

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas



BT/PMI/005

**Ajuste de Modelos
Empíricos de Operação
de Ciclones**

**Homero Delboni Junior
Arthur Pinto Chaves**

São Paulo - 1992

O presente trabalho é uma versão abreviada da dissertação de mestrado apresentada pelo Eng^o Homero Delboni Junior, sob orientação do Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves: "Ajuste de modelos empíricos de operação de ciclones".

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia de Minas da Escola Politécnica/USP

Delboni Junior, Homero

Ajuste de modelos empíricos de operação de ciclones / H. Delboni Junior, A.P. Chaves. -- São Paulo : EPUSP, 1992.

10p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/005)

1. Ciclones - Operação I. Chaves, Arthur Pinto
II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas III. Título IV.
Série

CDU 622.766

RESUMO

Este trabalho descreve sinteticamente as etapas contidas na dissertação de mestrado, a ser apresentada a EPUSP, onde é proposto um método de parametrização de curvas padrão de partição visando seu emprego em modelos matemáticos de operação de ciclones.

Inicialmente são relacionados os principais modelos empíricos empregados para descrever processos de classificação e das principais técnicas empregadas para ajustá-los.

Na seqüência é apresentada a técnica proposta, cujo emprego foi possível graças a um sistema computerizado especialmente criado para execução de tarefas específicas, que engloba sete módulos integrados compostos por vários programas cada um.

A parte final deste trabalho consiste em uma aplicação experimental do sistema criado, através do tratamento de dados coletados na usina industrial de processamento de minério de fosfato da Serrana S.A. de Mineração. Após extensos trabalhos de elaboração do banco de dados, formado a partir de amostragens no circuito de moagem e classificação, foram construídas curvas padrão de partição médias seguindo a metodologia de parametrização proposta pelo Autor assim como a originalmente formulada por Plitt. Mediante comparações entre simulações da operação em estudo empregando-se as curvas geradas, conclui-se que ao contrário da técnica de parametrização de Plitt, a técnica proposta mostrou índices de aderência adequados em relação aos dados experimentais. A sua utilização torna portanto mais abrangente o campo de aplicações de modelos matemáticos de operação de ciclones.

ABSTRACT

This work describes synthetizely the steps included in the thesis, to be presented, where is proposed a methodology for parametrization of standard partition curves which is useful in hydrocyclones operation mathematical models.

The most common models for description of classification is first reviewed such as the main adjusting techniques.

Following this we present the methodology proposed, which is applicated on a computational system specifically made for executing related jobs, that includes seven integrated modules, each one composed of several programs.

In the last part of the work the system is tested using data from a phosphate ore processing plant run by Serrana S. A. de Mineração. After elaborating the initial data bank, made with sampling data of the comminution and classification circuit, average standard partition curves were constructed using the author's proposed methodology and also using Plitt's original approach.

After comparing simulation data obtained from generated curves, it was indicated that the new methodology presented suitable adherence indexes, which didn't occur with Plitt's original model.

The main conclusion drawn is that the new methodology widens up the field of application of hydrocyclones mathematical models.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, foi em meados da década de 60 que surgiram os primeiros modelos matemáticos aplicados com sucesso na análise e/ou otimização de operações unitárias de processamento de minérios. A difusão do uso de computadores, nesse cenário, foi um fator decisivo para que houvesse uma busca cada vez maior de equações representativas de performance.

A operação de classificação recebeu, particularmente, muitas atenções de pesquisadores preocupados em sua descrição quantitativa, já que a análise granulométrica de uma população de partículas em tempo real, pode ser uma eficiente ferramenta de controle nas diversas etapas de um determinado processo.

Modelos empíricos partem de dados operacionais levantados experimentalmente em escala de bancada, piloto ou mesmo industrial. Uma vez reunidos, os dados geram correlações (geralmente através do emprego de técnicas de regressão) que fazem associar parâmetros de performance do processo a variáveis operacionais. Por este motivo, a aplicação de modelos desta natureza, quer em controles otimizantes, quer na previsão de resultados, exige necessariamente uma etapa inicial de adequação das equações à operação específica que se deseje estudar.

Os trabalhos publicados por Plitt e Lynch & Rao são bons exemplos da maneira como dados coletados a partir de extensos trabalhos experimentais geraram correlações empíricas entre parâmetros básicos de avaliação de performance em seus modelos e variáveis de operação, seja referentes à geometria do equipamento, seja relativas ao processo. Essas correlações constituem-se nos modelos matemáticos gerais mais utilizados de operação de ciclones, envolvendo análise, simulação digital, engenharia de

projetos e como base de estimação de distribuições granulométricas em operações integradas de controle de processo em usinas de tratamento de minérios. Embora estes modelos tenham alcançado grande sucesso, as tentativas de desenvolvimento de equações abrangentes a amplas faixas de valores das variáveis de processo, tipos de equipamentos, ou mesmo características físicas de minérios, constituintes revelaram-se ineficazes. As equações paramétricas de curvas padrão de partição, utilizadas como ponto de partida em modelos matemáticos empíricos de operação de ciclones, apesar da relativa facilidade que proporcionam na obtenção de índices de performance do processo, mostram-se inadequadas para representar operações com minérios heterogêneos. Como consequência, tais modelos são relativamente restritos às condições sob as quais foram desenvolvidos, o que limita sobremaneira o seu potencial de aplicação.

A partir desta constatação, corroborada por diversos autores, é proposta uma técnica de parametrização de curvas padrão de partição que permite preservar os efeitos das peculiaridades do minério objeto de estudos, e conseqüentemente melhor calibrar o modelo matemático selecionado.

Evita-se assim a obrigatoriedade imposta por Plitt, de que a equação de Rosin-Rammler seja a expressão algébrica de qualquer curva de partição, qualquer que seja o tipo de minério.

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

O termo classificação, quando utilizado no âmbito do tratamento de minérios, designa a operação unitária que objetiva a separação por tamanhos de populações de partículas minerais em classes de tamanho. Esta separação ocorre, em equipamentos como

ciclones, mediante o efeito de sedimentação diferencial que as partículas apresentam em um meio fluido, geralmente água.

Muito embora o tamanho seja a principal, outras características físicas dos grãos, tais como densidade e forma, têm influência significativa em processos desta natureza. Assim sendo, minérios que contenham minerais com grande amplitude de variação em tais características entre si, geralmente apresentam comportamentos anômalos em relação a minérios homogêneos.

A maneira clássica de representação de operações de classificação é através de sua curva de partição. Trata-se de um diagrama onde são lançados em ordenadas, os valores de partição (fração da alimentação encaminhada ao fluxo de saída de partículas grossas, denominada "underflow") e em abscissas os diâmetros médios das diversas classes granulométricas consideradas. A curva de partição representa portanto, a distribuição de probabilidades de partículas alcançarem o "underflow", em uma dada operação.

A abscissa do ponto da curva cuja ordenada é igual a 50%, recebe o nome de diâmetro mediano de separação ou d_{50} .

Na prática, uma curva de partição dificilmente passa pela origem. Esse fenômeno, chamado de curto-circuito, deve-se à fração da alimentação cuja resposta ao processo é nula.

O tratamento matemático de curvas de partição, elimina esta fração, geralmente igualando-a à fração de água contida no "underflow", surgindo então a curva de partição corrigida.

Ao dividir-se os valores das diversas classes granulométricas pelo valor d_{50cor} (d_{50} da curva corrigida), obtém-se a curva padrão de partição da operação. Esta curva tem como peculiaridade o fato de independer das variáveis geométricas do equipamento no qual a operação está sendo realizada, sendo portanto função exclusiva das características do minério frente ao processo.

Devido a sua importância, várias foram as tentativas de parametrização destas curvas. Entretanto é freqüente observar-se desvios em relação ao comportamento previsto, os mais comuns são:

(a) Curto-circuito. Já discutido.

(b) Situações onde a ausência de finos faz com que a curva padrão de partição corte o eixo das abscissas num ponto qualquer.

(c) Situações onde a alimentação é limitada a um tamanho máximo, trazendo consigo uma curva padrão de partição que alcança o valor de 100%.

(d) Situações onde logo após o ponto $x=1$, a curva apresenta gradiente extremamente baixo em relação à assíntota $y=1$.

3. TÉCNICAS USUAIS DE AJUSTE

O uso de modelos que representem com razoável fidelidade a operação de ciclones, permitindo por consequência a previsão de performance de processos de classificação envolvendo ciclones, têm mostrado certas restrições que são aqui abordadas.

Plitt emprega, no modelo de sua autoria, a equação de Rosin-Rammler para a parametrização de curva de partição. Esta prática está baseada em ensaios desenvolvidos com minérios homogêneos.

Observa-se entretanto, que este tipo de parametrização, apresenta baixo índice de correlação em operações práticas com minérios compostos por minerais cujas amplitudes de valores de características físicas são razoavelmente grandes. Pode-se citar como exemplo jazidas residuais, bastante comuns no território brasileiro, onde a presença de minerais micáceos e óxidos de ferro, conferem desvios significativos em relação aos resultados previstos.

Para se contornar o problema, lançam-se mão de técnicas gráfi-

cas, onde são considerados apenas alguns trechos da curva próximos ao ponto cuja abscissa é o d_{50} . Outra técnica de solução é a "correção" dos dados experimentais, para que estes possam recair sobre uma determinada família de curvas com equações pré-determinadas. Outra maneira sugerida de se contornar o problema é dividir o minério em classes de densidades e plotar as curvas de partição individuais, o que na maioria das aplicações é inexequível.

As técnicas que têm como base a própria curva de partição, que atingem uma ampla gama de operações, parecem ser as mais indicadas para aplicações práticas.

Outros métodos que seguem a mesma linha aqui proposta, tais como regressões polinomiais, inversa de Tromp ou mesmo a equação de Trawinski, podem também ser analisados quando o tratamento de dados indicar que estes são oriundos de operações com minérios residuais. Certamente, a maior flexibilidade que os métodos que utilizam a própria curva apresentam, deverá mostrar as vantagens em sua adoção, se comparados com o método originalmente apresentado por Plitt.

4. TÉCNICA DE AJUSTE PROPOSTA

A seguir descreve-se resumidamente a técnica proposta de parametrização de curvas padrão de partição.

Inicialmente os dados provenientes de operações contínuas ou descontínuas, são corrigidos para tornarem-se consistentes com a melhor aproximação aos fluxos calculados, mediante o emprego da técnica que se baseia na distribuição dos erros individuais proporcionalmente a magnitude dos fluxos calculados e posteriormente ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

Após os cálculos do balanço de materiais referente à separação

efetuada, determina-se o valor da função "by-pass", igualando-a numericamente à recuperação total de fluido no "underflow" do ciclone. A etapa termina com o cálculo da curva padrão de partição corrigida referente ao conjunto de dados experimentais considerado.

Na sequência, efetuam-se regressões lineares sucessivas entre um dos pontos extremos da curva e pontos adjacentes, sendo calculados concomitantemente os coeficientes de correlação. Fixando-se a priori um valor mínimo do coeficiente de correlação, estabelece-se então um processo iterativo de cálculos, de modo a se determinar a reta média de um conjunto de pontos contíguos.

A rotina prossegue de tal forma que o ponto extremo do segmento de reta que respeita o coeficiente de correlação pré estabelecido, seja o primeiro ponto do segmento seguinte.

O produto desta técnica de parametrização é discretização da curva padrão de partição. Quanto maior o número malhas utilizadas nas análises granulométricas da alimentação e dos produtos, maior será a precisão alcançada.

O passo seguinte consiste em efetuar-se interpolações lineares nas semi-retas obtidas, visando o cálculo dos valores de recuperação em pontos pré-determinados.

Forma-se concomitantemente um banco de dados onde constem os valores de todas as variáveis de operação sob controle em cada um dos ensaios, assim como dos valores dos parâmetros de processo calculados a posteriori (d50, partição de fluxos, etc.). Os cálculos são efetuados segundo as equações representativas do processo de acordo com o modelo escolhido para tal fim, de modo a calibrá-lo para o sistema em questão.

Os valores das constantes de proporcionalidade obtidos são também arquivados para posteriormente serem utilizados em exercí-

cios de simulação.

A partir de um conjunto de curvas individuais parametrizadas são então levantadas curvas padrão de partição médias, compostas por pontos calculados de acordo com a média aritmética dos valores das inclinações dos segmentos de reta cujas abscissas dos pontos extremos sejam tomadas em intervalos regulares em cada uma das curvas padrão de partição individuais selecionadas.

5. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO AJUSTE PROPOSTO

O circuito atual de moagem e classificação da principal usina industrial de concentração do minério fosfático explorado pela Serrana S.A. de Mineração em Jacupiranga, SP, conta com cinco linhas paralelas e independentes de moagem, desmagnetização e classificação.

A granulação de liberação relativamente grossa da apatita (entre as malhas 35 e 48 da escala Tyler) determinou, que a moagem fosse realizada somente em moinhos de barras (em circuito fechado). Os ciclones empregados na classificação, são do tipo fundo chato; operando a altas concentrações de sólidos e baixas pressões na alimentação, permitem obter produtos relativamente grossos, além de evitar a sobremoagem do minério pela menor carga circulante gerada, com conseqüente minimização da quantidade de finos gerados (perdas de apatita) no produto da classificação.

Para efeito do trabalho proposto, foram fornecidas pela Serrana, dezoito planilhas completas referentes a dados históricos de amostragens realizadas no circuito, cobrindo o período de setembro de 1987 a novembro de 1988, de quinze meses portanto.

Das dezoito campanhas completas de amostragens, dezesseis foram reservadas para formação do banco de dados ; as duas últi-

mas, destinaram-se à aferição dos modelos.

Descartadas as amostragens inconsistentes, cada um dos setenta e um conjuntos remanescentes de dados foi introduzido individualmente no sistema computerizado, de modo a compor curvas padrão de partição, além do cálculo e armazenamento das constantes das equações de modelo de Plitt, partindo-se de dois tipos de parametrização das curvas padrão de partição individuais: equação de Rosin-Rammler e método discretizante. Os arquivos são completados com informações detalhadas de desempenho e valores das variáveis de operação relevantes no processo.

A etapa seguinte dos trabalhos constou do cálculo computerizado de três arquivos médios (curvas padrão) assim formados:

a) Arquivo Médio. Calculado pela média dos dados contidos em cada um dos setenta e um arquivos individuais;

b) Arquivo Dolomítico. Calculado pela média dos dados contidos nos quarenta e dois arquivos de amostragens realizadas com o circuito operando com minério dolomítico.

c) Arquivo Calcítico. Calculado segundo a média dos dados dos vinte e nove arquivos de amostragens realizadas com minério calcítico.

A formação de arquivos separados para operação dos ciclones com minério calcítico ou dolomítico, prende-se à possibilidade de se poder analisar comparativamente as parametrizações segundo os métodos examinados, entre cada um dos arquivos gerados, conforme o tipo de minério.

Os valores de inclinação das curvas geradas pela parametrização de Rosin-Rammler, calculadas em paralelo, foram: 2,25 para a curva média, 2,15 para a curva do minério dolomítico e 2,40 para a curva do minério calcítico.

Foram realizadas então, várias simulações em computador, vi-

sando comparar os resultados obtidos nas simulações, frente a dados experimentais de operação do circuito.

Os dados referentes as duas planilhas inicialmente destacadas para esta fase dos trabalhos (uma com cada tipo de minério), foram introduzidos no sistema para simulação da operação de classificação utilizando-se o arquivo médio e o arquivo específico conforme o tipo de minério.

A fase seguinte dos trabalhos constou de simulações completas de toda a operação de classificação estudada (com balanços de massa e água em cada um dos fluxos, índices de desempenho, etc.), através do uso de uma curva padrão de partição média e das equações ajustadas do modelo de Plitt.

As Tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentadas em anexo, sumarizam os resultados das distribuições granulométricas obtidas nas simulações realizadas, frente aos dados experimentais.

Nas duas primeiras tabelas constam os dados referentes a planilha de amostragem com minério calcítico, assim divididos: Tabela 1 distribuições no "underflow" e Tabela 2 distribuições no "overflow". As Tabelas 3 e 4 são análogas as anteriores porém os dados são relativos as amostragens e simulações com minério dolomítico (segunda planilha). Fazem parte ainda destas tabelas os resultados dos cálculos das somatórias dos quadrados dos desvios para cada conjunto de simulações, frente aos dados experimentais, assim como das variâncias.

6. CONCLUSÕES

No caso estudado, a curva padrão de partição do sistema mostrou, como esperado, um comportamento bastante especial em função das características até certo ponto peculiares da operação

de classificação praticada na usina industrial da Serrana.

O método discretizante proposto neste trabalho, proporcionou a obtenção de uma curva padrão de partição média, que incorporasse as peculiaridades da operação estudada.

Este fato acarretou uma melhor adequação dos dados gerados em simulações posteriores em relação àqueles levantados experimentalmente, conforme pode ser verificado nas diferenças significativas de correlação entre os dados experimentais e produtos de simulações, em favor do método discretizante.

A principal conclusão deste trabalho, é que o método discretizante torna o modelo de Plitt mais abrangente, já que evita-se a obrigatoriedade de que toda e qualquer curva padrão de partição de qualquer sistema de classificação de minérios em ciclones, respeite a priori a equação de Rosin-Rammler.

Tabela 1. Distribuições granulométricas do "underflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios) e a equação de Rosin-Rammler. Minério calcítico.

Distribuição Granulométrica do "Underflow"

Malhas (μm)	Amostragem com minério calcítico Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo Discretizante Curva Média	Curva Calcítico	Equação de Rosin-Rammler Coef. Medios
840	15,2	17,0	17,5	19,6
420	45,2	42,5	42,5	48,2
297	13,0	12,7	12,6	12,0
149	15,5	17,0	16,6	11,8
74	4,2	4,3	4,1	2,8
44	1,4	1,5	1,5	1,3
-44	5,5	5,1	5,2	4,4
Somatória dos Quadrados dos Desvios		13,1	14,1	46,2
Variância		3,6	3,7	6,8

Tabela 2. Distribuições granulométricas do "overflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios) e a equação de Rosin-Rammler. Minério calcítico.

Distribuição Granulométrica do "Overflow"

Malhas (μm)	Amostragem com minério calcítico Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo Discretizante Curva Média	Curva Calcítico	Equação de Rosin-Rammler Coef. Medios
840	1,0	3,4	3,2	0,2
420	10,5	12,0	12,7	4,9
297	9,0	9,1	9,2	9,6
149	25,6	24,3	24,5	29,9
74	15,2	13,3	13,3	15,2
44	8,4	8,0	7,9	8,5
-44	30,3	29,9	29,2	31,7
Somatória dos Quadrados dos Desvios		13,6	16,0	52,8
Variância		3,7	4,0	7,3

Tabela 3. Distribuições granulométricas do "underflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios) e a equação de Rosin-Rammler. Minério dolomítico.

Distribuição Granulométrica do "Underflow"

Malhas (μm)	Amostragem com minério dolomítico Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo Discretizante Curva Média	Curva Dolomítico	Equação de Rosin-Rammler Coef. Médios
840	14,5	13,5	13,4	15,8
420	43,9	42,5	42,3	48,6
297	13,8	13,8	13,8	13,1
149	16,9	18,1	18,3	12,7
74	4,6	4,9	5,0	3,3
44	1,4	1,4	1,4	1,3
-44	4,9	5,8	5,7	5,2
Somatória dos Quadrados dos Desvios		5,3	6,5	43,7
Variância		2,3	2,6	6,6

Tabela 4. Distribuições granulométricas do "overflow" de simulações com o modelo de Plitt, segundo o método discretizante (arquivos médios) e a equação de Rosin-Rammler. Minério dolomítico.

Distribuição Granulométrica do "Overflow"

Malhas (μm)	Amostragem com minério dolomítico Dados Experimentais	Simulações com o Modelo de Plitt		
		Modelo Discretizante Curva Média	Curva Dolomítico	Equação de Rosin-Rammler Coef. Médios
840	0,2	2,6	2,5	0,2
420	8,5	11,7	11,2	5,1
297	9,9	9,5	9,4	10,1
149	24,4	24,4	24,4	29,5
74	15,2	14,2	14,2	15,8
44	8,5	6,9	7,0	7,2
-44	33,3	30,7	31,3	32,7
Somatória dos Quadrados dos Desvios		26,5	20,1	41,1
Variância		5,1	4,5	6,4

BOLETIM TÉCNICO - TEXTOS PUBLICADOS

BT/PMI/001 - Características Geométricas da Escavação Mecânica em Mineração: Exemplo da Escavadora de Caçamba de Arraste - ANTONIO STELLIN JUNIOR

BT/PMI/002 - Prospecção Geoquímica Experimental na Ocorrência de ouro Tapera Grande - PAULO BELJAVSKIS, HELMUT BORN

BT/PMI/003 - Estudo do Processo de Dupla Flotação visando o Beneficiamento do Minério Carbonático de Fosfato de Jacupiranga - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/004 - Desenvolvimento de um Equipamento Não-Convencional em Beneficiamento Mineral: A Célula Ser-rana de Flotação Pneumática - RICARDO NEVES DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

