0.2614	0.2565

EXPERIENCIA 2C-Bo-900-B-U-1

	0.0MIN	0.0MIN	2.0MIN	2.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.9543	0.9579	0.2938	0.2944	0.2693	0.2409	0.1549	0.1362
2	0.0454	0.0420	0.1473	0.1505	0.2342	0.2762	0.2693	0.2692
3	0.0003	0.0001	0.0850	0.0888	0.1375	0.1380	0.2058	0.1954
4	0.0000	0.0000	0.1045	0.0981	0.1365	0.1361	0.1762	0.1904
5	0.0	0.0	0.0848	0.0818	0.0818	0.0759	0.0781	0.0837
6	0.0	0.0	0.2846	0.2863	0.1407	0.1330	0.1156	0.1251

	0.0MIN	0.0MIN	2.0MIN	2.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.5756	0.5696	0.0112	0.0106	0.0122	0.0110	0.0098	0.0086
2	0.2072	0.2224	0.1096	0.1052	0.0960	0.1004	0.0938	0.0912
3	0.2092	0.2004	0.2754	0.2876	0.2688	0.2640	0.2826	0.2706
4	0.0080	0.0076	0.3288	0.3180	0.3256	0.3362	0.3300	0.3330
5	0.0	0.0	0.1416	0.1388	0.1430	0.1396	0.1280	0.1346
6	0.0	0.0	0.1334	0.1398	0.1544	0.1488	0.1558	0.1620

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

EXPERIÊNCIA IC-Ba-1600-C-S-1

FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

FRACAO NUMERO	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.8969	0.8465	0.6487	0.2532	0.2817	0.0966	0.0998
2	0.0985	0.1479	0.2257	0.3277	0.3101	0.2395	0.2327
3	0.0022	0.0024	0.0566	0.1420	0.1398	0.1880	0.1945
4	0.0014	0.0018	0.0338	0.1098	0.1047	0.1721	0.1749
5	0.0003	0.0004	0.0170	0.0586	0.0669	0.1204	0.1165
6	0.0008	0.0010	0.0243	0.0986	0.0967	0.1834	0.1816

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

FRACAO NUMERO	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.0470	0.0367	0.0356	0.0137	0.0147	0.0050-	0.0053
2	0.2286	0.2121	0.2161	0.1359	0.1416	0.0749	0.0690
3	0.3264	0.3242	0.3315	0.3072	0.3061	0.2612	0.2664
4	0.2503	0.2597	0.2577	0.2888	0.2831	0.2984	0.3080
5	0.0827	0.0931	0.0929	0.1261	0.1378	0.1796	0.1727
6	0.0651	0.0741	0.0722	0.1283	0.1167	0.1809	0.1786

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-B-S-1

CART. NÚMERO	FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO						
	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.9469	0.9589	0.6587	0.3518	0.3264	0.1382	0.1501
2	0.0442	0.0316	0.1763	0.2796	0.2521	0.2227	0.2137
3	0.0	0.0	0.0627	0.1291	0.1545	0.1862	0.1760
4	0.0	0.0048	0.0439	0.1026	0.1109	0.1473	0.1539
5	0.0024	0.0021	0.0247	0.0585	0.0535	0.1209	0.1195
6	0.0065	0.0027	0.0337	0.0784	0.1026	0.1847	0.1863

CART. NÚMERO	FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO						
	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.0294	0.0240	0.0235	0.0190	0.0120	0.0044	0.0046
2	0.1528	0.1585	0.1422	0.1373	0.1060	0.0602	0.0574
3	0.3340	0.3349	0.3133	0.3278	0.2934	0.2565	0.2416
4	0.2860	0.2785	0.2957	0.2903	0.3255	0.2935	0.3009
5	0.1212	0.1217	0.1345	0.1300	0.1493	0.1994	0.2014
6	0.0766	0.0824	0.0908	0.0956	0.1138	0.1860	0.1941

	0.0MIN	0.0MIN	2.5MIN	2.5MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.9580	0.9499	0.2030	0.2253	0.1895	0.2069	0.1338	0.1439
2	0.0414	0.0492	0.1440	0.1748	0.2223	0.2461	0.2588	0.2561
3	0.0003	0.0005	0.1098	0.0894	0.1494	0.1477	0.2098	0.2057
4	0.0003	0.0004	0.1163	0.1119	0.1456	0.1348	0.1747	0.1873
5	0.0	0.0	0.0974	0.1006	0.0951	0.0875	0.0932	0.0977
6	0.0	0.0	0.3295	0.2980	0.1981	0.1770	0.1298	0.1093

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	2.5MIN	2.5MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.5744	0.5308	0.0080	0.0092	0.0094	0.0094	0.0090	0.0106
2	0.1912	0.2244	0.0796	0.0944	0.0902	0.0886	0.0896	0.1048
3	0.2276	0.2348	0.2716	0.2660	0.2640	0.2836	0.2878	0.2740
4	0.0068	0.0100	0.3190	0.3228	0.3162	0.2952	0.3024	0.3264
5	0.0	0.0	0.1488	0.1520	0.1512	0.1432	0.1442	0.1500
6	0.0	0.0	0.1730	0.1556	0.1690	0.1800	0.1670	0.1342

EXPERIENCIA 1C-Ba-1600-C-S-2

C.A.O. NUMERO	FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENFIRA VERSUS TEMPO						
	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN	
1	0.9343	0.6261	0.6139	0.3502	0.3550	0.1357	0.1367
2	0.0550	0.2034	0.2135	0.2714	0.2612	0.2185	0.2319
3	0.0038	0.0664	0.0716	0.1370	0.1341	0.1967	0.1786
4	0.0030	0.0437	0.0436	0.0954	0.1007	0.1530	0.1594
5	0.0017	0.0255	0.0233	0.0525	0.0553	0.0982	0.0980
6	0.0021	0.0349	0.0341	0.0935	0.0938	0.1979	0.1954

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENFIRA VERSUS TEMPO

C.A.O. NUMERO	FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENFIRA VERSUS TEMPO						
	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN	
1	0.0325	0.0210	0.0219	0.0114	0.0119	0.0042	0.0041
2	0.1567	0.1198	0.1222	0.0959	0.0920	0.0505	0.0655
3	0.3225	0.3400	0.3417	0.3110	0.3019	0.2582	0.2440
4	0.2850	0.2928	0.2988	0.3208	0.3135	0.3059	0.3077
5	0.1208	0.1262	0.1167	0.1313	0.1433	0.1687	0.1712
6	0.0825	0.1002	0.0987	0.1296	0.1374	0.2125	0.2075

EXPERIENCIA IC-Ba-1600-B-U-2

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.8716	0.8458	0.7414	0.7694	0.5626	0.5539	0.4079	0.3919
4	0.1282	0.1540	0.2008	0.1768	0.2593	0.2749	0.3153	0.3301
5	0.0000	0.0001	0.0186	0.0160	0.0645	0.0594	0.1067	0.1078
6	0.0001	0.0001	0.0392	0.0379	0.1135	0.1118	0.1701	0.1703

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.5865	0.5695	0.3676	0.3774	0.3556	0.3646	0.3460	0.3520
4	0.1995	0.2160	0.3322	0.3252	0.3198	0.3250	0.3196	0.3136
5	0.1220	0.1240	0.1306	0.1208	0.1416	0.1336	0.1458	0.1442
6	0.0920	0.0905	0.1696	0.1766	0.1830	0.1768	0.1885	0.1902

FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO

FUNÇÕES DE SELEÇÃO

TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA

0.0

0.0717

7.73 minutos

0.4720

0.0147

0.0000

0.3710

0.0

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.5MIN	4.5MIN	11.0MIN	11.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9584	0.9465	0.8391	0.8534	0.6420	0.6288	0.5294	0.4670
4	0.0414	0.0532	0.0980	0.0879	0.1848	0.1933	0.2278	0.2793
5	0.0001	0.0001	0.0193	0.0181	0.0643	0.0661	0.0959	0.0964
6	0.0001	0.0002	0.0436	0.0406	0.1088	0.1119	0.1469	0.1574

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.5MIN	4.5MIN	11.0MIN	11.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.4328	0.4280	0.3380	0.3522	0.3572	0.3602	0.3916	0.3678
4	0.2236	0.2244	0.3000	0.3076	0.3116	0.3116	0.2962	0.3184
5	0.1904	0.1872	0.1454	0.1330	0.1494	0.1450	0.1362	0.1350
6	0.1532	0.1604	0.2166	0.2072	0.1818	0.1832	0.1760	0.1788
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO			0.0	0.4245	0.1670	0.4086		
FUNÇÕES DE SELEÇÃO			0.0684	0.0000	0.0000	0.0		
TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA			7.99 minutos					156.
EXPERIÊNCIA			1C-Bo-1600-C-S-2					

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN	15.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9510	0.9356	0.8592	0.8655	0.6560	0.6555	0.4766	0.5006
4	0.0488	0.0641	0.0970	0.0897	0.1948	0.1848	0.3125	0.2833
5	0.0001	0.0002	0.0139	0.0150	0.0552	0.0629	0.0858	0.0882
6	0.0001	0.0001	0.0299	0.0298	0.0941	0.0968	0.1251	0.1280

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN	15.0MIN
1	0.0	0.0	0.0200	0.0188	0.0180	0.0182	0.0190	0.0178
2	0.0	0.0	0.1200	0.1230	0.1074	0.1164	0.1168	0.1122
3	0.5732	0.5652	0.2662	0.2672	0.2840	0.2880	0.2520	0.2632
4	0.2316	0.2368	0.3332	0.3234	0.3110	0.2990	0.3488	0.3256
5	0.1104	0.1136	0.1164	0.1198	0.1266	0.1330	0.1164	0.1266
6	0.0848	0.0844	0.1442	0.1478	0.1530	0.1454	0.1470	0.1546
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO			0.0	0.4544	0.1713	0.3713		
FUNÇÕES DE SELEÇÃO			0.0488	0.0000	0.0000	0.0		
TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA			11.46 minutos					
			EXPERIÊNCIA	1C-Bo-2400-C-S-1				

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN	15.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9400	0.9475	0.8521	0.8374	0.6443	0.6313	0.5340	0.5130	0.5130
4	0.0599	0.0523	0.0938	0.1050	0.1817	0.2021	0.2642	0.2696	0.2696
5	0.0001	0.0001	0.0163	0.0208	0.0605	0.0579	0.0817	0.0870	0.0870
6	0.0001	0.0001	0.0378	0.0368	0.1135	0.1087	0.1201	0.1303	0.1303

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	6.0MIN	6.0MIN	15.0MIN	15.0MIN
1	0.0	0.0	0.0172	0.0172	0.0156	0.0160	0.0170	0.0176
2	0.0	0.0	0.1118	0.1066	0.0992	0.1124	0.1122	0.1158
3	0.5248	0.5304	0.2554	0.2604	0.2708	0.2552	0.2810	0.2742
4	0.2485	0.2415	0.3290	0.2974	0.3086	0.3318	0.3206	0.3126
5	0.1333	0.1315	0.1222	0.1534	0.1306	0.1208	0.1214	0.1234
6	0.0933	0.0967	0.1644	0.1650	0.1752	0.1638	0.1478	0.1564
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO			0.0	0.4367	0.1850	0.3784		
FUNÇÕES DE SELEÇÃO			0.0465	0.0000	0.0004	0.0		
TEMPO MÉDIO PERMANÊNCIA			11.17 minutos					
			EXPERIÊNCIA	1C-Bo-2400-C-S-2				

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9424	0.9262	0.7838	0.7808	0.5994	0.5884	0.4917	0.4889
4	0.0574	0.0735	0.1235	0.1212	0.2263	0.2450	0.3042	0.2913
5	0.0001	0.0001	0.0295	0.0320	0.0683	0.0635	0.0878	0.0913
6	0.0001	0.0001	0.0633	0.0661	0.1060	0.1031	0.1163	0.1286

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0	0.0	0.0172	0.0150	0.0166	0.0162	0.0178	0.0172
2	0.0	0.0	0.1202	0.1196	0.1180	0.1118	0.1222	0.1050
3	0.5692	0.5616	0.2738	0.2722	0.2862	0.2887	0.2746	0.2988
4	0.2260	0.2384	0.3214	0.2950	0.3102	0.3141	0.3274	0.2888
5	0.1140	0.1028	0.1170	0.1302	0.1182	0.1154	0.1168	0.1198
6	0.0908	0.0972	0.1504	0.1680	0.1508	0.1538	0.1412	0.1704
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO			0.0	0.3321	0.2042	0.4637		
FUNÇÕES DE SELEÇÃO			0.0867	0.0000	0.0217	0.0		
TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA			3.82 minutos					
			EXPERIÊNCIA	2C-80-900-C-S-1				

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0	0.0	0.0081	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0591	0.0	0.0	0.0
3	0.9564	0.5614	0.8058	0.7172	0.6608	0.4736
4	0.414	0.0384	0.0863	0.2092	0.1903	0.2276
5	0.0006	-0.0000	0.0123	0.0719	0.0594	0.1308
6	0.0016	0.0003	0.0284	0.0017	0.0395	0.1680

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENFIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0231	0.0210	0.0177	0.0064	0.0066	0.0021
2	0.1435	0.1633	0.1291	0.0689	0.0832	0.0422
3	0.3739	0.3270	0.3454	0.2969	0.2877	0.2303
4	0.2666	0.2884	0.3147	0.3150	0.3196	0.3132
5	0.0971	0.1061	0.0711	0.1515	0.1347	0.1600
6	0.0958	0.0942	0.1220	0.1613	0.1682	0.2522
FUNÇÃO DE QUEBRAMENTO			0.0	0.495	0.1408	0.3666
FUNÇÃO DE SELEÇÃO			0.0812	0.0231	0.0000	0.0
TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA			3.82 minutos			
			EXPERIÊNCIA	2C-Bo-900-B-S-1		

160.

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9501	0.9526	0.7400	0.7369	0.5311	0.5866	0.4244	0.3834
4	0.0498	0.0472	0.1707	0.1699	0.3003	0.2188	0.3381	0.3660
5	0.0001	0.0001	0.0272	0.0312	0.0562	0.0741	0.0910	0.1068
6	0.0001	0.0001	0.0621	0.0620	0.1124	0.1205	0.1466	0.1438

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0	0.0	0.0170	0.0150	0.0150	0.0166	0.0152	0.0160
2	0.0	0.0	0.1104	0.1062	0.1036	0.0978	0.1012	0.1026
3	0.5720	0.5780	0.2744	0.2738	0.2720	0.2990	0.2618	0.2564
4	0.2148	0.2152	0.3198	0.3050	0.3288	0.2826	0.3212	0.3086
5	0.1128	0.1124	0.1176	0.1332	0.1178	0.1296	0.1222	0.1336
6	0.1004	0.0944	0.1608	0.1668	0.1628	0.1744	0.1784	0.1828
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO			0.0	0.5836	0.1271	0.2854		
FUNÇÕES DE SELEÇÃO			0.1145	0.0210	0.0042	0.0		
TEMPO MEDIO DE PERMANÊNCIA			3.86					

EXPERIÊNCIA 2C-Bo-900-C-S-2

FRACAO NUMERO 2

FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.5643	0.8726	0.8693	0.6851	0.6523	0.5065	0.5072
4	0.0354	0.0802	0.0824	0.1631	0.1884	0.2050	0.2124
5	0.0	0.0208	0.0193	0.0499	0.0570	0.0992	0.0840
6	0.0002	0.0265	0.0290	0.1018	0.1022	0.1893	0.1964

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	4.0MIN	4.0MIN	9.0MIN	9.0MIN
1	0.0235	0.0153	0.0143	0.0061	0.0060	0.0024	0.0024
2	0.1302	0.1325	0.1134	0.0820	0.0683	0.0457	0.0372
3	0.3786	0.3492	0.3571	0.3090	0.2939	0.2465	0.2507
4	0.2807	0.2892	0.2843	0.3046	0.3130	0.2762	0.2802
5	0.1074	0.1142	0.1144	0.1148	0.1343	0.1687	0.1414
6	0.0796	0.0996	0.1166	0.1835	0.1845	0.2605	0.2881
FUNÇÃO DE QUEBRAMENTO		0.0	0.4923	0.2266	0.2810		
FUNÇÃO DE SELEÇÃO		0.0777	0.0427	0.0935	0.0		
TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA		3.86 minutos					

EXPERIÊNCIA 2C-Bo-900-B-U-1

162.

FRACAO NUMERO	2	FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO						
	0.0MIN	0.0MIN	1.50MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0601
3	0.9569	0.9564	0.8820	0.8817	0.7047	0.6982	0.5182	0.4997
4	0.0427	0.0398	0.0835	0.0798	0.1725	0.1825	0.2484	0.2327
5	0.0002	0.0026	0.0160	0.0194	0.0601	0.0515	0.1051	0.0884
6	0.0001	0.0012	0.0185	0.0191	0.0627	0.0678	0.1284	0.1191

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.0454	0.0403	0.0279	0.0287	0.0125	0.0132	0.0054	0.0045
2	0.2379	0.2295	0.1744	0.1761	0.1283	0.1217	0.0718	0.0835
3	0.3443	0.3395	0.3556	0.3575	0.3166	0.3201	0.2582	0.2627
4	0.2395	0.2433	0.2659	0.2508	0.2843	0.2989	0.2925	0.2983
5	0.0802	0.0910	0.0969	0.1079	0.1414	0.1213	0.1815	0.1608
6	0.0527	0.0564	0.0793	0.0790	0.1169	0.1248	0.1906	0.1902
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO			0.0	0.5418	0.2189	0.2393		164.
FUNÇÕES DE SELEÇÃO			0.0494	0.0222	0.0437	0.0		
TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA			7.58 minutos					

FRACAO NUMERO	FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO					
	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9346	0.8691	0.6975	0.6873	0.5200	0.5157
4	0.0646	0.0910	0.1722	0.1833	0.2282	0.2524
5	0.0	0.0169	0.0587	0.0663	0.1062	0.1108
6	0.0008	0.0231	0.0716	0.0631	0.1455	0.1211

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO						
	0.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	14.0MIN
1	0.0256	0.0150	0.0078	0.0087	0.0025	0.0029
2	0.1537	0.1371	0.0720	0.0689	0.0405	0.0429
3	0.3644	0.3458	0.3193	0.3155	0.2512	0.2485
4	0.2849	0.2920	0.3009	0.3109	0.3024	0.3181
5	0.0525	0.1120	0.1567	0.1718	0.1902	0.2039
6	0.1189	0.0981	0.1433	0.1242	0.2132	0.1837
FUNCOES DE QUEBRAMENTO	0.0	0.4463	0.2578	0.2959		
FUNCOES DE SELEÇÃO	0.0472	0.0053	0.0140	0.0		
TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA	7.58 minutos					165.

	0.0MIN	0.0MIN	2.5MIN	2.5MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9252	0.9180	0.6147	0.6552	0.6319	0.6324	0.5740	0.5930
4	0.0746	0.0819	0.1883	0.1553	0.2206	0.2204	0.2745	0.2610
5	0.0001	0.0001	0.0591	0.0558	0.0639	0.0617	0.0730	0.0754
6	0.0000	0.0000	0.1379	0.1337	0.0836	0.0855	0.0785	0.0706

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	0.0MIN	0.0MIN	2.5MIN	2.5MIN	5.0MIN	5.0MIN	12.0MIN	12.0MIN
1	0.0	0.0	0.0084	0.0082	0.0088	0.0086	0.0082	0.0088
2	0.0	0.0	0.0878	0.0866	0.0892	0.0952	0.0942	0.1008
3	0.5544	0.5592	0.2706	0.2980	0.2826	0.2794	0.2796	0.2830
4	0.3400	0.3264	0.3306	0.2958	0.3246	0.3174	0.3178	0.3120
5	0.1000	0.1088	0.1408	0.1446	0.1414	0.1412	0.1422	0.1502
6	0.0056	0.0056	0.1618	0.1668	0.1534	0.1582	0.1580	0.1452
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO			0.0	0.1613	0.1834	0.6553		166.
FUNÇÕES DE SELEÇÃO			0.0542	0.0000	0.0007	0.0		
TEMPO MÉDIO DE PERMANENCIA			7.65					

FRACAO NUMERO 2	FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO						1
	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9438	0.8487	0.8524	0.6805	0.6723	0.5067	0.5067
4	0.0562	0.1143	0.1112	0.1966	0.2042	0.2469	0.2469
5	0.0	0.0191	0.0193	0.0540	0.0612	0.1083	0.1083
6	0.0	0.0179	0.0171	0.0689	0.0623	0.1380	0.1380

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO

	FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO						1
	0.0MIN	1.0MIN	1.0MIN	5.0MIN	5.0MIN	14.0MIN	
1	0.0391	0.0318	0.0297	0.0130	0.0131	0.0057	0.0057
2	0.2062	0.1991	0.1772	0.1138	0.1265	0.0696	0.0696
3	0.3328	0.3158	0.3282	0.3201	0.2855	0.2552	0.2552
4	0.2469	0.2753	0.2737	0.2956	0.2977	0.2752	0.2752
5	0.1062	0.1041	0.1160	0.1286	0.1525	0.1854	0.1854
6	0.0688	0.0739	0.0752	0.1289	0.1246	0.2089	0.2089
FUNÇÕES DE QUEBRAMENTO		0.0	0.6537	0.1874	0.1586		
FUNÇÕES DE SELEÇÃO		0.0522	0.0459	0.0548			
TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA		7.65					
EXPERIÊNCIA		1C-Da-1600-B-U-1					

FRACAO NUMERO	FRACAO DE ATIVIDADE EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO
	0.0MIN 1.0MIN 5.0MIN 14.0MIN
1	0.0 0.0 0.0 0.0
2	0.0 0.0 0.0 0.0
3	0.9442 0.9740 0.7207 0.4801
4	0.0549 0.0255 0.1490 0.2684
5	0.0001 0.0093 0.0576 0.1069
6	0.0009 0.0002 0.0727 0.1446

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO	14.0MIN
1	0.0
2	0.0
3	0.5065
4	0.2656
5	0.0873
6	0.1406

FRACAO DE PESO EM CADA INTERVALO DE PENEIRA VERSUS TEMPO	14.0MIN	5.0MIN	1.0MIN	0.0MIN
1	0.0034	0.0095	0.0180	0.0240
2	0.0460	0.0875	0.1110	0.1386
3	0.2498	0.3014	0.3746	0.3516
4	0.3288	0.3028	0.2821	0.3027
5	0.1616	0.1634	0.1300	0.1047
6	0.2105	0.1354	0.0843	0.0784
FUNÇÃO DE QUEBRAMENTO		0.2319	0.5398	0.0
FUNÇÃO DE SELEÇÃO		0	0.0141	0.0515
TEMPO MEDIO DE PERMANÊNCIA				7.65
EXPERIÊNCIA				1C-Ba-1600-B-U-2

APÊNDICE III

MODELO DOS TANQUES-EM-SÉRIE APLICADO AO ESTUDO
DA MOAGEM EM REGIME CONTÍNUO.

MODELO DOS "TANQUES-EM-SÉRIE" APLICADO AO ESTUDO
DA MOAGEM EM REGIME CONTÍNUO.

III.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

O exame das curvas de distribuição de tempos de permanência normalizadas $C(\theta)$ versus θ para as diversas configurações estudadas mostrou que estas curvas se assemelhavam bastante às curvas do chamado modelo dos tanques-em-série (tanks-in-series model).

Por sugestão, e com colaboração ativa do Dr. Richard M. Felder, foi então tentada a elaboração do modelo que agora apresentamos.

No fim deste Apêndice está a listagem do programa de computador usado para este modelo bem como os resultados de uma mesma experiência de moagem calculados pelo processo descrito anteriormente e pela aplicação do modelo dos tanques-em-série.

III.2. O MODELO DOS TANQUES-EM-SÉRIE.

Este modelo, que é clássico nos estudos de cinética de processos, supõe que o reator em estudo (no caso o moinho) pode ser considerado como uma série de misturadores perfeitos, de igual volume.

Pode-se demonstrar que, para o caso da injeção de um pulso de traçador, a resposta deste modelo é:

$$C(\theta) = \frac{N^N \theta^{N-1} e^{-N\theta}}{(N-1)!} \quad (\text{III.2-1})$$

onde $C(\theta)$ e θ são os mesmos definidos no capítulo dois deste trabalho e N é o número de tanques ligados em série. Esta é a fórmula clássica para o modelo em estudo.

Pode-se também provar que

$$N = \frac{1}{\sigma_C^2(\theta)} \quad (\text{III.2-2})$$

onde $\sigma_C^2(\theta)$ é a variância da curva experimental normalizada.

A fórmula (III.2-2) permite o ajuste dos dados experimentais ao modelo matemático. Um excelente estudo deste modelo pode ser encontrada na referência (17).

III.3. FORMULAÇÃO DO MODELO PARA O CASO DA OPERAÇÃO DE MOAGEM.

Sejam:

- i = designação genérica de uma fração granulométrica,
- n = designação genérica de um tanque da série,
- N = número de tanques em série,
- C_i^n = concentração da fração i no tanque n ,
- w_i^n = fração de peso do material da fração i no tanque n ,
- Q = vazão de material no sistema em estudo,
- V_0 = volume de cada um dos tanques da série,

- I = número de frações granulométricas no material em estudo,
 τ_0 = tempo médio nominal de permanência do material em cada um dos tanques da série; por definição τ_0 é igual a V_0/Q .

Usando as grandezas mencionadas acima podemos escrever o balanço de material da fração genérica i para o n -ésimo tanque da série:

$$V_0 \frac{dc_i^n}{dt} = Qc_i^{n-1} - Qc_i^n + V_0 \left(\sum_{j=1}^I b_{ij} S_j c_j^n - S_i c_i^n \right) \quad (\text{III.3-1})$$

Nesta expressão b_{ij} e S_j são as funções de quebramento e seleção já definidas e o último termo é o termo de fonte.

Se fizermos

$$\alpha_{ij} = b_{ij} S_j - \delta_{ij} S_i \quad (\text{III.3-2})$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = j \\ 0 & \text{se } i \neq j \end{cases}$$

podemos reescrever a expressão (III.3-1) do seguinte modo:

$$V_0 \frac{dc_i^n}{dt} = Qc_i^{n-1} - Qc_i^n + V_0 \sum_{j=1}^I \alpha_{ij} c_j^n \quad (\text{III.3-3})$$

Podemos escrever que

$$w_i^n = \frac{V_0 c_i^n}{\sum_{i=1}^I V_0 c_i^n} = \frac{c_i^n}{\sum_{i=1}^I c_i^n} \quad (\text{III.3-4})$$

Levando (III.3-4) em (III.3-3) e dividindo por $\sum_{i=1}^I c_i^n$ temos:

$$V_0 \frac{dw_i^n}{dt} = Q w_i^{n-1} - Q w_i^n + V_0 \sum_{j=1}^I \alpha_{ij} w_j^n \quad (\text{III.3-5})$$

Considerando atingido o estado estacionário o primeiro membro se anula (não há mais variações de w_i^n com o tempo):

$$Q w_i^{n-1} - Q w_i^n + V_0 \sum_{j=1}^I \alpha_{ij} w_j^n = 0 \quad (\text{III.3-6})$$

Dividindo por τ_0 e rearranjando:

$$\omega_i^n - \tau_0 \sum_{j=1}^I \alpha_{ij} \omega_j^n = \omega_i^{n-1} \quad (\text{III.3-7})$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots, I$.

Temos assim um sistema de equações lineares que pode ser expresso pela equação matricial:

$$A \omega^n = \omega^{n-1} \quad (\text{III.3-8})$$

onde ω^n e ω^{n-1} , são matrizes coluna e A é uma matriz triangular cujos elementos são expressos por:

$$A_{ij} = \delta_{ij} - \tau_0 \alpha_{ij} \quad (\text{III.3-9})$$

A expressão (III.3-9) pode ser facilmente obtida por um método de indução finita.

A solução do sistema de equações (III.3-8) é dada por:

$$\omega^n = A^{-1} \omega^{n-1} \quad (\text{III.3-10})$$

e pode ser calculada por computação digital.

Se chamarmos de w^0 a distribuição granulométrica do material de alimentação do moinho temos:

$$\begin{aligned} w^1 &= A^{-1} w^0 \\ w^2 &= A^{-1} w^1 = A^{-1} A^{-1} w^0 = (A^{-1})^2 w^0 \\ &\dots\dots\dots \\ w^N &= (A^{-1})^N w^0 \end{aligned} \quad (\text{III.3-11})$$

ou seja, podemos determinar a distribuição granulométrica no interior de qualquer tanque da série desde que se conheça a distribuição granulométrica do material de alimentação do moinho e a matriz A .

III.4. APLICAÇÃO DO MODELO.

O modelo desenvolvido no parágrafo anterior foi aplicado para um caso de moagem contínua em moinho de barras. O material moído era todo ele abaixo de 120 meshes e as funções de seleção e quebramento necessárias à construção da matriz A foram obtidas em um teste em batelada.

O teste feito em regime contínuo forneceu o número de tanques a empregar (pelo valor da variância da curva de distribuição de tempos de permanência normalizada), o valor experimental da distribuição granulométrica de estado estacionário e o tempo médio nominal de permanência do material no interior do moinho.

Apresentamos a seguir um resumo dos resultados obtidos pela aplicação do modelo. Para comparação são apresentados também os resultados calculados pelo processo

anteriormente descrito no corpo desta tese.

Tempo médio nominal de permanência: 7 minutos

Número de tanque em série: 3

Funções de quebramento: 0 0,5605 0,2356 0,2039

Funções de seleção: 0,0506 0,0286 0,0369 0

Fração granulométrica.	Granulometria inicial.	Granulometria de estado estacionário.		
		Experimental	Calculada diretamente.	Calculada pelo modelo matemático.
120 170	0,31	0,24	0,22	0,22
170 230	0,44	0,41	0,40	0,41
230 325	0,14	0,18	0,17	0,17
-325	0,11	0,17	0,21	0,20

III.5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.

Como se pode ver pelos resultados apresentados o modelo dos tanques-em-série fornece sensivelmente os mesmos resultados que o cálculo direto da granulometria de estado estacionário. Pode-se, portanto, chegar à conclusão que o modelo proposto é satisfatório.

Esta conclusão poderá a vir ter grande valor se usada em conjunto com estudos mais detalhados da maneira pela qual os diferentes tipos de moinho transferem o material a moer de sua entrada para sua saída, pois, se for possível correlacionar o número de tanques a se usar com as variáveis operacionais do moinho poder-se-á economizar um grande volume de trabalho experimental que seria gasto na determinação das distribuições de tempos de permanência do material no interior do moinho.

C MODELO DOS TANQUES -EM- SERIE PARA MOAGEM CONTINUA

DIMENSION ALPH(10,10),A(10,10),WO(10),S(10),B(10,10),LW(10),X(10),
1,C(10,10)

1 FORMAT(2I10,F10.0)

2 FORMAT(8F10.0)

3 FORMAT (1H120X'MODELO DOS TANQUES-EM-SERIE PARA MOAGEM CONTINUA'/
15X12,1X,'FRACDES GRANULOMETRICAS'2X12,1X,'TANQUES',3X,'TEMPO MEDI
1 DE PERMANENCIA (GLOBAL)',F6.2,1X,'MINUTOS',/)

4 FORMAT(1H 6X' INTERVALO'13,5X'WO ='F7.4,5X'S ='F7.4)

5 FORMAT(1H06X' MATRIZ DAS FUNCOES DE QUEBRAMENTO ')

6 FORMAT(1H010X10F10.5)

7 FORMAT(1H06X' MATRIZ ALFA ')

8 FORMAT(1H06X' MATRIZ A ')

9 FORMAT(1H0'SINGULARIDADE NA INVERSAO ')

10 FORMAT(1H06X' MATRIZ A , INVERSA ')

11 FORMAT(1H06X' PREVISAO DE GRANULOMETRIA'10F10.4)

25 READ(1,1)N,NT,TM

C NUMERO DE FRACDES, NUMERO DE TANQUES, TEMPO MEDIO DE PERMANENCIA

C (MINUTOS)

IF(N.EQ.0)CALL EXIT

TAU=TM/FLOAT(NT)

NT1=NT-1

READ(1,2)(WO(I),S(I),I=1,N)

READ(1,2)(B(I,1),I=1,N)

DO 30 I=2,N

B(I,I)=0.0

30 B(I,N)=0.0

NM1=N-1

DO 40 J=2,NM1

SUM=0.0

DO 35 I=J,NM1

B(I,J)=B(I-1,J-1)

B(J,I)=0.0

35 SUM=SUM+B(I,J)

40 B(N,J)=1.0-SUM

WRITE(3,3) N,NT,TM

WRITE(3,4)(I,WO(I),S(I),I=1,N)

WRITE(3,5)

DO 45 I=1,N

45 WRITE(3,6)(B(I,J),J=1,N)

DO 50 I=1,N

B(I,I)=-1.0

DO 50 J=1,N

50 ALPH(I,J)=B(I,J)*S(J)

```

WRITE(3,7)
DO 55 I=1,N
55 WRITE(3,6)(ALPH(I,J),J=1,N)
DO 65 I=1,N
DO 60 J=1,N
60 A(I,J)=-ALPH(I,J)*TAU
65 A(I,I)=A(I,I)+1.0
WRITE(3,8)
DO 70 I=1,N
70 WRITE(3,6)(A(I,J),J=1,N)

```

```

C ARRAY, MINV, MCPY, GMPRD, SAD SUBROTINAS DA BIBLIOTECA IBM
CALL ARRAY(2,N,N,10,10,A,A)
CALL MINV(A,N,D,LW,MW)
IF(D-1.0E-20)75,75,80
75 WRITE(3,9)
GO TO 25
80 WRITE(3,10)
CALL ARRAY(1,N,N,10,10,A,B)
DO 85 I=1,N
85 WRITE(3,6)(B(I,J),J=1,N)
CALL MCPY(A,ALPH,N,N,C)
IF(NT.EQ.1) GO TO 95
DO 90 I=1,NT1
CALL GMPRD(A,ALPH,C,N,N,N)
90 CALL MCPY(C,ALPH,N,N,O)
95 CALL GMPRD(ALPH,W0,S,N,N,1)
WRITE(3,11)(S(I),I=1,N)
GO TO 25
END

```

Cópias adicionais podem ser solicitadas ao:

Requests for additional copies should be addressed to:

Demandes pour les rapports à:

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS
DIVISÃO DE COORDENAÇÃO CIENTÍFICA
Serviço de Publicações
Caixa Postal, 1941
Belo Horizonte-MG
BRASIL