

## **APLICAÇÃO DA COMPUTAÇÃO EM SISTEMAS MINEIROS**

*Carlos Diniz da Gama*  
Pesquis. Coord. II  
DMGA — IPT (S. Paulo)

### **RESUMO**

Considerando o sistema mineiro como um conjunto integrado de objetos e seus atributos, relacionados com a produção e a informação (ou controle) nos trabalhos de mineração, salientam-se as suas principais características, quer nas explorações subterrâneas, quer a céu aberto.

A utilização de computadores na análise desses sistemas é naturalmente procurada em face da complexidade e dimensão dos modelos que simulam os seus comportamentos, sendo estendida aos campos do planejamento e da otimização das operações unitárias envolvidas. Por intermédio do tratamento de um exemplo concreto, é feita a aplicação de métodos computacionais à pesquisa da combinação ótima entre as especificações das operações tecnológicas integrantes do fluxo de produção de uma mina, dentro de um critério de otimização apropriado.

# **APLICAÇÃO DA COMPUTAÇÃO EM SISTEMAS MINEIROS**

*Dr. Carlos Diniz da Gama*  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

**Coordenador:**  
*Eng<sup>o</sup> Hélio Camargo Mendes*  
Escola Politécnica – USP

*O SR. COORDENADOR: O conferencista desta tarde é o Dr. Carlos Diniz da Gama, pesquisador-coordenador da Divisão de Minas e Geologia Aplicada do I.P.T., e professor colaborador do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que vem militando há bastante tempo no campo da computação aplicada aos problemas mineiros.*

*Hoje ele proferirá palestra sobre o tema "Aplicação da Computação em Sistemas Mineiros".*

*Está, pois, com a palavra o prof. Dr. Carlos Diniz da Gama.*

### **O SR. CARLOS DINIZ DA GAMA**

Meus senhores, creio que este é um assunto que, evidentemente, não se pode desenvolver numa única aula, muito menos numa palestra, no tom apressado como me proponho a apresentá-lo.

O assunto é bastante interessante, quer sob o ponto de vista científico, quer sob o ponto de vista da aplicação aos trabalhos da Engenharia.

Já de si, o tema que me convidaram para apresentar poderia ter, com certeza, a possibilidade de ser abordado em uma dúzia ou mais de palestras — naturalmente não proferidas por mim, mas por pessoas bem mais credenciadas do que eu.

Ora bem, a aplicação da computação em sistemas mineiros, para começar, acho que exige uma definição de conceitos.

Hoje em dia existem na bibliografia da especialidade, um certo número de termos cujos significados se confundem. Em particular, no que diz respeito a este assunto, nós nos habituamos a ler Análise de Sistemas; numa publicação, se usa a designação de Engenharia de Sistemas; em outras, ainda, se fala da Pesquisa Operacional, também com idêntico sentido.

A verdade é que cada um desses conceitos tem o seu próprio significado que convém, desde já, definí-lo.

De uma maneira geral, podemos dizer que Análise de Sistemas seria a aplicação de métodos científicos, para resolução de problemas relacionados com a procura de soluções ótimas no comportamento de determinados sistemas, baseando-se em avaliações objetivas e quantitativas de todas as alternativas de ação. Por exemplo, em Sistemas Mineiros, poderíamos, então, falar em Sistema do Tipo de Produção e Sistema de Tipo de Informação.

São os dois grandes grupos de sistemas, que, aliás, não só de Engenharia de Minas, mas podem ser estendidos a qualquer outro ramo de Engenharia. No que se refere à designação Engenharia de Sistemas, é associada ao planejamento, à concepção e ao projeto de sistemas, com vistas a procurar as suas condições de funcionamento ótimas. Como vêm, está além do conceito de análise de sistemas, pois é mais uma aplicação com vistas aos trabalhos de Engenharia geralmente precedendo o início da atividade dos sistemas.

Em qualquer desses dois casos, de uma maneira geral, não consideramos que se torna indispensável criar modelos matemáticos que representem o funcionamento de sistemas, ou que simulem o comportamento de sistemas.

No que diz respeito à Pesquisa Operacional, já é fundamental a criação de modelos matemáticos, porque a Pesquisa Operacional é constituída por um conjunto de técnicas ou de métodos bem definidos que se aplicam aos sistemas, desde que eles sejam previamente estabelecidos, e com o objetivo de os otimizar.

Então, para nós aplicarmos, quer técnicas de filas de espera, quer de gestão de estoques, quer redes PERT e CPM, quer de programação linear, todas essas técnicas de pesquisa operacional, exigem que previamente se faça ou se crie o modelo matemático do sistema que se quer estudar.

Por outro lado, a Análise de Sistemas e a Engenharia de Sistemas dispensam, muitas vezes, a criação do modelo matemático, quando ele é impossível de ser definido, porque há muitos problemas dentro da Engenharia (particularmente na Engenharia de Minas) que são difíceis de se definir, matematicamente, mas, nem por isso, deixam de ser sistemas que se podem estudar quantitativamente.

Depois destas definições, vamos abordar o tema aplicação dos computadores ao estudo de Engenharia de Sistemas de Mineração. E para tornar a apresentação um pouco mais prática e conseqüentemente menos abstrata, vamos fazer uso, a partir de determinado ponto, de um exemplo concreto da aplicação de computação para resolução de um problema de mineração, com vistas à otimização desse estudo.

De uma maneira geral, os problemas de mineração são caracterizados por um elevado número de dados. Além disso, são problemas que apresentam, muitas vezes, cálculos complexos, envolvendo variáveis aleatórias, variáveis determinísticas, outras vezes requerem cálculo repetitivo, bastante extenso.

E, todas essas circunstâncias justificam que se faça uso dos computadores, para análise desses problemas. Mas, não só por esse motivo.

A aplicação dos computadores, hoje em dia, se justifica também pelo baixo custo, em especial os computadores modernos, que são, como sabem, muito rápidos e que podem fazer o cálculo a um custo inferior a outros processos quaisquer.

Na indústria de mineração justifica-se ainda mais a ampliação dos computadores porque, após uns 10 ou 15 anos de experiência a administração dessas empresas compreendeu (ou virá a compreender, cada vez mais) que se torna necessário utilizar métodos computacionais para que se consigam aplicar convenientemente os seus critérios de decisão. Só uma análise exaustiva dos dados, tanto quanto possível encarando todas as alternativas, permite a tomada de decisões bem fundamentadas e que tenham probabilidades de sucesso, ao serem aplicadas na prática. Hoje, um número crescente de empresas mineiras baseia suas estratégias de produção e seus tratamentos de informação, no emprego generalizado de métodos computacionais.

A tendência mais recente na evolução destes trabalhos indica que já não há tanta preocupação de aplicar novos métodos de pesquisa operacional aos problemas de mineração. Por quê? Porque esses métodos podem considerar-se já bem estabelecidos, bem definidos e são confiáveis. Não há mais que se fazer investigação sobre esses métodos. O que é fundamental e que está sendo, cada vez mais procurada, é a definição correta dos problemas e a forma de quantificar a incidência econômica que as várias

soluções possíveis acarretam. Quer dizer, a passagem da descrição qualitativa do problema para uma apreciação quantitativa desse mesmo problema, incluindo os objetivos que vão presidir a análise, é que está cada vez mais enfatizada. Porque, não há dúvida que todo mundo sabe, hoje, utilizar a teoria das filas de espera ou da programação linear. Isto, hoje em dia, faz parte dos enlatados dos computadores.

O que é difícil, em especial, nos problemas de mineração, dadas as suas características, é definir corretamente esses problemas, caracterizar as suas variáveis, os seus parâmetros, os objetivos da análise e os critérios de otimização para depois, introduzir esses dados todos nos métodos de computação. Hoje, talvez, a ênfase esteja mais virada para o problema da simulação dos problemas concretos, a fim de os tornar possíveis de serem tratados matematicamente.

Para isso, vamos ver, esquematicamente, em que consiste a metodologia de simulação em geral (Fig. 1).

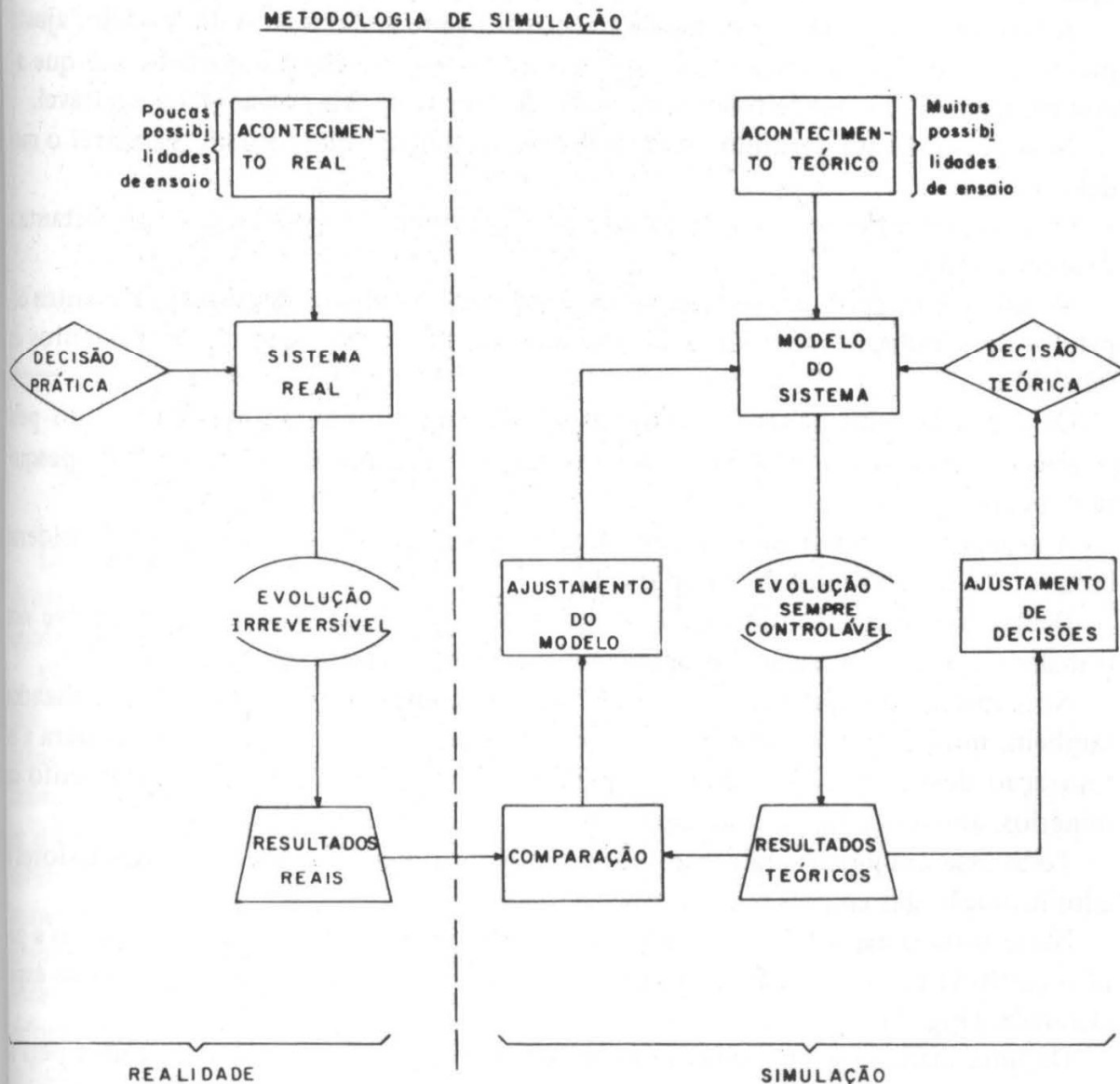


Fig. 1

## 4 Geologia e Metalurgia

A maneira clássica de resolver os problemas reais consistia em estabelecer decisões práticas desses mesmos problemas, os quais, atuando sobre o problema real em estudo, dariam origem a um resultado real, através de uma evolução irreversível. Só havia mesmo essa possibilidade de evolução do problema. Como é lógico, este tipo de decisão tinha muito poucas possibilidades de ensaio, isto é, as alternativas de viabilidade eram em número muito reduzido.

Através da simulação, teremos possibilidade de, paralelamente ao acontecimento real ou ao sistema real, definir o sistema teórico ou o acontecimento teórico, o qual representa muitas possibilidades de ensaio. Isso é feito através da criação de um modelo de sistema, que pode ser submetido a um conjunto de decisões teóricas, aplicadas a esse modelo.

Para cada grupo de parâmetros que se introduzem, o modelo é testado, através de uma evolução sempre controlável, visto que é teoricamente ou, através de computadores, que se fazem todos estes testes, conduzindo a um conjunto de resultados teóricos que, depois, são comparados com os resultados reais, através de uma fase de avaliação.

A fase de comparação, normalmente, justifica um ajustamento do modelo, ajustamento esse que é novamente testado e introduzindo novos parâmetros, até que a comparação entre o modelo teórico e os resultados reais seja considerada aceitável.

Nesse caso, ficará definido um conjunto de condições que tornam realizável o modelo, na prática.

Ora, os computadores, em todo esse processo, têm um papel muito importante a desempenhar.

Não que diz respeito aos problemas de mineração, podemos distinguir diferentes capítulos de simulação, quer em geologia, quer em mineração, quer em tratamentos de minérios.

Os aspectos mais salientes dessa aplicação dos computadores, começando pela geologia, situam-se nos problemas da prospecção, da avaliação das jazidas e da pesquisa mineral.

A avaliação, normalmente, inclui cálculo de reservas e, hoje, já se pode considerar uma rotina dos trabalhos de computação.

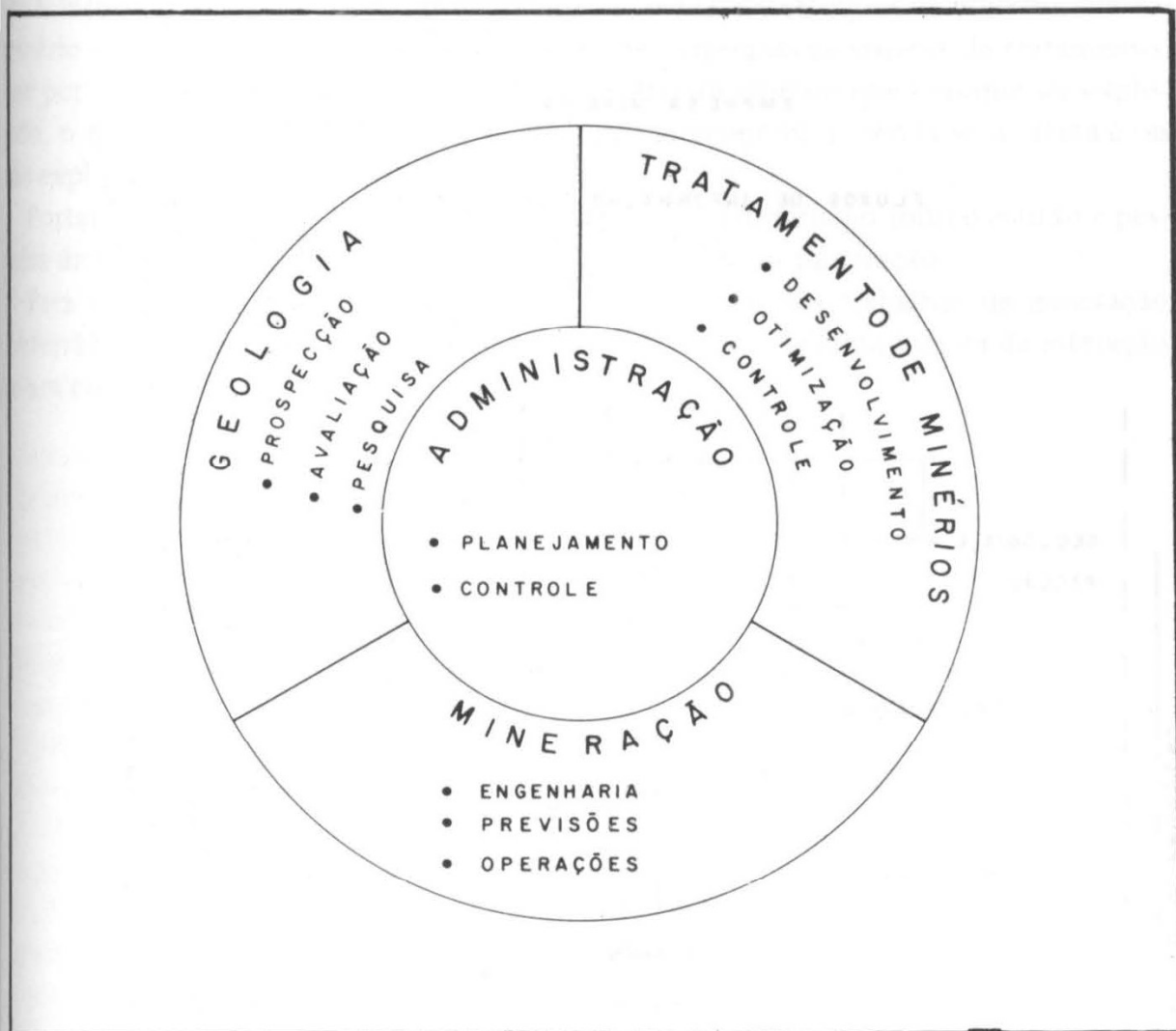
Dentro do setor de mineração, a aplicação dos computadores se desenvolve nos trabalhos e na programação das operações tecnológicas que a mineração envolve.

No capítulo do tratamento de minérios, os computadores, são muito utilizados também, quer para o desenvolvimento dos processos de concentração, quer para a otimização desses processos, quer até para o controle dos circuitos de tratamento de minérios, através de ligações do tipo "on-line".

Todo esse conjunto será centralizado também com aplicações dos computadores à administração das empresas desta especialidade.

Neste último aspecto, os computadores são muito úteis para o planejamento e para o controle de toda a administração e dos circuitos técnicos nas empresas de especialidade. (Fig. 2)

De uma maneira geral, todas as empresas de mineração são caracterizadas pela existência de uma série de departamentos que executam serviços bem definidos, e que poderemos representar esquematicamente da forma indicada na Fig. 3.

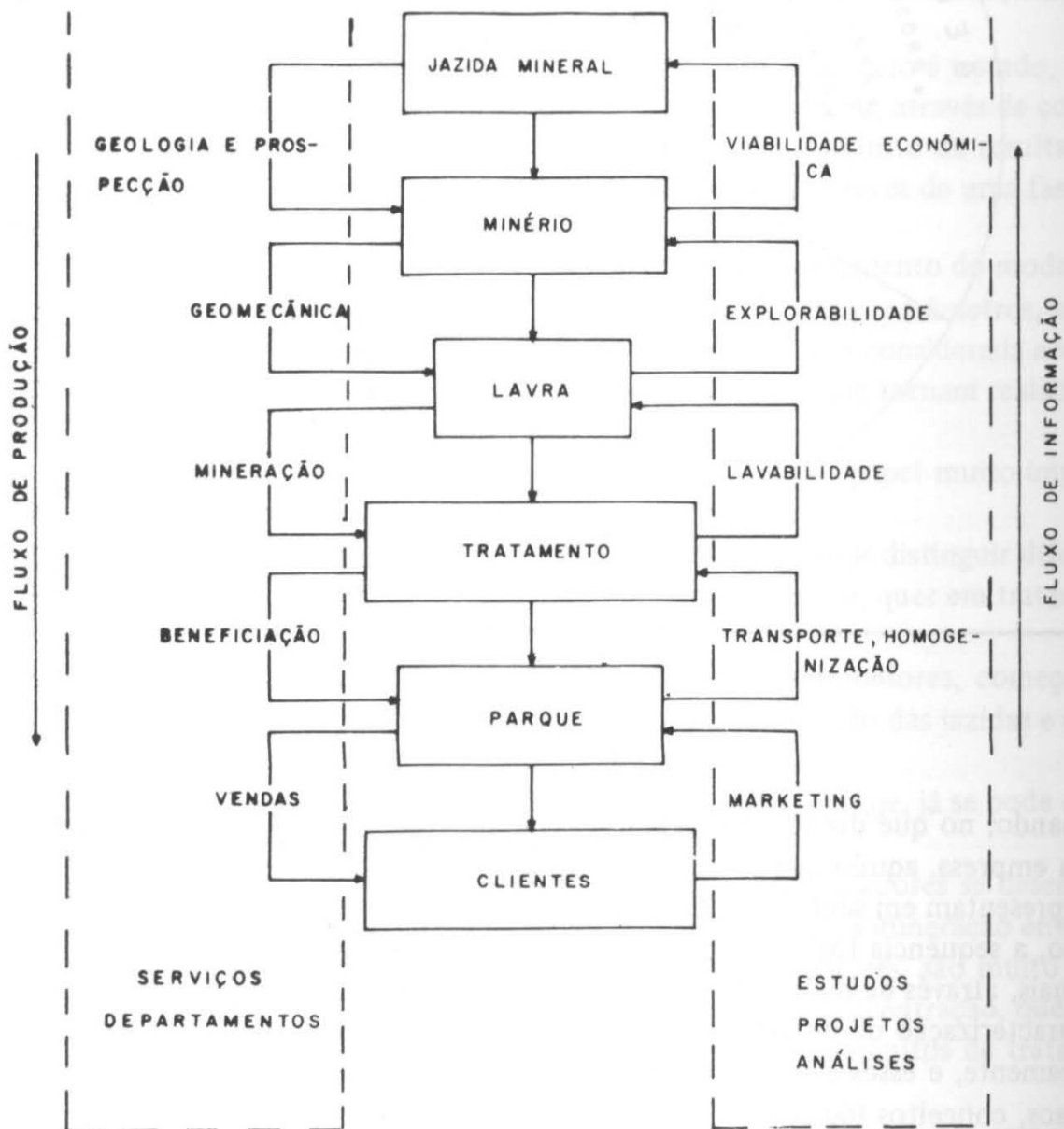


Detalhando, no que diz respeito à empresa de mineração, nós podemos distinguir, dentro da empresa, aquilo que se chama fluxo da produção e fluxo da informação, os quais se apresentam em sentidos opostos.

De fato, a sequência lógica dos trabalhos tem início na avaliação de jazidas mineiras, as quais, através de realização de trabalhos de Geologia e prospecção, podem dar lugar à caracterização de determinado volume de minério suscetível de ser explorado economicamente, e esses estudos, através de planos de lavra envolvem, na maior parte dos casos, conceitos lógicos de geomecânica. Na hipótese de as jazidas serem possíveis de explorar economicamente, através, portanto, do setor lavra, seguem-se as operações de tratamento de minérios, que por sua vez dão lugar à fase de estocagem ou empacamento geralmente sob a forma de pilhas, de onde o minério é trazido ao cliente através dos fluxos de vendas. Em sentido contrário, funciona todo o circuito de informação. Essa informação tem origem no mercado — são os consumidores que dão indicações sobre os preços de venda, sobre as quantidades economicamente transacionais, sobre os teores admissíveis no mercado, etc., e é baseado nessas informações que todo o circuito tem que ser estabelecido.

EMPRESA MINEIRA

FLUXOS DE INFORMAÇÃO E DE PRODUÇÃO





A informação dos clientes, normalmente, é levada aos estoques de minério, onde o minério concentrado é retomado, e daí fazem-se exigências ao sistema de tratamento, que por sua vez impõe restrições à lavra e ao tipo do minério que tem que ser explorado, o qual, através de um estudo de viabilidade econômica, revela se a jazida é ou não explorável.

Portanto, são esses dois fluxos que, no caso geral, determinam todo o estudo e pesquisa de Engenharia de Sistemas principais que existem na mineração.

Para concretizar, citamos um exemplo de aplicação aos trabalhos de mineração subterrânea, em que a simulação do sistema mineiro é conseguida à custa da interação de um conjunto de sub-sistemas associados.

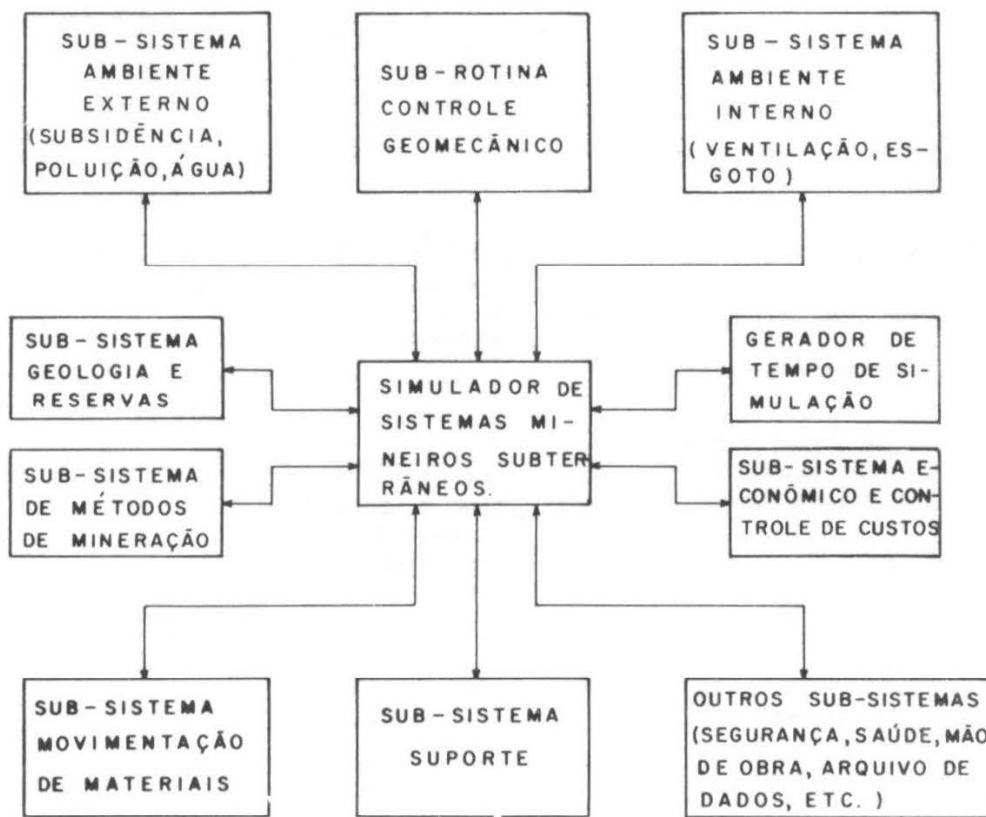


Fig 4

Este parece ser o sistema mais avançado que existe na simulação dos trabalhos de mineração. É um modelo que foi apresentado em 1974 pelo grupo da Universidade de Pensilvânia, o qual formulou uma linguagem de computação própria para esse sistema, em que se encontram interrelacionados todos os sub-sistemas que tem influência na mineração. Como é um sistema para minas de carvão subterrâneas, tem especial atenção aos problemas do ambiente interno – ventilação, esgoto; e tem também a preocupação com os problemas do ambiente externo – subsidência, poluição e água – e envolve também aquele conjunto de fases que já citamos: controle geomecânico dos trabalhos, o sub-sistema de Geologia e reservas; o sub-sistema de métodos de mineração; sub-sistema de movimentação de materiais; sub-sistema de suporte; sub-sistema econômico e controle de custos, e, finalmente, o conjunto de todos os outros sub-sistemas (segurança, saúde, mão-de-obra, arquivo de dados, etc.).

## 8 Geologia e Metalurgia

Todos esses sistemas funcionam através de um gerador de tempo de simulação que vai incrementando, sucessivamente, o tempo final no qual é feita a computação de todos esses sub-sistemas, os quais, como é lógico, inter-agem para diferentes incrementos de tempo.

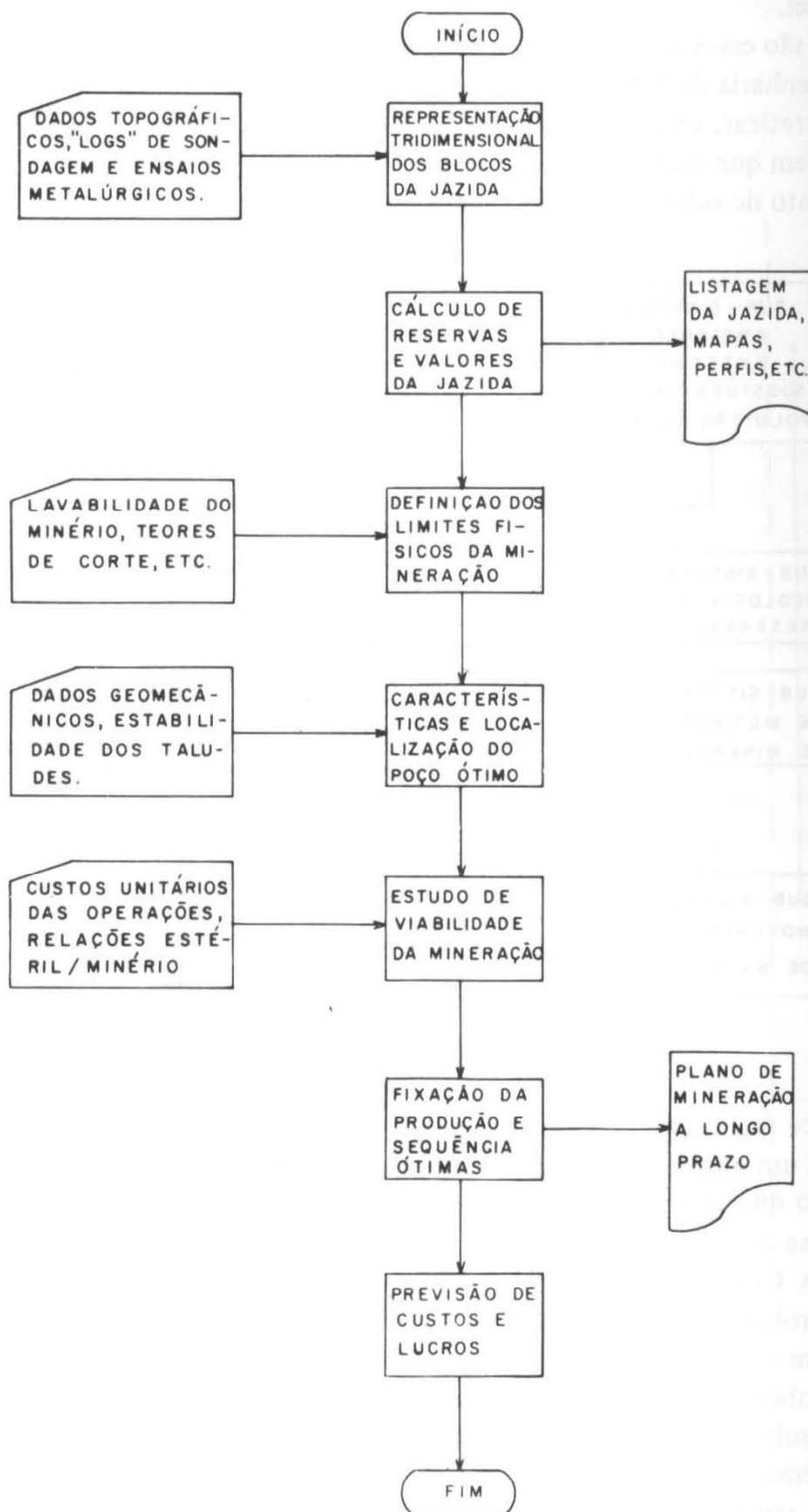


Fig. 5

Para o caso de mineração a céu aberto, a sequência não é muito diferente. Parte também, dos dados topográficos e geológicos que nos permitem fazer uma representação tridimensional da jazida; esta, por sua vez, possibilita o cálculo das reservas e a saída de dados numéricos descrevendo a jazida, com indicação dos seus teores, incluindo a apresentação de mapas desenhados automaticamente por computador, etc.

Na sequência, desde que sejam introduzidos dados sobre a lavabilidade do minério, teores de corte, e as características do processo de concentração, é possível definir os limites físicos da mineração. Daí, pode-se localizar a posição dos trabalhos de mineração que envolvem extração de minério dentro de um critério de otimização que, no caso geral, coincide com a minimização dos custos. Para isso é necessário introduzir-se, na fixação dessa localização, dados geomecânicos, indicações sobre a estabilidade dos taludes, mineração, etc.

Seguidamente é possível realizar estudos da viabilidade econômica da mineração, a partir da obtenção de informação sobre custos unitários, relação de mineração (ou relações estéril/minério) que permitem quantificar, em termos econômicos, aquela localização proposta para a exploração a céu aberto. Se é considerada viável essa exploração, então, segue-se a fase da fixação de produção e sequência ótima; e se não é considerada viável, a simulação termina e não há razão para continuar a computação.

Desde que fixadas a produção e a sequência ótimas, é possível estabelecerem-se planos de mineração a longo prazo, em que se dá uma idéia dos lucros previsíveis para a exploração, sob determinadas condições de mercado.

Esta previsão de custos e lucros encerra o trabalho de simulação, visto que, se não conseguirmos exprimir em termos econômicos a viabilidade de uma exploração, ninguém vai investir dinheiro para levar a mina a produzir. Então, é necessário fazer uma previsão de custos e lucros, depois de toda a programação, para poder atrair as pessoas ou os capitais. Nisso também o computador tem uma função extremamente útil.

Seguidamente, passaremos a fazer uma aplicação a um problema concreto de mineração a céu aberto, onde foi usada a simulação por computadores, para indicar as características mais importantes das operações envolvidas na lavra a céu aberto.

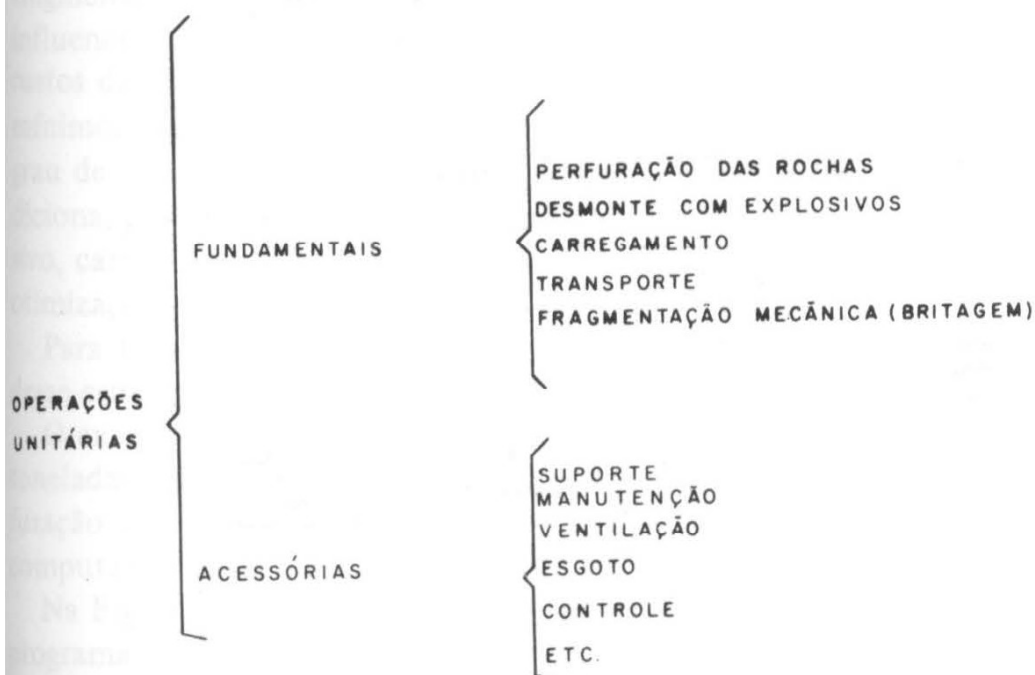


Fig. 6

Para isso, dividimos, como é clássico, as operações unitárias de mineração em dois grupos: as fundamentais e as acessórias, conforme está esquematizado na Fig. 6.

As operações fundamentais de mineração podem esquematizar-se em cinco, que são: perfuração da rocha, desmonte com explosivo, carregamento, transporte e a fragmentação mecânica ou britagem do minério.

As operações unitárias acessórias dependendo ou não se a lavra é a céu aberto ou subterrânea, envolvem os trabalhos de suporte, manutenção, ventilação, esgoto, controle e outras mais.

Ora, é com o objetivo de criar um conceito de otimização dessas operações que se utiliza a computação.

A sequência normal dessas operações, na exploração a céu aberto varia pouco. Há apenas que considerar duas alternativas principais: A. com perfuração, desmonte por explosivos, carregamento, transporte e, depois, britagem, na lavaria trituração, moagem e produto final (ver Fig. 7).

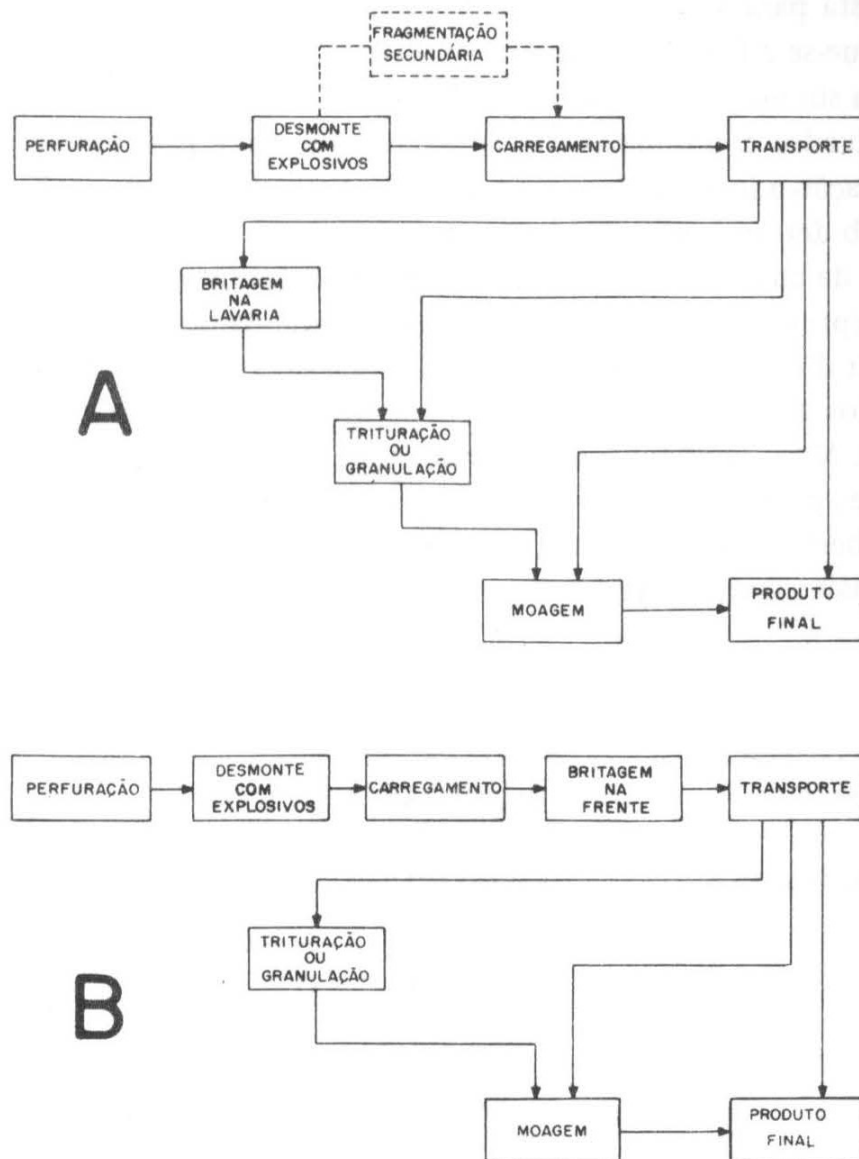


Fig. 7

Ultimamente, foram introduzidos, em muitos circuitos de produção de minas a céu aberto, os britadores, junto à frente de trabalho. Então, a sequência é ligeiramente diferente: B. perfuração, desmonte por explosivos, carregamento, britagem e depois o transporte. No transporte, o produto já tem uma dimensão menor e vai passar a granulagem e moagem, normalmente situadas nas lavarias.

Para otimizar toda essa sequência de operações teremos que procurar a combinação de operações que minimiza os custos de produção por tonelada, tal como se indica na Fig. 8.

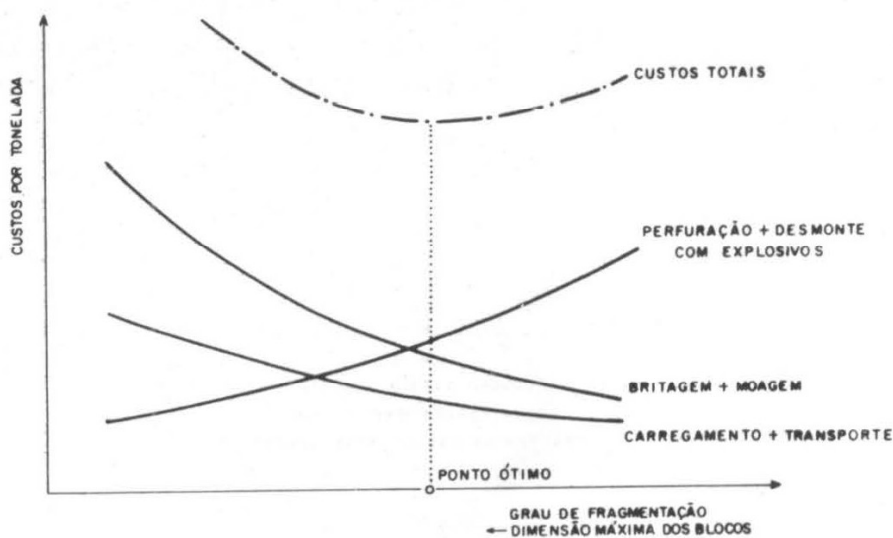


Fig. 8

Neste diagrama temos custos por tonelada em função do grau de fragmentação do minério, ou do tamanho máximo dos blocos resultantes do desmonte. Esse grau de fragmentação de minério resulta dos trabalhos de desmonte por explosivos, mas vai influenciar o custo das operações de carregamento mais transporte, assim como os custos da britagem e permite obter uma curva de custos totais, a qual apresenta um mínimo, que corresponde ao ponto de funcionamento ótimo de todo esse sistema. O grau de fragmentação ou dimensão máxima dos blocos terá um valor ótimo que condiciona, posteriormente, o projeto das operações de perfuração, desmonte com explosivo, carregamento, transporte e britagem, de forma a satisfazer ao critério global de otimização.

Para tornar o problema menos abstrato, apresentaremos em seguida a aplicação desse critério à resolução de um caso concreto.

O exemplo é o de uma mina de ferro a céu aberto, que produzia dois milhões de toneladas/ano e que estava planejando toda uma remodelação no seu sistema de perfuração e desmonte por explosivo. Então, foi solicitada uma aplicação de métodos computacionais para resolver esse problema.

Na Fig. 9 está indicado o tipo de simulação que foi feito, conhecido os *input* do programa.

A produção diária desejada neste caso, eram 6 mil toneladas/dia, tendo sido determinadas as propriedades da rocha: era uma hematita, separada por massas de itabirito. E, as características do equipamento de carregamento, transporte e britagem são também conhecidas.

Com esses dados, foi possível introduzir na simulação dois tipos de explosivos: um explosivo ANFO e outro explosivo SLURRY associados a uma combinação de diferentes fatores: turnos de trabalho (um turno por dia ou dois turnos por dia), vários diâmetros dos furos (3, 4, 5, 6, 7, 8 e até 9 polegadas) e diversos esquemas de fogo (cinco tipos diferentes, de forma a poderem adaptar-se à variação das condições geológicas das bancadas).

Este programa permite obter, como resultado, 140 alternativas, algumas das quais são eliminadas, imediatamente, pelo próprio programa. Os resultados indicam as especificações do "shovel" e das bancadas, as características dos esquemas básicos de fogo; informação sobre as cargas explosivas; o dimensionamento do desmonte e o cálculo de custos de produção.

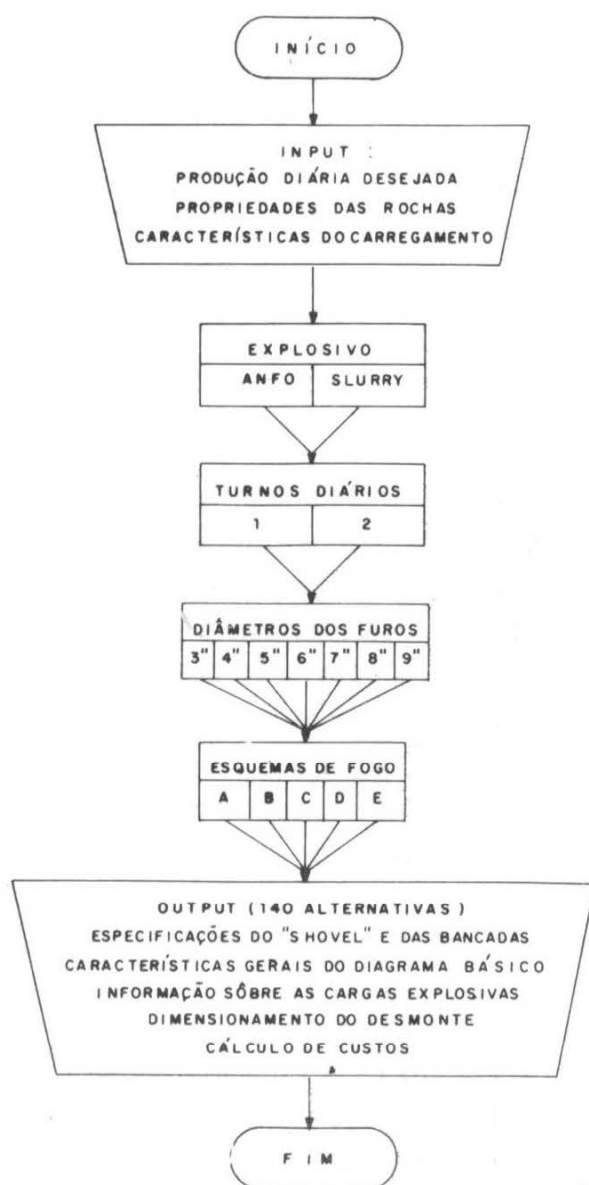


Fig. 9

Foi usando este programa que se estudou o problema a que já me referi, da mina de ferro a céu aberto, partindo de um certo número de constrangimentos operacionais (Fig. 10).

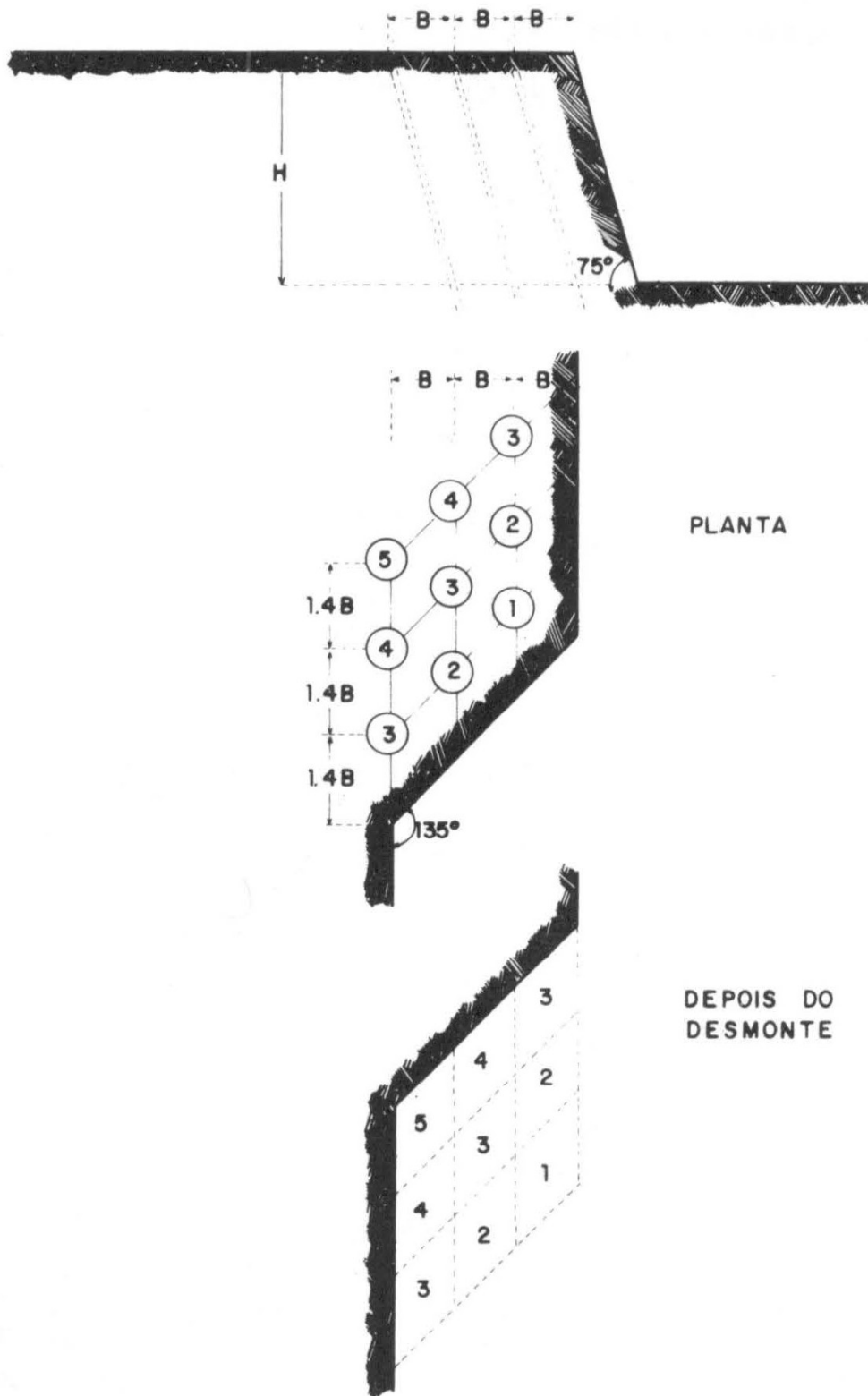


Fig. 10

A produção diária desejada neste caso, eram 6 mil toneladas/dia, tendo sido determinadas as propriedades da rocha: era uma hematita, separada por massas de itabirito. E, as características do equipamento de carregamento, transporte e britagem são também conhecidas.

Com esses dados, foi possível introduzir na simulação dois tipos de explosivos: um explosivo ANFO e outro explosivo SLURRY associados a uma combinação de diferentes fatores: turnos de trabalho (um turno por dia ou dois turnos por dia), vários diâmetros dos furos (3, 4, 5, 6, 7, 8 e até 9 polegadas) e diversos esquemas de fogo (cinco tipos diferentes, de forma a poderem adaptar-se à variação das condições geológicas das bancadas).

Este programa permite obter, como resultado, 140 alternativas, algumas das quais são eliminadas, imediatamente, pelo próprio programa. Os resultados indicam as especificações do "shovel" e das bancadas, as características dos esquemas básicos de fogo; informação sobre as cargas explosivas; o dimensionamento do desmonte e o cálculo de custos de produção.

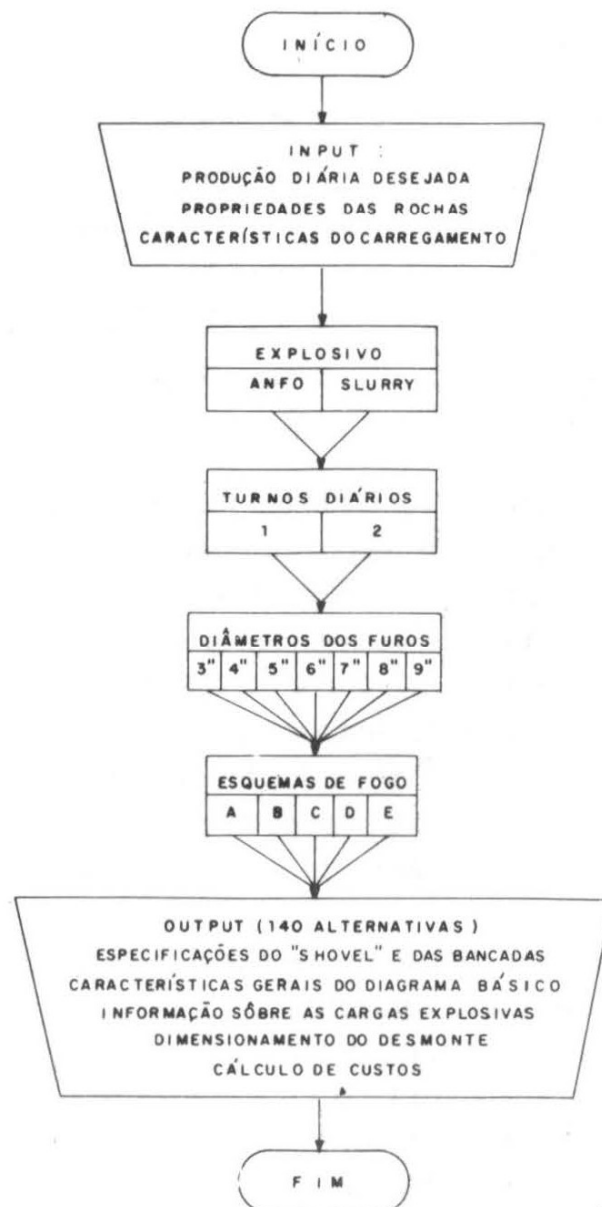


Fig. 9



Esta Figura indica o tipo de esquema de fogo mais usado nesta mineração que é com bancadas inclinadas a  $75^{\circ}$ , por questão de estabilidade, e a ordem do disparo das cargas explosivas está indicada nos números 1, 2, 3, nesses furos. Portanto, após o desmonte pode-se prever que as zonas desmontadas estão indicadas pelos números, aumentando sucessivamente até atingir a dimensão pretendida para o desmonte.

Este foi o esquema básico utilizado para a simulação, embora se usasse, também, mais quatro esquemas diferentes.

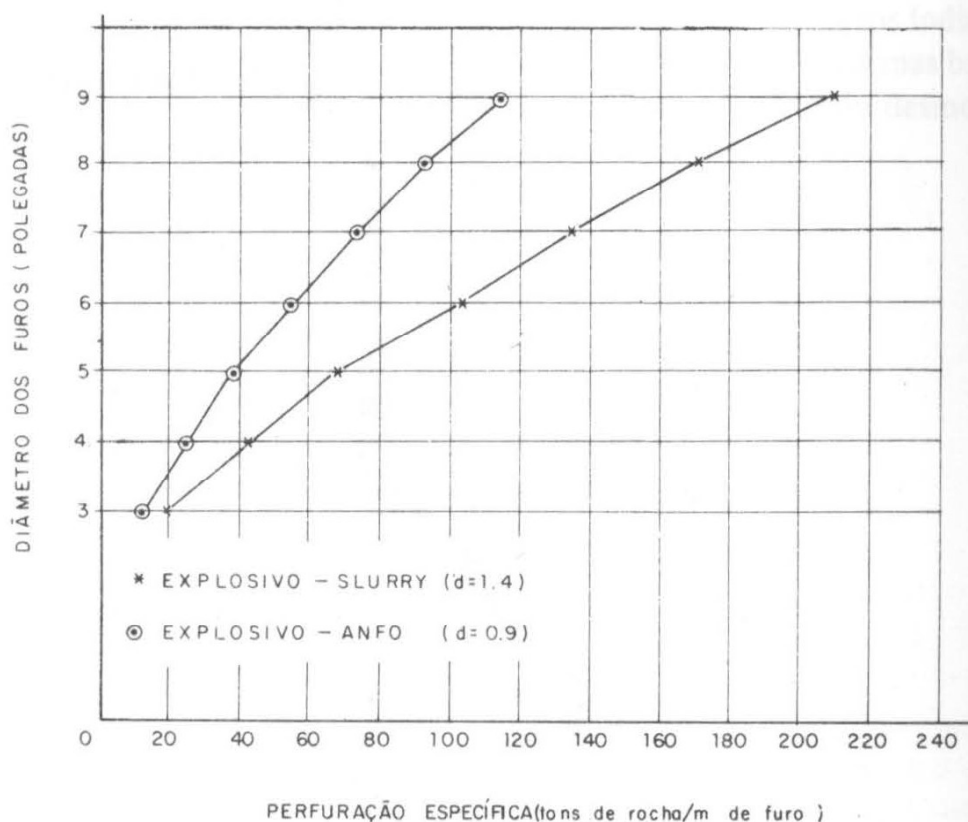


Fig. 11

Foi possível determinar, nesse esquema básico e para um turno de trabalho por dia, quais eram as perfurações específicas. Entendemos por perfurações específicas o número de toneladas de rocha desmontada por metro de furo. E esta representação é feita em função do diâmetro de furos, variando de 3 a 9 polegadas, onde é fácil verificar que o explosivo ANFO ( $d = 0.9$ ) proporciona menores rendimentos que o explosivo SLURRY ( $d = 1.4$ ) especialmente à medida que os diâmetros vão aumentando.

Além dessa conclusão, tirada dos resultados do computador obtém-se também a figura seguinte.

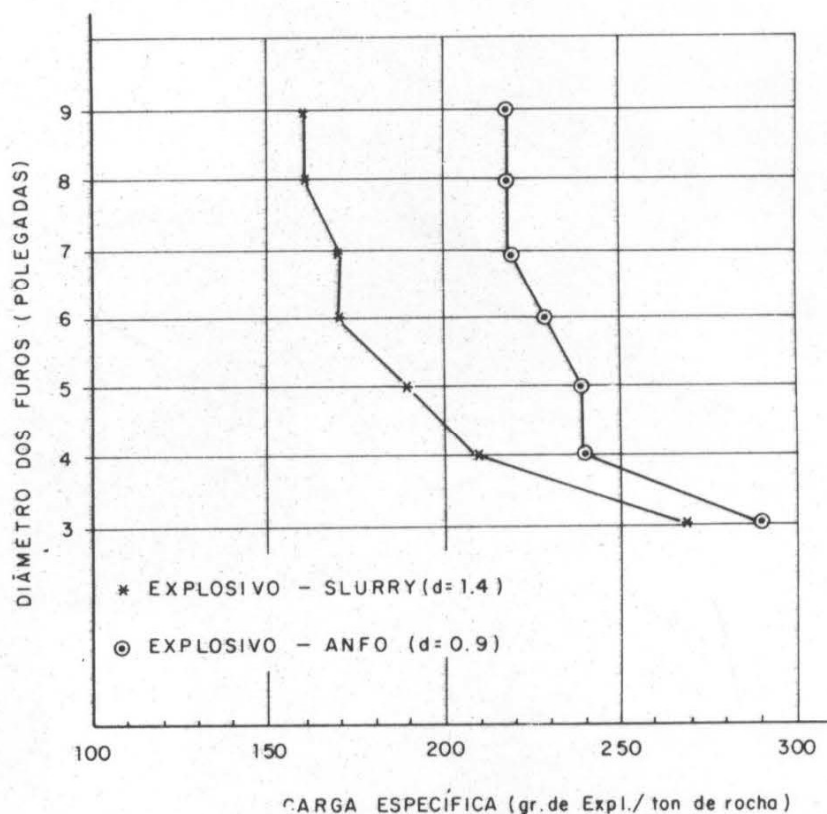


Fig. 12

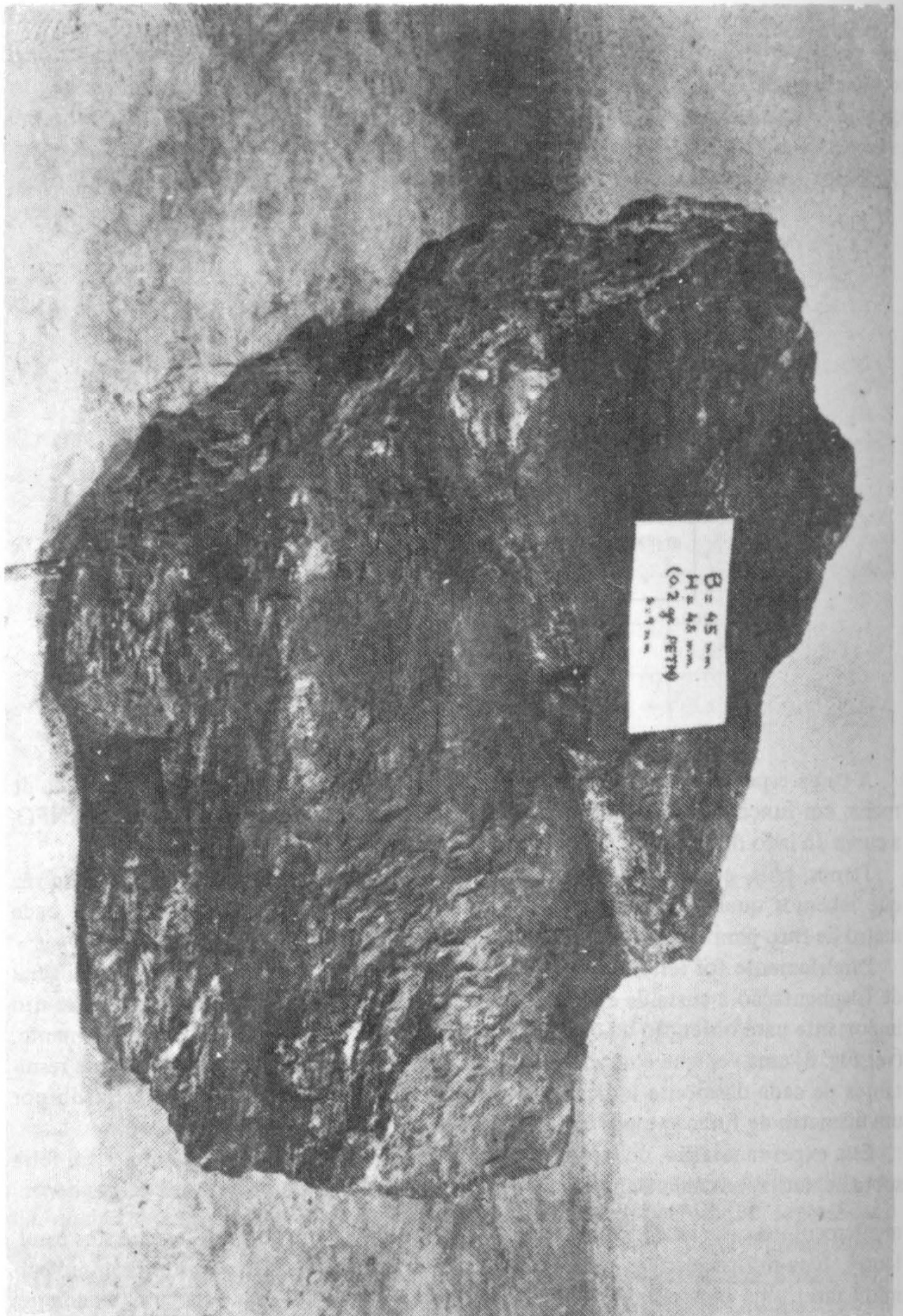
A carga específica do explosivo expressa em gramas, de explosivo, por tonelada de rocha, em função dos mesmos diâmetros dá origem a duas curvas, uma para o ANFO, a curva do lado direito, outra para o SLURRY, a curva do lado esquerdo.

Temos, pois, possibilidade de calcular os custos destes mesmos trabalhos uma vez que sabemos qual é o preço do quilo de cada explosivo e também o custo de cada metro de furo para diferentes diâmetros de furação.

Paralelamente foi feita uma experimentação que nos permitiu testar uma lei geral de fragmentação à custa de ensaios na mina e ensaios em laboratório. Essa lei é muito importante para obtenção da curva da otimização que já apresentamos anteriormente, (ver Fig. 8) uma vez que é necessário estabelecer a dimensão máxima dos blocos resultantes de cada desmonte indicado nesse gráfico (cada desmonte é caracterizado por um diâmetro de furação e por um tipo de explosivo).

Essa experimentação, de que se apresenta na Figura seguinte um exemplo, foi feita sobre hematita, na mina e em laboratório, para vários afastamentos das cargas convenientemente escalonadas, foi determinada a dimensão máxima dos fragmentos resultantes. Essa informação, ajustada com a informação resultante da própria mina, permitiu fazer uma previsão da dimensão máxima dos blocos, para este caso, é dada por:

$$12500 \frac{B}{W^{2,05}}$$



D = 45 mm  
H = 45 mm  
(0.2 gr. FeTiO<sub>3</sub>)  
2.19 mm

onde B é o afastamento das cargas e W é a energia libertada na explosão, expressa em quilo-calorias por tonelada de rocha. Como nós sabemos a energia libertada pelo ANFO, em cada situação do desmonte na mina, pode-se prever através desta relação aproximada, qual é a dimensão máxima dos blocos resultantes de cada esquema de fogo, verificando-se acordo satisfatório com os valores obtidos na lavra.

Então foi possível traçar o diagrama da figura seguinte:

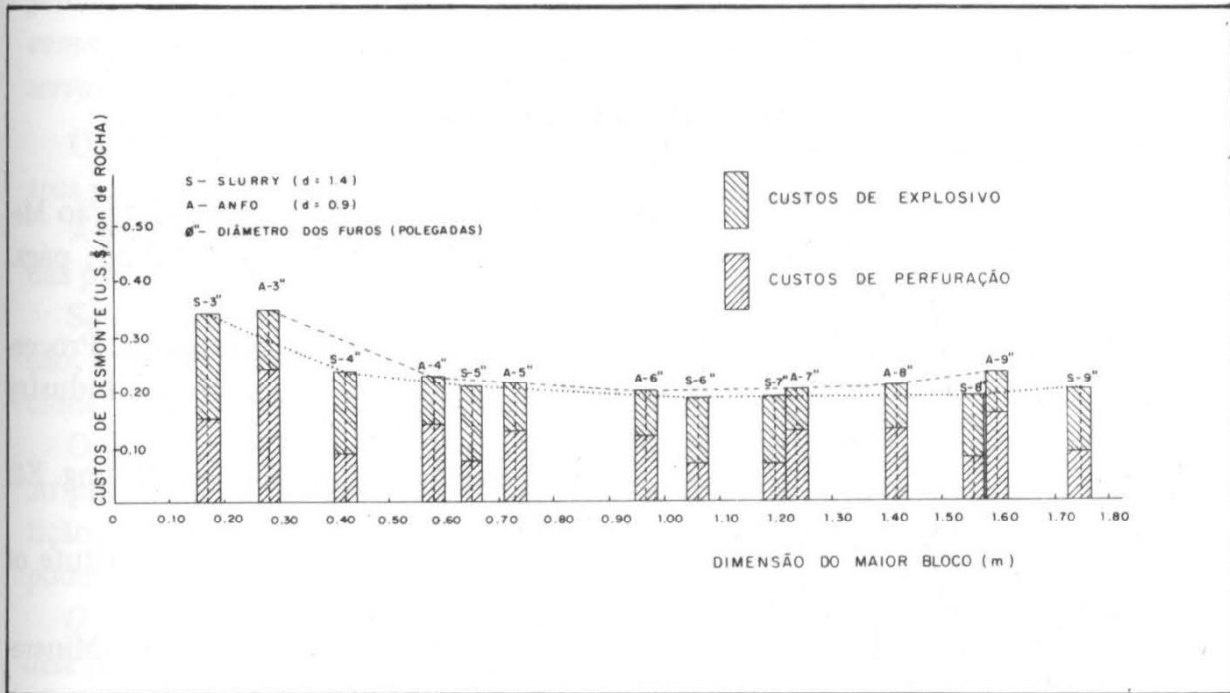


Fig. 14

Em ordenadas temos os custos do desmonte em dólares por tonelada de rocha, em abcissas a dimensão do maior bloco, em metros, variando entre 0,10 a 1,80.

Portanto, a partir dos dois diagramas anteriores — um da perfuração e outro do consumo de explosivo — foi possível alcançar o custo unitário de cada uma das operações, visto que na parte inferior da coluna, estão os custos da perfuração; e na parte superior, temos os custos do explosivo, nas variedades SLURRY e ANFO.

É possível, à custa da observação dessa curva, detectar qual é o custo mínimo para esse problema concreto: era a utilização de explosivo SLURRY carregado em furos de seis polegadas.

O que é curioso verificar é que a curva do explosivo SLURRY está sempre situada por baixo da curva do explosivo ANFO, muito embora os custos, em cada quilo de SLURRY sejam o dobro dos custos em cada quilo de ANFO (valores utilizados US\$ 0,70 e US\$ 0,35, respectivamente).

Sendo assim, neste caso concreto, foi aconselhado que a mineração passasse a ser realizada com furos de seis polegadas de diâmetro e utilizando-se explosivo SLURRY.

Este é, pois, um exemplo em que utilizamos a metodologia da engenharia de sistemas, para tratar este problema concreto.

Fizemos, como é evidente, uso de computadores, quer na fase inicial de planejamento da mineração, quer na fase seguinte de análise dos resultados.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DINIZ DA GAMA, C. (1974) – Modelo Computacional de uma Exploração Mineira. IV Simpósio de Mineração. Revista Geologia e Metalurgia, nº 35, págs. 389/324. São Paulo.
- MANULA, C.B. and RIVELL, R. (1974) – A Master Design Simulator. Proceedings 12 th Symposium on the Application of Computers in the Mineral Industry Colorado School of Mines. Golden, Colo.
- FALKIE, T.V. (1968) – Production Systems Engineering. In Surface Mining. Ed. E.P. Pfeider. AIME. New York (págs. 184/208)
- KAAS, L.M. (1968) – Computers in Mining Industry. The Canadian Institute of Mining and Metallurgy. Special volume 9. Montreal.
- DINIZ GAMA, G. (1975) – Aplicações dos Computadores à Geologia e à Mineração. Publicação interna D.M.G.A. – IPT – São Paulo (117 págs.).
- WEISS, A. (1969) – A Decade of Digital Computing in the Mineral Industry. Ed. AIME. New York.
- DINIZ GAMA, C. (1975) – Optimização do Arranque de Rochas com Explosivos. Tese de Doutoramento. Universidade de Luanda, Angola (220 págs.).
- ASH, R.L. (1968) – The Design of Blasting Rounds. In Surface Mining. Ed. E.P. Pfeider. AIME. New York (págs. 373/397).
- SME Mining Engineering Handbook – Volume 2 – Section 30. Systems Engineering. Ed. AIME. New York (1973).

DEBATES

*O SR. COORDENADOR: Dando prosseguimento a nosso trabalho declaro aberto os debates. A título de complementação, gostaria de considerar que o uso rotineiro de técnicas computacionais no Brasil, poderá tornar-se realidade em tempo relativamente curto, como percebe-se pelo interesse despertado pelo tema. Neste panorama as Universidades, devido à sua estrutura terão um papel importante, no desenvolvimento e divulgação de "know-how", trabalhando em sintonia com problemas concretos da indústria mineral brasileira. Sentindo este problema, no Departamento de Engenharia de Minas, temos realizado trabalhos neste campo, especificamente desenvolvemos sistemas de planejamento de lavra por simulação e sistemas de avaliação de reservas usando métodos geo-estatísticos.*

*O Dr. Carlos Diniz da Gama: Não há dúvida que, pelo menos a experiência de outros países tem mostrado que os primeiros passos são dados nas universidades.*

A aplicação de computadores é um problema, digamos, de educação, de formação das pessoas.

Se o indivíduo, enquanto está na escola, é posto perante a realidade da computação, é muito mais fácil a este indivíduo, uma vez trabalhando na empresa, por a funcionar os sistemas de computação.

O que se verifica cada vez mais, é que a administração das empresas está receptiva ao problema da computação. Compreendeu que, no mundo atual, com tanta competição e com tanta necessidade de otimizar as operações, necessitam de ferramentas poderosas de cálculo que só os computadores podem oferecer.

*O sr. Weber Alves Coelho: Esses furos de seis polegadas, SLURRY, a profundidade dele não influi também? Porque, o SLURRY é bem mais caro que o ANFO.*

*O dr. Carlos Diniz da Gama: A altura do furo era diferente no ANFO e no SLURRY, porque dentro do programa de computação está relacionado o afastamento das cargas, com a sua profundidade.*

Concretamente: existe uma relação de proporcionalidade direta entre o afastamento das cargas e a altura das cargas, que está relacionada também com o diâmetro do furo.

O diâmetro dos furos, o afastamento e a altura, são três grandezas interrelacionadas, em qualquer sistema de fogo, e o programa de computação introduz precisamente essas relações, as quais variam com o tipo de explosivo.

*O dr. Antonio Stellin Júnior – EPUSP: Eu gostaria que o professor Diniz nos falasse um pouco mais detalhadamente sobre aquelas experiências feitas em laboratório. Eu não entendi bem se aquela fórmula foi feita para aquelas experiências ou para a parte prática das observações feitas, de desmonte.*

**O Dr. Carlos Diniz da Gama:** Esta fórmula concreta resulta de ambas as informações: do laboratório e da mina. Mas, foi baseada numa lei geral de fragmentação, que é a seguinte: a porcentagem em peso das partículas que passam (portanto, aquilo que nos permite fazer uma curva granulométrica dos produtos resultantes do desmonte por explosivo) pode ser expressa na seguinte relação:

$$P_s = aW^b \left(\frac{S}{B}\right)^c$$

W representa a energia libertada na explosão por unidade de peso da rocha.

S representa a dimensão das partículas.

B representa o afastamento das cargas.

O *a*, o *b* e o *c* são constantes para cada caso concreto, para cada combinação, tipo de rocha e o tipo de explosivo.

Ora, para obter a dimensão máxima, o  $P_s$  máximo, a porcentagem de produtos que passam por uma malha de abertura  $S_{\max}$  é  $P_s = 1$ .

Então, tirando aqui o valor de *S*, temos:

$$P_s = \frac{B}{a^{1/c} W^{b/c}}$$

Para determinar esta constante que, no nosso caso é de  $1/12.500$  e  $b/c = 2.05$ , nós realizamos um conjunto de experiências em laboratório e na mina. O que é fácil verificar é que esses quocientes são adimensionais. Na escala dos centímetros e na escala dos metros representam iguais valores. Na escala dos centímetros, dentro do laboratório. Na escala dos metros, dentro da mina.

Tanto a energia libertada na explosão por unidade de peso da rocha, como o quociente *S/B* apresentam a mesma ordem de grandeza, e portanto, não tivemos mais que determinar as constantes. Nós não temos a pretensão de que seja esta uma lei rigorosa; é uma lei empírica mas que permite obter resultados que, até certo ponto, são confirmados na prática, onde é observado que o tamanho do maior fragmento diminui com o afastamento das cargas — coisa que todos nós conhecemos — e para o mesmo afastamento este tamanho diminui conforme o explosivo se torna mais potente.

*O Dr. Antonio Stellan Júnior — EPUSP: Gostaria de fazer mais duas perguntas: essa lei geral é derivada da lei de Bond? Pelo que percebi da sua exposição, na mina foram utilizados dois tipos de explosivos: ANFO e SLURRY, e no laboratório foi o P.E.T.N. Qual a influência que os vários tipos de explosivo têm nos resultados?*

*O Dr. Carlos Diniz da Gama:* A lei da cominuição de Bond aplicada aos desmontes com explosivos parte da energia consumida e de um parâmetro característico da rocha (chamado “work index”) determinando  $P_s$  chamada dimensão a 80%. Esta relação deve igualar-se com a nossa em determinado ponto, e nós verificamos que a aproximadamente elas coincidem para  $P_s = 0.8$ . Então temos também *W*, energia por unidade de peso, e o fator característico do material está contido nas nossas constantes.

Para verificar esta expressão nós usamos um trabalho de Bond, sobre desmonte em mina subterrânea onde se fez experiências para estabelecer qual é a lei de fragmentação da rocha. Nós introduzimos essa relação e chegamos a valores próximos daquele que Bond previu.

*Segunda resposta:* É evidente que, para diferentes tipos de explosivo resultou diferentes graus de fragmentação visto que as energias libertadas variam. O que nós introduzimos no laboratório foi o P.E.T.N., cuja energia de detonação é da ordem de 1400 calorias por quilo, ao passo que o ANFO possui menos de mil calorias por quilo. Então, a nossa correlação entre os ensaios de laboratórios e os da mina foi, precisamente, utilizar a mesma rocha com diferentes tipos de explosivos, obtendo fragmentos e usando afastamentos de diferentes grandezas e tamanhos. E infelizmente só usamos um

ANFO para a mina e um P.E.T.N. no laboratório; não usamos SLURRY, nas experiências em escala natural.

Aliás, qualquer mineração, de maneira geral, tem esta lei presente, senão sob a forma explícita, pelo menos no sub-consciente.

*O Sr. José Jaime Sznelwar: O senhor por gentileza, poderia nos dar maiores esclarecimentos sobre essas experiências de laboratório?*

*O Dr. Carlos Diniz da Gama:* Existe uma teoria que é a teoria da similitude que permite o escalonamento de dimensões entre a experiência de laboratório e o ensaio à escala natural. Então, todas as grandezas e todas as variáveis que influenciam o fenômeno, têm que ser devidamente escalonadas entre o laboratório e a mina. Há grandezas lineares, há grandezas cinemáticas e há grandezas dinâmicas.

A teoria da semelhança diz que o fenômeno é simulado em laboratório se nós mantivermos constante um grupo de parâmetros adimensionais (chamados parâmetros  $\pi$ ) que é obtido, cada um deles, a partir de combinação das variáveis que influenciam o fenômeno. Então no nosso caso concreto, para simular o fenômeno da fragmentação de rochas por explosivos partimos das equações hidrodinâmicas que regulam a propagação de ondas através de materiais sólidos, e extraímos dessas expressões as variáveis fundamentais: distância, velocidade e aceleração, módulo de elasticidade, energia libertada, etc. e procuramos, diante do fator escala adequada, simular qual é o tamanho  $S$  obtido na mina através da dimensão dos fragmentos obtidos no laboratório. Para isso ser possível, é necessário escalonar um conjunto bastante complexo de variáveis, que vão desde a velocidade de detonação de explosivo, da velocidade da propagação, módulos de elasticidade, etc.

Nós publicamos no Congresso de Belgrado um trabalho onde fazemos esse estudo da teoria da semelhança aplicada nos ensaios de laboratório de desmonte com explosivos.

Foi baseado nessa análise que tornou-se possível a nós, em laboratório, fazermos a experiência de semelhança do que se passava na mina, utilizando bancadas, e previndo os tamanhos dos maiores blocos resultantes de cada situação de desmonte com explosivos.

*O Sr. Coordenador: Em nome do Centro Moraes Rego, apresento ao prof. Dr. Carlos Diniz da Gama, os nossos agradecimentos como aos participantes desta palestra, e declaro encerrada esta reunião.*