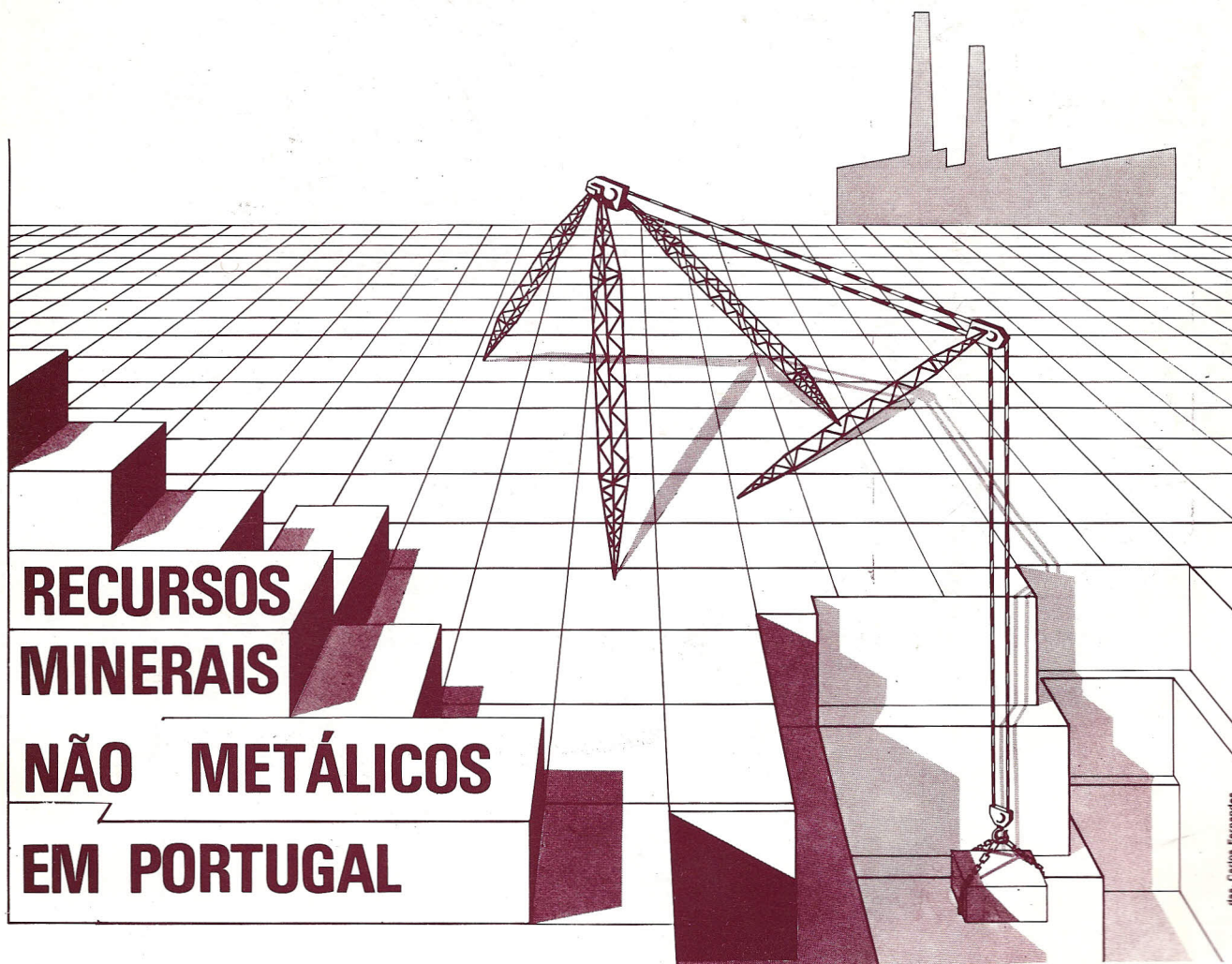


GEO NOVAS



GEONOVAS

Revista da Associação Portuguesa de Geólogos
Associação Profissional fundada em 1976
Membro Fundador da Federação Europeia de Geólogos

Redacção e Administração

Comissão Directiva da Associação Portuguesa de Geólogos
Apartado 2109 1103 Lisboa Códex

Tiragem 600 exemplares

Edição

José Tomás Oliveira
Luís Manuel de Almeida Ramos

Impressão

Serviço de Reprografia, Faculdade de Ciências de Lisboa

Comissão Directiva

José Tomás Oliveira
João Manuel Alveirinho Dias
Manuel Oliveira da Silva
Rui Baptista
Luís Manuel de Almeida Ramos
Cecília Oliveira
Manuel José Lemos de Sousa

Assembleia Geral

Fernando Barriga
José Delgado Rodrigues
Gabriela Bugarin
Gabriel Marcelo de Almeida
Luís Cardoso da Silva
José Correia Romão

Conselho Fiscal

Ricardo Manuel Gomes Figueiredo
Bernardo José Ferreira Reis
Maria de Fátima Gomes Beato
Rúben Dias
Maria Luisa Ribeiro

Depósito Legal: 25590/91

Optimização da Produção de Inertes em Pedreiras

Modelagem e Simulação de Circuitos.

M. R. Machado Leite e J. M. Santos Baptista

RESUMO:

Com base em modelos descritores do funcionamento de máquinas de fragmentação e classificação de rochas e minérios, os autores propõem o uso de algoritmos de simulação numérica de circuitos para estudo das performances das instalações industriais de produção de inertes.

Após uma breve introdução teórica à modelagem das operações unitárias de tratamento de minérios, apresentam-se exemplos de modelos fenomenológicos para simulação de máquinas de fragmentação e classificação de rochas.

Apresentação dum algoritmo para simulação dum circuito complexo de produção de inertes e seu uso para previsão dos níveis de produção de cada lote granulométrico para diversas configurações de regulação dos parâmetros de afinação.

Finalmente, apresentação de técnicas de optimização automática como uma nova via para a concepção do Projecto de Engenharia, para ligação de análise técnica à análise económica.

ABSTRACT:

The use of algorithms of numerical simulation, based on phenomenological models of crushing and screening, is proposed for circuit design and optimization of industrial plants for aggregate production.

The first part of the paper aims at presenting a brief theoretical approach to the modelling of unit operations in Mineral Processing and giving examples of crushing and screening models as modules used by a package for simulation of a complex flowsheet for aggregate production, with three crushing stages. This software is used for numerical experimentation in order to predict the production levels of each product, using the crusher setting as the main control variable.

Finally, Dynamic Programing techniques, applied to a case studied, are presented as a new way for plant design.

Palavras Chave: Cominuição, Classificação, Modelos Cinéticos, Programação Dinâmica, Flowsheeting.

I - INTRODUÇÃO

A modelagem numérica na simulação de operações industriais demonstrou já ser uma excelente ferramenta para efectuar previsões do comportamento dos processos industriais e está a ser cada vez mais usada sistematicamente como auxiliar no planeamento industrial em diversos ramos da engenharia.

A experiência da equipa de investigação do Dep. Minas FEUP neste

¹ Eng. de Minas, Prof. Associado do Dep. Minas - Faculdade Engenharia Porto

² Eng. de Minas, Assistente Dep. Minas - Faculdade de Engenharia Porto

tipo de abordagem tem ido um pouco mais longe. Com efeito, na Tecnologia do Tratamento de Minérios, os modelos capazes de descrever certas fenomenologias perfeitamente identificáveis na condução dos processos tecnológicos em estudo, têm também funcionado como autênticas janelas de conhecimento, ou de observação, duma realidade muito complexa, no sentido em que as dificuldades encontradas durante o ajuste desses modelos a dados experimentais funcionam como detectores do desajuste da própria descrição teórica (LEITE, 1990). O uso sistemático desses modelos fenomenológicos, tomado segundo este ponto de vista, leva (e tem levado, efectivamente) ao seu contínuo aperfeiçoamento e, naturalmente, a um crescente esclarecimento dos processos teóricos em estudo.

Genericamente, um modelo é, antes de mais, uma forma de representação física, conceptual e matemática da realidade capaz de a descrever nas suas propriedades e comportamentos.

Depois de concebidos e transportados para computador, os modelos podem ser usados para efectuar simulação, autêntica experimentação numérica, cuja validade, comparativamente à experimentação laboratorial, é justificada pelo que atrás ficou dito sobre modelos fenomenológicos. Comparando o comportamento do modelo com a realidade experimental é possível não só testá-lo, como também refinar e/ou corrigir a interpretação na qual ele se baseia.

Do ponto de vista técnico (por exemplo, de projecto), se a aproximação conseguida com o modelo for satisfatória, isto é, se a resposta do modelo coincidir razoavelmente com o que do fenómeno é conhecido em termos experimentais reais, é legítimo pensar em efectuar simulações fora das condições experimentais conhecidas e aceitá-las como previsões do processo real. Nestes casos, o **MODELO DESCRITOR** transforma-se em **MODELO PREVISOR**.

Este ponto de vista é extraordinariamente importante para o estudo e desenvolvimento da tecnologia do tratamento de matérias primas, cujas operações unitárias principais -- **fragmentações, classificações e concentrações** -- envolvem em geral elevados consumos, baixos rendimentos energéticos e fracas eficiências técnicas. Perante uma situação com estas características, duas atitudes conceptuais paralelas podem ser assumidas: ou se tenta minimizar os consumos para baixar os custos unitários, sendo este o parâmetro fundamental do processo produtivo, ou se assume como objectivo fundamental a optimização da qualidade dos produtos obtidos (calibre, forma, estado de libertação, teor). Esta última opção é mais positiva porque parte do pressuposto que os consumos energéticos são utilizados para produzir as partículas e os lotes mais adequados à comercialização ou ao tratamento posterior.

Assumir esta concepção implica admitir que as **fragmentações industriais** deixam de ser meros fenómenos de redução de calibre para se transformarem em autênticas **operações que geram novas propriedades nas partículas**. Por seu lado, as operações de **separação**, (sejam de classificação ou de concentração), ao lidarem com lotes de partículas de propriedades optimizadas, de certo produzirão maiores eficiências industriais.

Qualquer tentativa de abordagem das questões segundo este ponto de vista vai, necessariamente, exigir a capacidade de fazer previsões sobre as novas propriedades geradas e dos respectivos caudais produzidos e esta, por sua vez, só poderá ser atingida com o recurso à **MODELAGEM** e **SIMULAÇÃO**.

II - MODELOS PARA SIMULAÇÃO DE MAQUINAS DE FRAGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS

Modelo Cinético de Fragmentação

Um processo de fragmentação, enquanto gerador de novas partículas a partir de partículas-mãe preexistentes, é descrito adequadamente, segundo MADUREIRA (1972), por um processo de Markov de primeira ordem (a repartição de calibres em um dado estágio do processo de fragmentação depende apenas da repartição de calibres em um estágio anterior e do modo como se transita entre esses dois estágios) que tem por equação a formulação genérica de Chapman-Kolmogorov-Smolushovsky:

$$C(T_2) = B(T_2, T_1) * C(T_1) \quad [1]$$

em que $C(T)$ representa o vector composição granulométrica no instante T e $B(T_2, T_1)$ a Função de Transição entre os instantes referidos. A aplicação da função $B(.,.)$ sobre uma dada composição granulométrica original conduz à previsão da granulometria do produto final.

Se a equação [1] for trabalhada de modo a explicitar o tempo de modo contínuo, passar-se-á à sua formulação diferencial:

$$C(t+dt) = C(t) - F * C(t) * dt \quad [2]$$

ou,

$$dC(t)/dt = [C(t+dt) - C(t)]/dt = - F * C(t) \quad [3]$$

que apresenta o processo de fragmentação como uma **cinética de primeira ordem**, sendo F a matriz alteração instantânea das composições.

Esta descrição formal, evitando qualquer tentativa de descrição mecanicista do processo, encara a cominuição sob um ponto de vista estocástico, já que cada acontecimento elementar de fragmentação é condicionado por uma multiplicidade incontável de factores.

Na formulação proposta, a **Matriz Transição** descreve, necessariamente, todos os fenómenos intervenientes no processo, quer os conhecidos ou facilmente identificados quer mesmo os desconhecidos. Com base na interpretação física dos fenómenos tentaremos decompor esta matriz transição em funções (matrizes) parcelares, capazes de descreverem cada um dos fenómenos identificados, em particular:

- a probabilidade de que alguma partícula de calibre C_j tenha sofrido fragmentação - conhecida por função destruição ou selecção;
- a probabilidade de que essa partícula, se sofreu fragmentação, tenha originado uma partícula de calibre $C_i < C_j$ - conhecida por função formação ou fragmentação.

Com esta decomposição da matriz F , a equação diferencial [3] pode ser escrita na seguinte forma:

$$dC_i/dt = -S_i * C_i + \sum_{j>i} S_j * B_{i,j} * C_j \quad [4]$$

representando:

S_j - a matriz destruição, ou seja a velocidade de destruição do calibre j ;

$B_{i,j}$ - a matriz formação, isto é, a repartição de calibre das

partículas que resultaram da fragmentação das partículas de calibre j.

A equação [4] lê-se do seguinte modo: a *variação da massa dum dado lote granulométrico, num certo intervalo de tempo, obtém-se computando as partículas que abandonaram esse lote, por fragmentação, bem como as que a ele passaram a pertencer, por fragmentação de outras pertencentes a lotes mais graúdos.* Porque esta leitura encerra declaradamente uma descrição de fenómenos intervenientes, diz-se que um modelo que a utilize pertence à classe dos **Modelos Fenomenológicos**. A experiência com estes modelos tem demonstrado que os valores da função destruição são influenciados directamente pelas características do equipamento usado, enquanto que os valores da função formação variam mais com as características mecânicas do material a fragmentar.

Modelo Cinético de Crivagem

De acordo com vários autores, FERRARA (1975), um crivo vibrante de trabalho contínuo pode ser descrito como compreendendo duas zonas de cinéticas diferentes:

- na parte inicial do crivo ocorre o fenómeno da **estratificação** que, levando os finos para as camadas mais inferiores do leito de partículas, desempenha um papel muito importante na sua rápida retirada do sobrecrivo;
- na segunda parte do tabuleiro se opera uma crivagem por tentativas, em que as partículas de calibre próximo da malha da rede tentam sucessivamente a sua chance de atravessamento.

Estes dois fenómenos têm sido descritos analiticamente de modos diferentes. Com efeito, durante a estratificação, devido à rápida acumulação das partículas de calibres mais finos junto da rede, há uma grande multidão de grãos em competição pela relativamente pequena quantidade de aberturas disponíveis, pelo que se diz que o processo é de **saturação** e a cinética descrita como sendo de **ordem zero** porque o fluxo de atravessamento de partículas através da rede é máximo para cada lote granulométrico, independentemente de ser maior ou menor a massa de partículas nele contidas. Em contrapartida, porque na segunda parte do tabuleiro há excesso de aberturas em comparação com o número de partículas que pretendem atravessá-lo, diz-se que o processo é de **subsaturação** e a cinética de **primeira ordem** porque o fluxo de atravessamento é proporcional a massa de partículas de cada lote que se encontram sobre o tabuleiro.

Analiticamente o processo pode ser descrito por:

$$dM_1(i)/dt = -K_f(i) \quad (\text{cinética de ordem zero}) \quad [5]$$

sendo t o tempo e $K_f(i)$ o fluxo da atravessamento através do crivo, dependente da probabilidade de contacto, da probabilidade de passagem após contacto e da massa total, M_1 , de partículas em saturação (que depende, naturalmente, do caudal de alimentação ao crivo);

$$dM_2(i)/dt = -K_p(i) * M_2(i) \quad (\text{cinética de primeira ordem}) \quad [6]$$

sendo $K_p(i)$ apenas a probabilidade de passagem após contacto (LEITE,

1990) e M2 a massa de partículas ainda sobre a rede.

A integração dos dois sistemas de equações diferenciais, [5] e [6], conduz directamente à determinação das composições granulométricas dos dois produtos finais, o sobrecrivo e o infracribo.

Experiência com este modelo tem demonstrado uma muito boa aderência a dados reais e mostrado que os valores dos vectores K_f e K_p se relacionam com o caudal de alimentação, calibre de corte, dimensões do tabuleiro, tipo de mecanismo de vibração, inclinação, etc, que são variáveis para regulação do próprio modelo.

III - ALGORITMO DE SIMULAÇÃO DUMA INSTALAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE INERTES

Com o intuito de ilustrar as possibilidades das técnicas de modelagem e simulação descritas nos parágrafos anteriores, apresenta-se de seguida uma sequência de ensaios numéricos sobre um algoritmo que simula uma instalação complexa de produção de inertes, semelhante a muitas que se encontram instaladas no nosso país.

Nos tempos actuais, quando uma empresa se decide a instalar uma central de britagem e classificação em geral adquire um projecto inteiro, de chave na mão, sem ter, na maioria dos casos, um estudo profundo do mercado e, mais grave ainda, sem ter ensaiado o comportamento do material rochoso que vai ser usado como matérias prima. Frequentemente, quando a empresa fornecedora do equipamento é representante dum grande grupo estrangeiro, o projecto instalado corresponde a uma das soluções-tipo disponíveis no "Know-how" desse grupo e a formação, quando é dada, abrange apenas os aspectos de manutenção e reparação e nunca a manipulação das variáveis afinadoras dos equipamentos e dos circuitos. Após arranque, quando cessa a assistência técnica por parte da empresa fornecedora, a instalação, que se desregula com o desgaste diário, vai ficar nas mãos de um encarregado mais ou menos habilitado. É, então, sendo difícil a um técnico qualificado assumir o controlo por ausência absoluta de dados quantitativos relativos a regulações, curvas granulométricas, produções, etc, porque em geral não foram instalados dispositivos nem rotinas de amostragem para controlo de desgaste das forras e da qualidade dos produtos.

Embora aberrante, esta situação tem-se mantido até ao presente porque este ramo industrial tem vivido num aparente "estado de graça" perante um mercado muito favorável, que não só tem estado disposto a pagar preços artificialmente elevados, como a discutir pouco a qualidade dos produtos. É previsível, no entanto, que com a conclusão das grandes infraestruturas actualmente em curso e com o esgotamento dos financiamentos estruturais comunitários se venha a assistir a uma recessão do mercado e, nessa altura, as preocupações técnicas em termos de optimização da actividade produtiva vão, por certo, nortear a gestão deste tipo de empresas.

Com o decorrer da inserção da empresa no sector produtivo, o mercado começa a ser mais conhecido e rapidamente se conclui que nem todos os lotes produzidos são os mais procurados. Mais ainda, essa procura é sazonal e controlada por variados factores de modo que os lotes mais procurados não são sempre os mesmos. Por isso é nosso objectivo explicar como é possível, com o "package" desenvolvido

maximizar a produção dos lotes sazonalmente mais pretendidos, maximizando o benefício.

No exemplo que se vai discutir de imediato, (cujo circuito se apresenta na fig. 1), o diagrama apresenta três andares de fragmentação e permite fabricar o conjunto de britas graúdas -- + 65 mm (rachão), 65/45, 45/25, 25/15 e -15 mm -- e, a partir dos lotes 65/45 e 45/25 e -15, menos procurados ou menos valorizados comercialmente, produzir a série das gravilhas finas desde o lote 15/7 até -2 mm (areias grossas).

Admite-se que na base deste "package de software" se encontram modelos ajustados sobre dados colhidos na instalação real, suficientemente representativos, quer das várias regulações, quer dos tipos de rocha aflorantes na frente. Dito de outro modo, o rigor da previsão efectuada será tanto maior quanto mais representativa for a amostragem que serve de base a todo o processo.

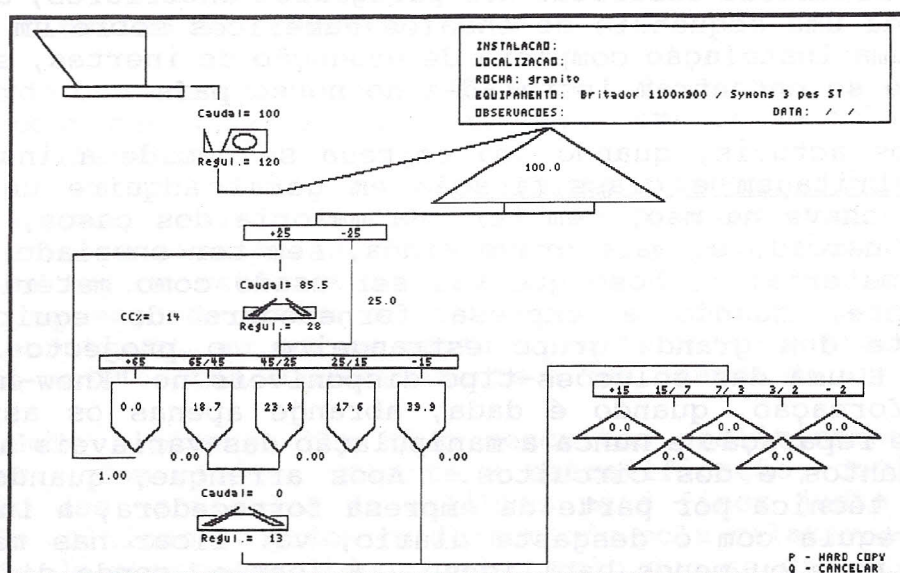


Figura 1

Proposição do problema

Numa instalação deste tipo existem basicamente dois tipos de variáveis passíveis de manipulação: as regulações dos fragmentadores, em particular dos dois granuladores de cones, e as malhas dos crivos que são usados na selecção dos vários lotes. No software que vamos apresentar qualquer uma destas variáveis é facilmente manipulável pelo operador através dum ecran muito amigável. Porém, para maior clareza da exposição limitaremos as alterações apenas aos valores das regulações dos dois granuladores de cones.

Para ilustração vão ser analisados dois problemas que correntemente afligem os gestores:

- regular a instalação para maximizar a produção do lote 25/15 mm;
- maximizar as produções dos lotes 15/7 e 7/3 mm.

1º Caso - Otimização do LOTE 25/15 mm

Quando o LOTE 25/15 for prioritário e, evidentemente, não se estiver interessado nos lotes mais graúdos, como não há qualquer possibilidade de recirculação dos lotes 65/45 e 45/25, a alternativa lógica será apertar o primeiro granulador (Symons Standard), diminuindo-lhe sucessivamente a regulação até encontrar o valor máximo possível. Por razões de comodidade na análise mantém-se o caudal de alimentação ao circuito em 100 Ton/h para que as diversas produções possam ser lidas como valores percentuais da produção total (embora as suas unidades sejam também Ton/h).

Os resultados das experiências sucessivas podem ser analisados no quadro seguinte. Observa-se na fig. 2 os valores correspondentes à solução mais favorável, que corresponde a uma regulação de 13 mm para a máquina em questão. Reconhece-se, assim, um aumento substancial da produção do lote pretendido que se situa na ordem dos 71.5%.

Quadro nº I

Regulação Symons (mm)	Lote 25/15 %
28	17.8
20	20.2
18	21.5
15	26.0
13	30.2
10	28.9

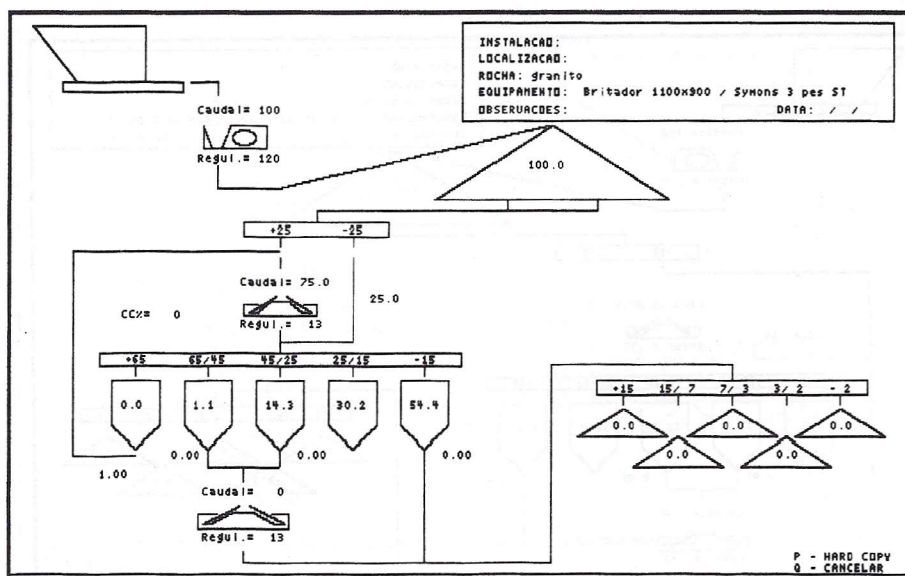


Figura 2

2º Caso - Optimização dos LOTES 7/3 e 15/7 mm

Neste caso vai ser seguida uma rotina um pouco mais complexa, por dois motivos: 1) porque a optimização destes produtos envolve o controlo dos dois andares de granulação; 2) porque a qualidade destes produtos pode variar imenso, consoante forem produzidos exclusivamente com pedra de boa qualidade ou incorporarem o material "fino" presente na descarga do britador primário oriundo de rocha mais alterada, ou mesmo de contaminação com terras de cobertura.

A rotina que se vai seguir pode ser acompanhada através das figuras que entretanto se vão apresentando.

Numa primeira fase coloca-se o by-pass do silo do rachão (+65 mm) todo aberto, para permitir circuito fechado completo, e todos os outros fechados de modo a poder observar-se a influência do Symons Standard na produção dos lotes 65/45 e 45/25 (que vão ser usados no fabrico das gravilhas finas pretendidas). A estratégia das sucessivas corridas efectuadas consiste em abrir o referido granulador para aumentar o valor da carga de retorno até se obter o máximo do lote 65/45. As experiências mostram que a abertura da regulação do Symons ST de 28 mm para 35mm conduz a um aumento da carga circulante de 14% para 30% e a um aumento da produção do referido lote em cerca de 30% à custa da diminuição dos lotes 45/25 e 25/15.

A fig. 3, após abertura do by-pass do lote -15 mm, mostra a produção de gravilhas finas feitas à custa de material proveniente directamente do britador primário. A distribuição observada, com dois máximos nos extremos, evidencia a mistura de dois tipos de produtos: o lote 15/7 é basicamente material produzido pelo Symons Standard e pelo britador primário, enquanto no lote -2 mm estão fundamentalmente os finos naturais vindos do desmorte.

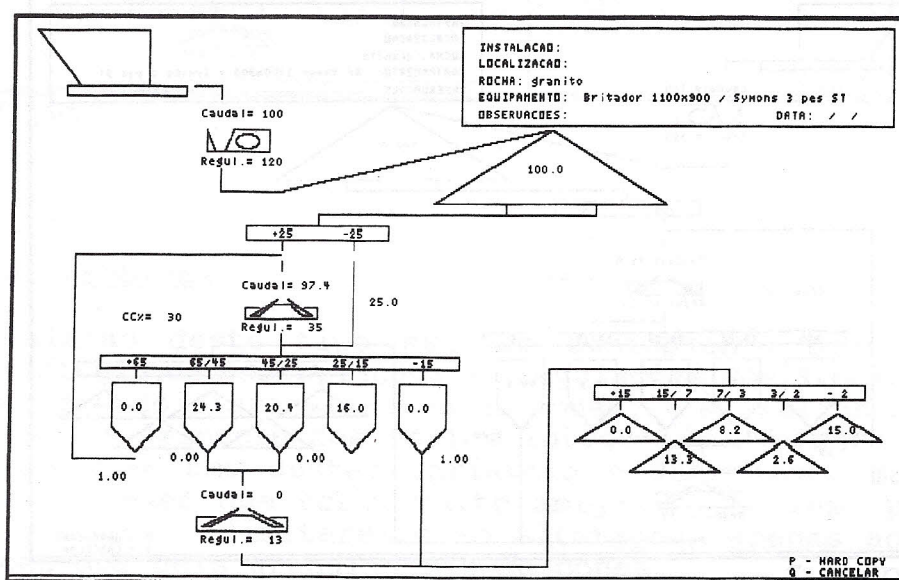


Figura 3

O passo seguinte na exploração do programa consiste em voltar a fechar o by-pass do "pó" (-15 mm) e em abrir os dois correspondentes

aos silos dos lotes 65/45 e 45/25 para observar a produção de gravilhas finas fabricadas pelo segundo granulador (Symons Cabeça Curta). A estratégia seguida na condução das várias corridas consiste em apertar sucessivamente a regulação deste granulador, podendo observar-se no quadro nº II os respectivo resultados.

Os resultados mostram a evolução da produção sucessivamente para os lotes mais finos, verificando-se que a optimização dos lotes pretendidos se obtém entre as regulações de 6 e 8 mm. Embora conduzindo ao melhor aproveitamento da matéria prima original, a desvantagem óbvia deste procedimento é a diminuição da capacidade da máquina, como se pode avaliar na última coluna do quadro nº II. Este aparente inconveniente poderá ser compensado com a laboração do sector de produção de gravilhas finas em dois turnos, aproveitando-se a capacidade de armazenamento dos silos.

Quadro nº II

Ref	+15	15/7	7/3	3/2	-2	Cap T/h
13	14.1	21.5	4.4	1.4	3.2	35
10	5.8	25.8	7.4	2.1	3.6	25
8	2.6	21.5	13.7	2.7	4.3	22
6	0.6	13.1	22.9	3.2	5.0	18

Na fig. 4 apresenta-se a configuração final encontrada para a optimização do caso em questão, verificando-se aumentos de produção superiores a 200%.

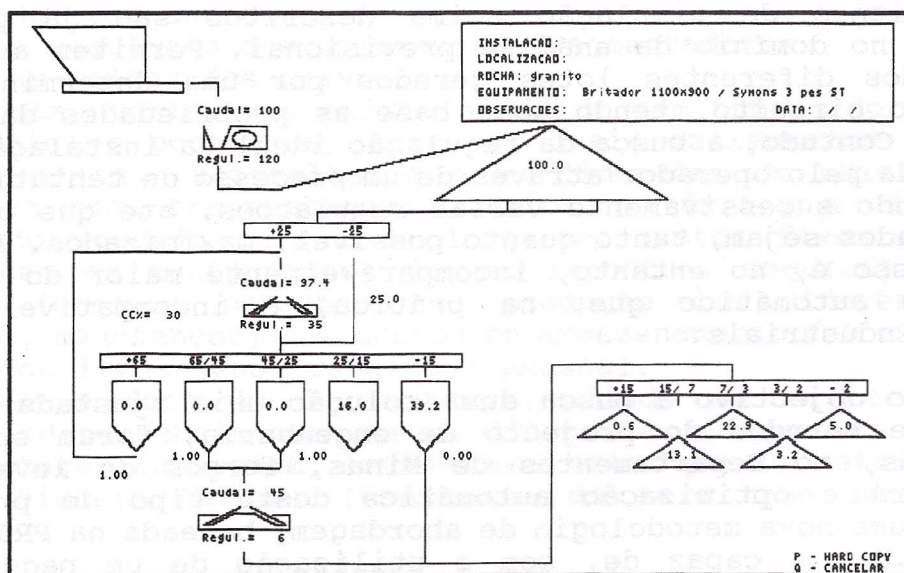


Figura 4

O único inconveniente desta regulação resulta da impossibilidade de o granulador receber o caudal que o circuito lhe impõe. A alternativa correcta a preconizar é a de controlar os alimentadores de comando da descarga dos "by-passes" de modo a debitarem unicamente

o caudal passível de ser tratado pelo Symons Cabeça Curta. Um exemplo da manipulação deste by-pass pode ser analisado na fig. 5 em que não se permitiu a ultrapassagem do capacidade nominal garantida pelo Symons C.C. regulado a 6 mm (18 T/h, conforme quadro nº II).

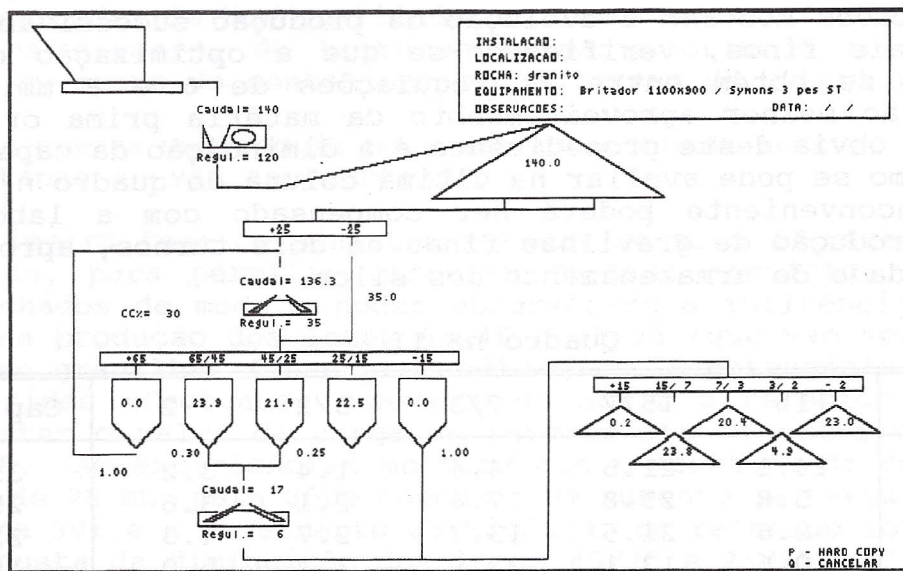


Figura 5

IV - ALGORITMO DE OPTIMIZAÇÃO

Os algoritmos de simulação acima descritos são já poderosas ferramentas no domínio da análise previsional. Permitem avaliar as produções dos diferentes lotes gerados por uma determinada configuração do circuito, tendo como base as propriedades da rocha a fragmentar. Contudo, a busca da regulação ideal da instalação tem de ser efectuada pelo operador através de um processo de tentativa-erro, experimentando sucessivamente várias regulações, até que o lote ou lotes desejados sejam, tanto quanto possível, maximizados. A rapidez deste processo é, no entanto, incomparavelmente maior do que a do cálculo não automático que, na prática, é incompatível com as exigências industriais.

Tendo como objectivo a busca duma solução mais ajustada às novas exigências e métodos do projecto de engenharia, foram entretanto desenvolvidos, no Departamentos de Minas, forças de investigação aplicada para a optimização automática deste tipo de problemas. Trata-se de uma nova metodologia de abordagem, baseada na **PROGRAMAÇÃO DINÂMICA (P.D.)** e capaz de, com a utilização de um pequeno computador, fornecer em poucos minutos os valores de todas as variáveis da instalação que maximizam o seu benefício. Este método é de fácil implementação, não exige grandes equipamentos informáticos nem formação intensiva de pessoal e, contudo permite, com um investimento insignificante, aumentos consideráveis no rendimento da instalação.

A decisão de melhorar o funcionamento dum diagrama de produção de inertes decorre basicamente das duas necessidades seguintes:

1ª- aumentar a produção total, aproveitando a capacidade máxima das máquinas existentes.

2ª- aumentar a produção de determinado(s) lote(s).

No primeiro caso, o simples aumento do caudal de alimentação produz uma efectiva melhoria do benefício. Contudo, essa ocorrência só se verifica em situações pontuais, como seja o caso das instalações subdimensionadas, que por essa simples razão não estão a tirar o maior rendimento das condições normais do mercado, em períodos de grande procura, em que o mercado é capaz de absorver todos os produtos que a indústria lhe oferece. Neste último caso, trata-se de um fenómeno temporário onde o aumento da produção global apenas serve para contornar o problema sem resolver a situação de fundo, cuja solução passa, para além de um aumento da produção, pela escolha criteriosa das malhas dos crivos dos circuitos fechados e das percentagens de recirculação de lotes de menor cotação capazes de, ainda, gerar outros mais valiosos. Caímos assim na segunda reacção que dificilmente é levada às últimas consequências, mesmo quando se recorre ao cálculo automático, devido ao enorme volume dos cálculos envolvidos.

No entanto, convém lembrar que o aumento de benefício obtido em cada hora de trabalho, é multiplicado por um factor superior a 1700 em cada ano (a 8 horas de trabalho por dia). Sabendo que, em algumas instalações, se conseguem melhorias superiores a 50% no rendimento, pode facilmente inferir-se da extraordinária importância deste controlo da produção.

Para o efectuar torna-se necessário, em primeiro lugar, proceder à identificação das variáveis que influenciam a sua resolução, como por exemplo:

- o caudal horário de alimentação da instalação.
- as curvas granulométricas à entrada e à saída de cada fragmentador .
- a regulação dos diferentes fragmentadores.
- as malhas dos crivos.

Além destas variáveis, existe ainda um sem número de factores de ordem técnica e económica, entre as quais salientamos: os caudais máximos e mínimos aconselhados e as dimensões do maior bloco admissível em cada fragmentador; o valor unitário e a capacidade de absorção do mercado para cada lote; os custos fixos de produção (depreciação do equipamento, juros, impostos, seguros); os custos variáveis (energia consumida na produção dos diferentes lotes, reparações, manutenção); os custos de armazenamento dos excedentes de produção dos lotes menos vendidos; pessoal.

Este enorme conjunto de factores, aliado às características de relativa independência com que os diferentes andares de um diagrama de fragmentação funcionam, levou-nos a optar por um método desenvolvido por Richard Belmman (1962) que dá pelo nome de Programação Dinâmica.

Resumidamente, este método consiste na subdivisão de um problema com um grande número de variáveis, num conjunto de subproblemas de mais fácil resolução. Resolvidos estes últimos por determinada ordem, encontra-se fácil e rapidamente a solução do problema inicial.

Para tentar compreender o método escolhido tomemos o exemplo simples de um diagrama de fragmentação com três andares em circuito aberto, sem qualquer restrição e sem considerar os custos de produção.

Identificando as variáveis do problema temos:

No 1º andar (primário)

- Caudal de alimentação (variável independente, VI).
- Regulação (VI).
- Curva granulométrica de saída (variável dependente, VD).

No 2º andar (secundário)

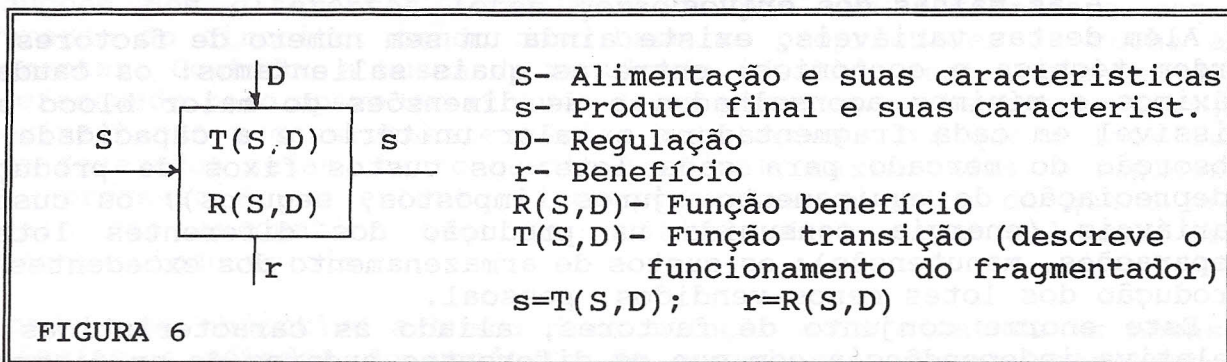
- Curva granulométrica à entrada (VD).
- Regulação (VI).
- Curva granulométrica à saída (VD).

No 3º andar (terciário)

- Curva granulométrica à entrada (VD).
- Regulação (VI).
- Curva granulométrica final (VD).

Encontramo-nos, assim, perante um problema com quatro variáveis independentes. Admitindo que, de uma forma discretizada, cada uma dessas variáveis toma apenas 10 valores, teremos 10000 soluções possíveis: cálculo impraticável em pesquisa exaustiva. Se, optando por uma pesquisa inteligente, esse cálculo for reduzido para 10%, teremos ainda 1000 soluções por onde escolher. Contudo, neste mesmo problema, recorrendo à P.D., a resposta exacta é obtida após apenas 40 pesquisas, o que corresponde a 0.4% das soluções possíveis.

Vejamos como: considerando cada andar como um problema independente, podemos dizer que a melhor solução, é obtida para a regulação do terciário que, relativamente ao caudal fragmentável que recebe, produza o maior benefício. Deste modo, normalizando a sua alimentação em termos percentuais, resta-nos apenas optar pela melhor das dez soluções possíveis neste estágio. Esta escolha é efectuada recorrendo a uma função a que chamaremos **Função Benefício** ou **Função Objectivo**. Na fig.6 estão representadas esquematicamente as funções e variáveis deste subproblema.

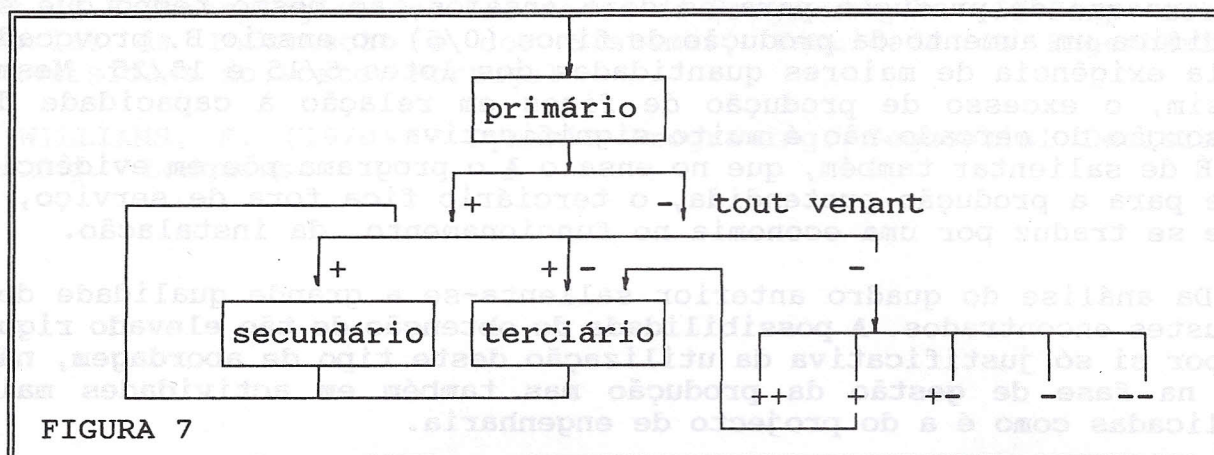


Para o segundo estágio o processo é semelhante. Considerando a sua alimentação normalizada, é escolhida dentro das suas dez regulações a que, em conjunto com a do terciário, produz o maior benefício.

No primeiro andar procede-se de modo idêntico, sendo a solução encontrada testada para os diferentes valores da alimentação.

Esta metodologia de abordagem pode, matematicamente e de um ponto de vista formal, ser relacionada com os processos de decisão markovianos de primeira ordem. Ou seja, depois de tomada a decisão D_k no estágio k , a situação s_k que dela resulta depende apenas de S_k e D_k e não de nenhuma situação prévia $S_1, S_2, \dots, S_{k-1}$.

Para circuitos mais complexos e com restrições (como o da fig. 7) a resolução deixa de ser tão simples, no entanto, dificuldades encontradas podem ser facilmente ultrapassadas com uma abordagem sistematizada do problema.



Quanto ao ajuste dos resultados obtidos em relação às exigências impostas e à redução da produção de finos de baixa cotação, verifica-se (quadro III) que, com o diagrama da fig.7, através de pequenas alterações criteriosas nas regulações, é possível, com o recurso à metodologia proposta, responder de um modo eficaz às diferentes solicitações do mercado.

Apenas a título de exemplo, fornecemos no quadro III o resultado de dois ensaios (A e B) realizados com o programa de otimização da oficina de tratamento representada na fig.7.

QUADRO III

valor unitá- rio	$\varphi_m - \varphi_M$ mm	ENSAIO A		ENSAIO B	
		Produção t	lim. super. t	Produção t	lim. super. t
1.10	35-65	159.9	160	98.8	100
1.00	25-35	42.8	45	8.5	10
1.40	15-25	30.3	35	81.5	85
1.45	5-15	15.1	10	54.0	50
0.80	0-5	1.9	2	7.2	5
% Recircul.		0 %		85%	
Reg. Primár.		180 mm		180 mm	
Reg. Secund.		63 mm		32 mm	
Reg. Terc.		Fora de serviço		25 mm	

Nota: lim. super. é o limite superior que o mercado absorve; % Recirculada refere-se ao lote + da fig. 7

Nestes ensaios foi pedido ao programa que desse as regulações do circuito e uma previsão das produções para um mercado com uma capacidade de absorção limitada por um "limite superior" e um "valor unitário", para cada lote.

Da análise do quadro III verifica-se que apenas no lote 5/15 existe um excesso de produção para os dois ensaios, ao mesmo tempo que se verifica um aumento da produção de finos (0/5) no ensaio B, provocado pela exigência de maiores quantidades dos lotes 5/15 e 15/25. Mesmo assim, o excesso de produção de finos em relação à capacidade de absorção do mercado não é muito significativa.

É de salientar também, que no ensaio A o programa põe em evidência que para a produção pretendida, o terciário fica fora de serviço, o que se traduz por uma economia no funcionamento da instalação.

Da análise do quadro anterior salienta-se a grande qualidade dos ajustes encontrados. A possibilidade de obtenção de tão elevado rigor é por si só justificativa da utilização deste tipo de abordagem, não só na fase de gestão da produção mas também em actividades mais delicadas como é a do projecto de engenharia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aris, R. et al (1964) - Optimization of Multistage Cyclic and Branching System by Serial Procedures. A. I. Ch. E. Journal, vol. 10, nº6

Baptista, J. S. (1988) - Programação Dinâmica, Uma abordagem para a Fragmentação Graúda. Departamento de Minas da F.E.U.P.

Belman, R. E. (1962) - Applied Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton

Cooper, M. et al (1984) - A Dynamic Programming Algorithm For Multiple-Choice Constrains. Comp. & Maths With Appls, Vol 10, nº 3 pp 279-282, Pergamon Press.

FERRARA, G. et al (1975) - A Contribution to Screening Kinetics . XI International Mineral Processing Congress, University of Cagliari, Cagliari, Italy.

LEITE, M.R.M. (1985) - Cinética da Fragmentação. Método Global para Determinação de Parâmetros Cinéticos. Estudos, Notas e Trabalhos, D.G.G.M., Tomo XXVII, Porto, Portugal.

LEITE, M.R.M. (1990) - Kinetic Models for the Simulation of Crushing Circuits. Minerals Engineering, Vol. 3, No. 1/2, pp. 165 - 180, U.K..

LYNCH, A.J. (1977) - Mineral Crushing and Grinding Circuits. Elsevier, Amsterdam.

LYNCH, A.J. (1986) - Simulation: The Design Tool for The Future. In Mineral Processing at a Crossroads (ed. B.A. Wills / R.W. Barley), Martinus Nijhoff, Dordrecht.

MADUREIRA, C.M.N. et al (1972) - Conceitos Fundamentais para o Estudo Fenomenológico dos Processos de Fragmentação. II Simp. sobre Teorias da Informação e dos Sistemas, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.

WILLIAMS, K. (1970) - Dynamic Programing. Sequential Decision-Making. Longmans.