

# CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E MINERALÓGICA VOLTADA AO APROVEITAMENTO DE JAZIMENTOS FOSFÁTICOS

DIVISÃO DE BIBLIOTECAS DA  
EPUSP  
BIBLIOTECA DE ENG. DE MINAS  
E DE PETRÓLEO  
1990  
PRODUÇÃO DOCENTE

Helmut Born <sup>(1)</sup>  
Henrique Kahn <sup>(2)</sup>

## 1 - RESUMO

Os depósitos fosfáticos brasileiros apresentam particularidades que os distinguem dos grandes jazimentos mundiais de origem sedimentar. Nossos principais depósitos, de origem ígnea e em geral associados a processos de alteração intemperica, além do baixo teor, apresentam complexidade acentuada. Nesse contexto destaca-se a importância da caracterização geológica e mineralógica, desde a fase de pesquisa até o acompanhamento das operações de lavra. O reconhecimento da tipologia dos minérios é essencial para orientar a coleta de amostras-tipo representativas, destinadas a estudos mineralógicos objetivos, estabelecimento de metodologias quantitativas para uso rotineiro, previsão de distribuição dos constituintes minerais e de parâmetros tecnológicos efetivamente correlacionáveis às operações em escala industrial.

## 2 - INTRODUÇÃO

Desde a década de 60 o Brasil passou da condição de fortemente dependente a auto suficiente na produção de matérias primas fosfáticas para a indústria de fertilizantes. Isto se deveu ao desenvolvimento de uma tecnologia própria de produção de concentrados apatíticos a partir de minérios de baixo teor, principalmente de origem magnética ou derivados do seu intemperismo.

<sup>(1)</sup> Geólogo, formado em 1961 pelo Curso de Geologia da Universidade de São Paulo, Mestre em Geologia em 1970 e Doutor em Ciências em 1971, pelo Instituto de Geociências - USP, Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica - USP

<sup>(2)</sup> Geólogo, formado em 1977 pelo Instituto de Geociências - USP, Mestre em Geologia em 1988 pelo Instituto de Geociências USP, Professor do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica - USP. Responsável pelo LCT - Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas - EPUSP

Hoje estão sendo aproveitados os minérios de cinco jazimentos diferentes, dos quais um em rocha fresca e quatro em mantos de intemperismo derivados de rochas alcalinas, além de cinco outros já pesquisados ou em fase de avaliação (Ipanema, Antápolis, Maecurú, Angico dos Dias, Salitre). Além deles são ainda conhecidos depósitos de fosfato de outras origens em Patos de Minas, Lagamar, Irecê, Olinda ou Igarassú, Paulista, Itataia, etc.

Cada um desses depósitos apresenta peculiaridades próprias, seja quanto aos minerais fosfáticos presentes, dos quais a apatita é o único aproveitado atualmente, tipo de associação mineralógica e granulometria, dentre outras. Além disso, mesmo nos depósitos em lavra, devem ser constantemente avaliadas situações específicas decorrentes de exposições de novos tipos de minérios, cuja eventual extração pode ter reflexos sensíveis na composição de pilhas de minério e no desempenho das usinas de concentração.

A possibilidade de prever os efeitos da variação nas características da alimentação sobre o desempenho tecnológico de usinas de beneficiamento, consumo de reagentes e outras variáveis, está vinculada a alguns fatores, dentre os quais se destacam:

- a) um sólido conhecimento da variabilidade das características da jazida, associado a plantas geológicas previsionais, relativas à distribuição dos diversos tipos de minério, por área do depósito e por bancada;
- b) resultados de estudos de bancada e de usina piloto com os vários tipos de minério e/ou amostras compostas;
- c) experiência anterior com várias blendagens dos diversos tipos de minérios, na própria usina de concentração.

Este trabalho visa analisar a importância dos dois primeiros tópicos, salientando os principais aspectos geológicos e mineralógicos utilizados para definir uma tipologia tecnologicamente significativa dos minérios em depósitos de fosfato, bem como os critérios de coleta de amostras representativas dos diversos materiais, para fins de caracterização mineralógica e tecnológica.

### 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS DEPÓSITOS BRASILEIROS DE FOSFATO

Quanto à sua origem, as rochas portadoras de mineralização apatítica primária podem ser subdivididas nos seguintes grupos, classificados por ordem de importância, de acordo com sua ocorrência no Brasil:

- a) Rochas ígneas de filiação alcalino-carbonatítica, ex: Jacupiranga, Ara-

Serviço de Bibliotecas  
Biblioteca de Engenharia de Minas

- xá, Tapira, Catalão, Antápolis, Ipanema, Serrote (Juquiá ou Registro), Salitre, Maecurú, Angico dos Dias (Caracol);
- b) Rochas sedimentares, associadas a seqüências carbonáticas, com ou sem metamorfismo superimposto, (jazimento mais importante em termos mundiais), ex: Patos de Minas ou Rocinha e Lagamar (MG), Igarassú e Paulista (PE), Irecê (BA);
- c) Rochas de origem discutível, possivelmente granítica (Itataia, CE) e outras (Fosfatos aluminosos - PA e MA), inclusive guano.

Em praticamente todos os depósitos hoje em exploração no Brasil, os minérios correspondem ao produto de intemperismo dessas rochas primárias, nos quais ocorreram modificações mineralógicas significativas (exceção Jacupiranga).

Nos três casos, os processos de alteração relacionados ao intemperismo químico propiciaram um enriquecimento significativo do fósforo, seja pela formação de um depósito residual, seja pela neoformação e reprecipitação de fosfatos.

Considerando apenas os materiais suscetíveis aos atuais processos de concentração, constata-se que a produção de concentrados apatíticos no Brasil provém quase que exclusivamente de mineralizações associadas ao primeiro grupo. Nos complexos alcalinos, a classificação petrográfica das rochas primárias portadoras de apatita varia desde termos ultramáficos (peridotitos e piroxenitos), muitas vezes modificados por processos posteriores em rochas essencialmente micáceas (com flogopita e biotita), agrupadas como glimmeritos, além de jiolitos e sienitos mais restritos, até carbonatitos calcícos (sôvitos) ou dolomíticos (beforsitos), podendo existir variedades ankeríticas. Em vários locais (Ipanema, por exemplo), rochas de origem metassomática (tenitos) também apresentam mineralização apatítica significativa. Frequentemente, a designação petrográfica utilizada para as rochas não significa que elas apresentem uma constituição uniforme, mas simplesmente que elas perfazem mais de 50% das variedades presentes em um dado intervalo, por exemplo de testemunhos de sondagem. Do mesmo modo, uma designação deduzida da análise química dos testemunhos de sondagens, em um certo intervalo, pode mascarar a coexistência de 2 ou mais tipos de litológicos distintos, intimamente mesclados.

### 4 - CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E GEOLÓGICAS DOS DEPÓSITOS DE FOSFATO

São conhecidos cerca de 200 minerais com conteúdo acima de 1,0%  $P_2O_5$ . O grupo das apatitas é o de maior ocorrência e uso, tendo a fórmula simplificada  $Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl,CO_3)$ . Várias substituições atômicas são comuns; desta-

can-se as de urânio, terras raras, estroncio e sódio no lugar do cálcio, e as de silício, vanádio, alumínio e enxofre nas posições do fósforo.

Os principais minerais de importância econômica são fluorapatita, carbonato-apatita ("dahilita"), carbonato-fluorapatita (francólita) e hidroxapatita. Fluorapatita é mais comumente encontrada nas rochas ígneas e francólita nos depósitos primários de fosfato sedimentar (fosforitos). Cita-se ainda a "colofana", variedade textural de apatita criptocristalina, constituída usualmente por carbonato-fluorapatita.

Quanto à mineralogia dos depósitos fosfáticos brasileiros, constata-se que a fluorapatita é largamente predominante, sendo o mineral primário das rochas ígneas. Poucos dados são conhecidos atualmente sobre o possível caráter primário de outros fosfatos, admitindo-se que eles são produtos exclusivos dos processos de intemperismo, p. ex. fosfatos com terras raras, Sr, Ba e Al (goyazita, gorceixita e cranadilita, respectivamente).

Além da fluorapatita, estudos mais detalhados mostram que a carbonato-fluorapatita e a carbonato-apatita também se fazem presentes em escala significativa. No depósito sedimentar de Patos de Minas, constatou-se que o fosfato predominante corresponde a fluor-carbonato-apatita ou uma mistura de fluorapatita e carbonato-apatita (Marciano Neto et al., 1990). No depósito de manto de intemperismo de Araxá, a carbonatoapatita é encontrada subordina-damente na interface rocha sã/manto intemperizado, mas constitui componente importante em material apatítico reprecipitado, onde representa o cimento que une grãos de apatita eluvionar ou ocorre como crostas tardias revestindo as paredes de espaços vazios (Braga e Born, 1988); situação similar é observada em Angico dos Dias (Kahn et al., 1990) e em menor escala em Anitápolis (Kahn, 1988).

Desde o início dos trabalhos de pesquisa mais detalhada é possível reconhecer que os depósitos de fosfato apresentam uma variabilidade constitucio-nal acentuada, principalmente aqueles de origem magmática. Essa variabilidade de normalmente está relacionada a fatores de ordem mineralógica, granulométrica ou textural, que por sua vez podem resultar em comportamentos tecnológicos diferenciados.

Algumas características são comuns a vários depósitos, senão a todos, podendo-se no entanto afirmar que cada depósito apresenta propriedades específicas que o diferencia dos demais, principalmente no que diz respeito ao aspecto prático do seu aproveitamento econômico. Nos mais importantes depósitos brasileiros de fosfato, associados a intrusões alcalino-carbonatíticas, cada localidade apresenta peculiaridades relacionadas à própria diversidade dos tipos litológicos, frequentemente originados em episódios geológicos dis-

intos. Nesses depósitos verifica-se uma complexidade adicional causada por processos posteriores, sejam eles hidrotermiais tardios ou de intemperismo superficial. Enfatiza-se, ainda, que em muitos depósitos os fenômenos de alteração superficial são diretamente responsáveis pelo próprio caráter econômico das acumulações fosfáticas localizadas no manto de intemperismo, através de processos de enriquecimento do tipo eluvionar, residual ou coluvionar.

As principais variações laterais, detectadas nas mineralizações fosfáticas de origem magmática, são devidas à própria complexidade na distribuição das rochas primárias, cujo efeito se reflete também no manto de intemperismo. Este, por sua vez, apresenta ainda um zonamento vertical, mais ou menos pronunciado, de acordo com a intensidade dos processos que atuaram na formação e evolução do manto de alteração.

O zonamento vertical, nos mantos de alteração da maioria dos depósitos relacionados a intrusões alcalinas, permite identificar variações de ordem essencialmente mineralógica, mas por vezes também textural e granulométrica. Em um perfil completo, nem sempre presente em todas as mineralizações, podem ser reconhecidos os seguintes níveis, do topo para a base:

- a) capeamento laterítico argiloso e avermelhado e/ou crostas de canga ferruginosa;
- b) nível de material essencialmente isento de apatita, mas com conteúdos variados de outros fosfatos não recuperáveis nos processos atuais de beneficiamento por flotação, comumente de granulação extremamente fina, podendo apresentar enriquecimento em Nb, Ti, Fe, T.R., Ba e Sr, apresentar enriquecimento em Nb, Ti, Fe, T.R., Ba e Sr, por vezes em níveis econômicos. Não apresenta carbonatos ou silicatos das rochas originais e constitui cobertura estéril das jazidas apatíticas;
- c) horizonte portador de apatita como principal mineral de fósforo, frequentemente enriquecido em relação às rochas subjacentes, cujos carbonatos foram totalmente removidos por lixiviação e cujos silicatos ferromagnesianos foram integralmente alterados. Biotita e flogopita, nas porções superiores desse intervalo, estão transformadas em argilominerais e óxidos de ferro, enquanto nos níveis inferiores o hábito micáceo ainda é reconhecível, em minerais fortemente descoloridos do tipo vermiculita, hidrobiotita e clorita. Quimicamente o horizonte se caracteriza por teores de MgO até 2%, alto  $Fe_2O_3$  e enriquecimento em  $P_2O_5$ , principalmente nos complexos alcalinos onde a apatita é acessório importante dos carbonatos. Esse material é denominado "oxidado", por alguns autores. Em alguns depósitos, fenômenos tardios ou de reprecipitação de apatita e cimentação dão origem a crostas ou mássas mais extensas, de alto teor, duras e de

aspecto muito diverso do minério terroso. Este material, encontrado nos depósitos de Juquiá e Araxá, principalmente, também ocorre nos horizontes subjacentes e caracteriza-se pela granulometria fina dos grãos apatíticos individuais, abundância de carbonato-apatita e intrecrescimento com óxidos de ferro muito finos (Born, 1971; Braga e Born, 1988);

d) horizonte similar ou anterior, mas no qual restos dos silicatos originais ainda estão preservados, ao menos em parte. Conforme se aproxima a porção basal deste nível, o material assume uma coloração mais esverdeada quando úmido, cor predominante das micas, piroxênios e anfibólios presentes nas rochas sãs, sendo que algumas estruturas originais das rochas ainda podem ser reconhecidas, principalmente em superfícies lavadas por enxurradas;

e) horizonte no qual os minerais silicáticos originais, algo intemperizados, representam parte significativa ou dominante da assembléia mineral e no qual as estruturas originais são visíveis em cortes recentes. Esse nível pode ser denominado de "rocha alterada", onde os próprios carbonatos, muito subordinados no topo, assumem uma distribuição significativa, principalmente quando as rochas matrizes são carbonatíficas. Mesmo alguns restos de olivina, eventualmente presente na rocha sã, podem ser identificados embora serpentinizados;

f) rocha muito pouco ou não intemperizada, com exceção das olivinas parcialmente serpentinizadas, e presença de sulfetos de ferro como acessórios comuns.

Nos dois últimos níveis os fosfatos secundários não apatíticos são muito subordinados ou inexistentes.

As características litológicas e, conseqüentemente, a mineralogia dos materiais primários influem diretamente na constituição e no desenvolvimento de minerais secundários, além da espessura do manto de intemperismo; esta última também é determinada pelas condições climáticas e topográficas atuais e pré-terras. No entanto, maiores enriquecimentos em apatita, formação de crostas apatíticas reprecipitadas e maior espessura do perfil de alteração são típicos dos depósitos onde massas carbonatíficas têm participação mais significativa.

## 5 - INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO E O CONCEITO DE TIPOLOGIA

Nos diversos depósitos onde a fluorapatita tem sido estudada em maior detalhe, verifica-se que ela apresenta comportamento tecnológico diferenciado, não apenas devido a recobrimento mais ou menos intenso por crostas de óxi-

hidróxidos de ferro e presença de fosfatos secundários não apatíticos (gorceixita, goyazita e crandallita, principalmente), mas possivelmente também por propriedades de superfície distintas, p.ex., rugosidade.

Entre os minerais de ganga que mais diretamente influem na efetividade do processo de concentração por flotação destacam-se os carbonatos e alguns silicatos. São conhecidas as interferências provocadas por quantidades modestas de carbonatos em mantos de intemperismo, havendo acentuadas diferenças no comportamento de um mesmo carbonato de um depósito para outro, ou, em um único depósito, pela presença de diversos tipos de carbonatos, p.ex., calcita, dolomita e, às vezes, ankerita-siderita.

Considerando os silicatos, constata-se que as micas em diferentes estágios de alteração se comportam de modo diferenciado e que, em vários casos, a presença de um mineral, mesmo em pequenas quantidades, pode ocasionar transformos pronunciados, como, p.ex., anfibólio em Antápolis (Kahn, 1988; Kahn et al., 1988).

Isto demonstra que, embora os minerais largamente predominantes, no conjunto de depósitos fosfáticos, representem talvez 10 a 15 espécies minerais, alguns acessórios pouco frequentes podem ser de fundamental importância tecnológica.

Verifica-se então que importa definir não só os parâmetros de processo, como também variedades de minérios a partir das quais se possa estabelecer critérios de planejamento de lavra, visando uma otimização do beneficiamento e do aproveitamento das reservas de minério.

A concentração de apatita é usualmente efetuada através da flotação aniónica, com o emprego de uma associação coletor-depressor, ajustada em função dos minerais de ganga presentes e das características de superfície dos grãos de apatita. As principais variáveis interferentes no processo estão relacionadas às seguintes características físico-químicas do minério:

- a) presença de magnetita. A magnetita é muito dura e difícil de moer exigindo moínhos de bolas superdimensionados, se não for separada previamente. Por outro lado, a magnetita também tende a ser coletada juntamente com a apatita, aumentando os teores de ferro do concentrado. Estes problemas são hoje minimizados com a inclusão de separação magnética na etapa de moagem, entre os moínhos de barras e de bolas;
- b) conteúdo de finos no minério. A presença de lamnas na flotação aumenta expressivamente o consumo de reagentes e inibe a flotação ("slimes coating"). Tal problema pode ser contornado, ao menos em

- parte, pelo incremento no número de estágios de atração e/ou deslamagem, de modo a minimizar a quantidade de lamas presentes nas operações de condicionamento e flotação, ou com a adição de dispersantes, de forma a evitar a ocorrência de "slimes coating". Contudo a definição das "lamas" varia de um depósito para outro em termos de granulometria. Pelo fato dos finos poderem conter parcela significativa da apatita dos minérios, constata-se uma tendência geral de se tentar melhorar a recuperação global de apatita através do aproveitamento de frações cada vez mais finas;
- c) presença de minerais portadores de cátions de elementos alcalino-terrosos. Estes minerais, dentre os quais se destacam os carbonatos (calcita e dolomita, principalmente), além de silicatos ferromagnesianos (vermiculita, clorita, anfíbio, olivina, serpentina, piroxênios, etc.), tendem a ser coletados juntamente com a apatita diluindo o concentrado, resultando por vezes em adição de elementos indesejáveis, acima dos limites de especificação;
- d) impregnação superficial da apatita por óxidos-hidróxidos de ferro. Os grãos com maior intensidade de recobrimento superficial não respondem adequadamente ao processo. Além disso, sua eventual recuperação através de maior tempo de permanência também resultará em aumento no teor de impurezas do concentrado;
- e) liberação inadequada da apatita (parcela da apatita que ocorre associada aos minerais de ganga, na forma de grãos mistos). Acarreta maiores perdas de fosfato e/ou elevação de contaminantes no concentrado. Este aspecto, bem como o da impregnação superficial da apatita, podem ser reduzidos através de moagem em granulometria mais fina, desde que os grãos de apatita já não sejam naturalmente muito finos. Implica em custo de moagem adicional, além de também gerar maior conteúdo de lamas;
- f) presença de fosfatos não apatíticos. Ocorrem essencialmente como minerais supergênicos, principalmente nos níveis mais superficiais do perfil de alteração. Não interferem propriamente no processo, uma vez que não são recuperados pelo processo de flotação e são de uso restrito por parte da indústria de fertilizantes (termofosfatos unicamente). A presença destes minerais implica em redução da recuperação global do fósforo, visto que somente o fósforo apatítico é passível de recuperação;
- g) presença de diferentes variedades de apatita. Apatitas de composições distintas (flúor/carbonato/hidroxi-apatita) apresentam respostas diversas frente ao processo de flotação. Estas variedades coexistem freqüentemente em um mesmo depósito, podendo ser de natureza primária (processo ígneo), tardia (hidrotermal) ou reprecipitada no manto de intemperismo.

A recuperação global no processo de flotação está relacionada às interações mencionadas e às exigências de qualidade do produto final; concentrações de melhor qualidade, obtidas através da diminuição de contaminantes, via de regra estão associados a recuperações menores da apatita, o que dificulta a eliminação ou redução dos efeitos desses fatores indesejados.

As várias fontes de interferência mencionadas são passíveis de serem traduzidas através de parâmetros definidos e quantificáveis (mensuráveis), de forma a caracterizar, na mesma jazida, diferentes porções de materiais mineralizados com características similares no que concerne ao seu comportamento frente ao processo de beneficiamento.

As características peculiares de cada uma dessas áreas implica, portanto, na existência de uma hierarquização em diferentes tipos de materiais e no conceito de tipologia dos minérios.

A individualização de porções de minério com características distintas é uma atividade que se inicia na fase de pesquisa geológica detalhada, prolongando-se por toda a vida do empreendimento mineiro. No início dos trabalhos, o reconhecimento e o mapeamento são realizados exclusivamente com base em informações geológico/mineralógicas, obtidas a partir da descrição de testemunhos de sondagem, poços e galerias, frentes de lavra e respectivos boletins de análises químicas.

A partir deste mapeamento é estabelecida uma tipologia preliminar de minérios unicamente com base em critérios geológico/mineralógicos. Programas de amostragem são então estabelecidos visando a realização de ensaios tecnológicos para uma avaliação das características do minério frente aos métodos usuais de beneficiamento e a confirmação ou revisão dos critérios estabelecidos na individualização dos tipos de minério.

## 6 - MAPEAMENTO DE TIPOS DE MINÉRIOS

### 6.1 - Mapeamento Geológico-Mineralógico

Nos mantos de intemperismo resultantes da alteração das rochas primárias, cuja espessura total em geral se situa entre 20 e 200 metros, muitas características estruturais e texturais ainda são reconhecíveis nos níveis mais próximos das rochas sãs, embora pronunciadas modificações mineralógicas possam ter ocorrido. Já nos níveis superiores e médios dos mantos de alteração, as feições primárias das rochas não são mais identificáveis, principalmente em testemunhos de sondagem obtidos através de perfuração quase a seco, pela técnica do "embuchamento" normalmente utilizada. Como os trabalhos de pesquisa

em muitos depósitos se limitam ao manto de intemperismo, feições significativas podem passar despercebidas, principalmente quando de âmbito mais localizado. Nesse aspecto, torna-se indicada a descrição de testemunhos do material intemperizado logo após cortá-los ao meio, ainda úmidos, para não perder a oportunidade de identificar as feições ainda preservadas. Na prática, observa-se que em alguns casos a descrição de testemunhos, quando executada de maneira sistemática, é feita já com o boletim analítico às mãos, apenas como meio de identificar as principais variações detectadas nas distribuições dos óxidos dosados.

Além disso, uma vez reconhecido o potencial promissor de um depósito, as análises passam a ser executadas em intervalos pré-fixados, já considerando prováveis níveis de lavra, e não segundo as variações geológicas detectadas. Nessas condições, pode ser recomendada a adoção de duas análises, cada uma representando a metade da altura de uma bancada. Com esse procedimento, as principais variações geológicas ainda serão refletidas nas análises, além de sua comprovada utilidade durante a eventual fase subsequente de lavra, quando extração seletiva de meia bancada (p. ex., no contato de estéril com minério) pode ser tecnicamente recomendada.

Ainda com respeito aos procedimentos adotados na fase de pesquisa, a importância de uma descrição cuidadosa, porém sucinta, dos testemunhos de sondagem tem sido muito bem caracterizada, pois muitas vezes a real importância de certas feições visualmente reconhecíveis somente será identificada durante a fase de efetivo aproveitamento de uma jazida. Da mesma maneira, a experiência tem confirmado a utilidade de um sistema adequado de identificação, acondicionamento e armazenamento de testemunhos e amostras. Isto decorre da freqüente necessidade de redescobrir ou reanalisar testemunhos de sondagem, à luz de novos conhecimentos sobre a mineralização e com vistas à elaboração de plantas geológicas mais acuradas e detalhadas, indispensáveis para o planejamento das operações de lavra de médio e principalmente curto prazos.

A identificação e o estudo da distribuição dos vários minerais deve acompanhar o progresso dos trabalhos de pesquisa. Sua distribuição semi-quantitativa e quantitativa pode ser auxiliada por cálculos estequiométricos e, em casos mais complexos, por técnicas específicas mais elaboradas, p.ex., separações minerais, microscopia e/ou difração de raios X, etc, visando estabelecer a distribuição modal dos constituintes.

Os mapas geológico/tipológicos de bancadas precisam ser constantemente atualizados com novas informações de pesquisa e a partir de constatações nas frentes de lavra, quando a exatidão das previsões tem que ser con-

frontada com a realidade, fato que freqüentemente leva a revisões e reinterpretções em áreas similares ainda por lavar.

Esta constatação é especialmente importante no início de operações de lavra ou quando novos tipos de minérios são efetivamente expostos nas frentes. É nessa ocasião que mapas geológicos/tipológicos elaborados durante a fase de pesquisa, ou essencialmente com dados dela resultantes, são confrontados com a real distribuição dos materiais na mina e com o comportamento do minério em usinas industriais, de produção contínua em grande escala. Nessa ocasião, às vezes os próprios conceitos de tipologia têm que ser revisados e reinterpretados em certa medida.

## 6.2 - Mapeamento Textural

Discordância ou incoerência entre os resultados dos ensaios tecnológicos e a tipologia inicialmente estabelecida são freqüentes em alguns depósitos, estando relacionadas a aspectos texturais do minério (p.ex., grau de liberação ou intensidade de impregnação da apatita por oxí-hidróxidos de ferro). Nestas situações há necessidade de se aprofundar o nível e o volume dos trabalhos para a individualização de tipos de minério, seja através de mapeamento desses aspectos texturais ou daqueles puramente tecnológicos.

O mapeamento textural compreende essencialmente a avaliação de aspectos morfológicos, de intercrescimento (texturais) e cristalográficos da apatita, visando avaliar:

- a) granulagem e grau de liberação da apatita;
- b) presença e intensidade de películas de recobrimento superficial da apatita essencialmente por oxí-hidróxidos de ferro;
- c) nucleação ou intercrescimento com outros minerais;
- d) presença e natureza de microinclusões;
- e) rugosidade na superfície dos grãos de apatita, como por exemplo, sulcos de dissolução;
- f) comportamento diferenciado entre as diversas variedades de apatita.

O estudo desses vários aspectos requer, obrigatoriamente, a manipulação de amostras em laboratório, seguida por observações à lupa binocular e/ou microscópio petrográfico. Técnicas analíticas mais sofisticadas podem também ser empregadas em situações particulares, p.ex., difratometria de raios X ou microscopia eletrônica de varredura. Trata-se, portanto, de um procedimento bastante demorado e restrito quanto ao número de amostras a serem processadas.

Em algumas situações, a existência de diferenças notáveis de comportamento dos minérios em função de uma ou mais dessas características, leva a instituir procedimentos rotineiros, visando quantificar essas características a nível de unidades de lavra, como, p.ex., o grau de recobrimento dos grãos de apatita por óxi-hidróxidos de ferro em Araxá (Takata et al., 1985; Takata et al., 1990).

### 6.3 - Mapeamento Tecnológico

O estabelecimento de critérios de previsão de comportamento do minério em usinas de beneficiamento, a partir de ensaios em laboratório, é uma atividade na qual se vem evidenciando esforços significativos, particularmente no caso de mineralizações complexas. Este procedimento compreende a realização de ensaios de beneficiamento padronizados, em escala de bancada ou piloto, onde se determina uma série de parâmetros tecnológicos ou "índices" de beneficiamento, tais como:

- a) conteúdo de lamas;
- b) recuperação metalúrgica ( $P_{2}O_5$  e massa);
- c) qualidade do concentrado (teores de  $P_{2}O_5$  e impurezas);
- d) índices de seletividade na flotação (flotabilidade relativa).

Os resultados obtidos, que constituem variáveis parametrizáveis na jazida, conjuntamente com outras variáveis geológicas (p.ex., teores) ou texturais (p.ex., índice de impregnação de apatita), são tratados matematicamente, visando avaliar a dissimilaridade entre os elementos destas populações.

Como produto deste trabalho tem-se a identificação de grupos em que estes elementos são correlacionáveis entre si, ou seja, tipos de minério definidos a partir da integração entre parâmetros tecnológicos, geológicos e texturais.

O procedimento matemático empregado consiste, mais usualmente, de "cluster analysis". Uma abordagem teórica deste procedimento é apresentada por Silveira et al., (1989). Ribeiro et al., (1990) apresentam o resultado de um estudo matemático na redefinição de tipologias de minério da jazida de fosfato da Goiásfertil, GO, a partir de um grupo de 17 amostras englobando todos os tipos de minério preliminarmente definidos segundo informações geológicas.

Outro procedimento de abordagem consiste em definir uma ou mais variáveis tecnológicas, como parâmetros a serem sistematicamente determinados na jazida para efeitos de planejamento operacional, empregando os mesmos métodos aplicáveis a teores de bloco de lavra: IQD, Krigagem, etc.

Na realidade esses critérios e os mapas de tipologia resultantes expressam a somatória de muitas das informações contidas nos mapeamentos geológicos/mineralógicos e texturais, acoplados à experiência de operação industrial de usinas de beneficiamento.

A elaboração dessas plantas deve estar estreitamente vinculada à possibilidade de detalhamento a nível de blocos de lavra, pois a partir desses mapas serão formulados ou reavaliados os planos de lavra anuais, semestrais ou mesmo diários. Suas características devem, portanto, permitir o estabelecimento de diretrizes mais ou menos detalhadas, conforme a necessidade, sobre:

- a) a disposição de vias de acesso permanentes ou temporárias;
- b) sistemas de drenagem;
- c) áreas e volumes de capelamento a ser removido;
- d) exposições adequadas dos vários tipos de minérios.

Esses parâmetros têm por finalidade atingir a consecução dos planos de lavra programados, ou mesmo suas opções alternativas, visando a obtenção de pilhas de minério com características razoavelmente homogêneas e constantes ao longo do tempo, que permitam operar as usinas em condições próximas ao ideal, como meio de otimizar a produção de concentrados apatíticos dentro das especificações estipuladas e maximizando a recuperação de fósforo.

## 7 - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE AMOSTRAGEM

Alguns parâmetros de suma importância para a fixação dos critérios de lavra a curto prazo, para blendagem de minérios de diversas frentes, não podem ser estabelecidos através de descrição de testemunhos e interpretação de análises. É o que se verifica, p.ex. em Araxá, quanto ao grau de recobrimento dos grãos de apatita por óxi-hidróxidos de ferro, intercrescimento de apatita com óxidos de ferro em material reprecipitado, ou a determinação da distribuição mineral de quantidades modestas de  $CO_2$  das análises químicas, que pode ocorrer simultaneamente em carbonato-apatita e/ou carbonatos livres (tanto calcita como dolomita), de conseqüências muito diversas para as operações de beneficiamento.

A exposição de novos tipos de minérios em jazidas associadas ao manto de intemperismo, especialmente aqueles portadores de silicatos ou carbonatos em quantidades significativas, pode ocorrer apenas após vários anos de lavra de minérios considerados "normais ou usuais", que moldaram as condições de operação de extração, blendagem e beneficiamento. Caso esses novos materiais se revelem muito problemáticos ou danosos às especificações de concentrados a produzir, normalmente eles são evitados e contornados na lavra, enquanto

sua expressão é subordinada. À medida que sua distribuição adquire proporções extensas nas frentes de lavra e seu significado real não pode mais ser ignorado, tornam-se de extrema importância as informações referentes ao seu comportamento tecnológico. Consta-se, então, com certa frequência, que a real problemática desses materiais é pouco conhecida, ainda que geologicamente sua existência tivesse sido registrada e reconhecida.

Esta situação é bastante compreensível, considerando-se que à época de projeto e instalação de um empreendimento mineiro, um enfoque muito mais detalhado será dado aos minérios a serem lavrados e processados nos primeiros anos de operação. Nesse período os materiais mais problemáticos poderão ser investigados em maior profundidade, em ensaios de bancada e/ou escala piloto, examinando cada tipo de minério separadamente ou diversos tipos blendados, para que na época oportuna possam ser aproveitados e processados dentro das melhores condições técnicas e econômicas.

Para esse fim, torna-se de suma importância a disponibilidade de amostras representativas das diversas tipologias, em quantidades suficientes para ensaios restritos até semi-contínuos. Conquanto testemunhos de sondagem, isolados ou compostos, possam fornecer material para ensaios de curta duração em quantidade adequada, a execução de testes mais prolongados, envolvendo várias toneladas da amostra, esbarra frequentemente na falta de exposições adequadas para amostragem.

Na maior parte dos depósitos esse tipo de dificuldade resulta em amostras mais significativa, e conseqüentemente ensaios mais representativos, dos minérios superficiais, mesmo no caso da utilização de amplas trincheiras ou galerias, especificamente para coleta de amostras provenientes de níveis mais profundos. constitui exceção a amostragem efetuada em Tapira, através de furos de trado mecânico com até 80 cm de diâmetro, atingindo profundidades da ordem de 60 metros (Cruz e Cheney, 1976).

Durante as operações de lavra, os mapas tipológicos permitem dirigir trabalhos no sentido de expor novos tipos de minério, para amostragem adequada à execução de ensaios tecnológicos representativos.

## 8 - CONCLUSÕES

- a) as jazidas brasileiras de fosfato apresentam uma série de peculiaridades, que as distinguem dos grandes jazimentos sedimentares que abastecem a maior parte do mercado mundial;
- b) a complexibilidade mineralógica, textural e tecnológica, aliada ao baixo teor de nossos minérios fosfáticos, exige um conhecimento de-

talhado dos depósitos, a fim de que o seu aproveitamento possa ser efetuado dentro dos padrões desejáveis de eficiência e competitividade;

- c) o estabelecimento de uma tipologia de minérios objetiva e representativa, em cada jazida, constitui elemento valioso para orientar as operações de planejamento de lavra, execução de ensaios de caracterização tecnológica conclusivos e otimização das recuperações de apatita, na forma de concentrados dentro das especificações de mercado.

## 9 - BIBLIOGRAFIA

- BORN, H. O complexo alcalino de Itaquá. São Paulo, 1971. 176p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- BRAGA, J.R.K. & BORN, H. Características geológicas e mineralógica da mineração apatítica de Araxá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, 1988. Anais. São Paulo, SBG, 1988. v.1, p.219-16.
- CRUZ, F.F. & CHENEY, T.M. Recursos de fosfato no complexo carbonatítico de Tapira, Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto, 1976. Anais. São Paulo, SBG, 1976. v.1, p. 89-107.
- KAHN, H. Caracterização mineralógica e tecnológica da jazida de fosfato do maciço alcalino de Antápolis, S. C. São Paulo, 1988. 219p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- KAHN, H., BERHALDO, J.L. & SANT'AGOSTINO, L. Caracterização tecnológica do minério de fosfato de Antápolis, S. C. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 13., São Paulo, 1989. Anais. São Paulo, ABM/APEMI/EPUSP, 1988. v.1, p.297-313.
- KAHN, H.; CASSOLA, M.S.; OBA, C.A.I.; LIBERAL, G.S. & RIFFEL, B.F. Caracterização tecnológica do minério residual de fosfato de Angico dos Dias, BA. ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 14., Salvador, 1990. Anais. Salvador, ABM, 1990. v.1, p. 196-211.
- MARCIANO, A.; RODRIGUES, A. J. & ARAÚJO, A. C. Caracterização tecnológica do fosfato de Patos de Minas. In: SIMPÓSIO EPUSP DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDÚSTRIA MINERAL, 1., São Paulo, 1990. Anais. São Paulo, EPUSP, 1990. p.281-991

RIBEIRO, C.C.; CORVELHO, E.A. & FERREIRA NETO, Y. Tratamento matemático na caracterização tipológica de minérios de fosfato. In: SIMPÓSIO EPUSP DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDÚSTRIA MINERAL, 1., São Paulo, 1990. Anais. São Paulo, EPUSP, 1990. p.59-81.

SILVEIRA, B.V.; GRACIOSO, J.E.; LUZ, P.O. & RODRIGUEZ, P.C. Caracterização tipológica de minérios: uma abordagem geometalúrgica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 3; CONGRESSO LATINOAMERICANO DE MINERIA, 2., São Paulo, 1989. Coleânea de trabalhos técnicos. Lima, OLAMI; Belo Horizonte, IBRAM, 1989. v-1, p-16-27.

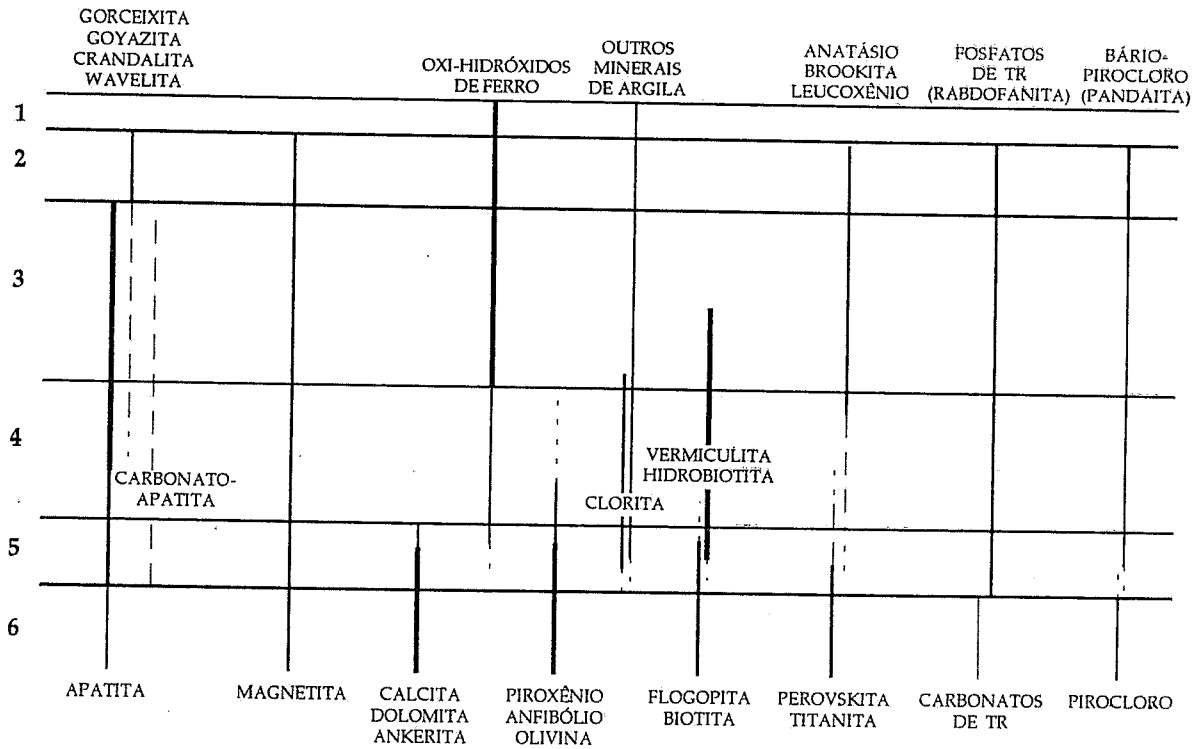
TAKATA, L.A.; ASSIS, J.M.N.; OBA, C.A.; CASSOLA, M.A. & KAHN, H. Caracterização tecnológica de tipos de minério de fosfato da jazida da Araxá, Araxá, MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 14., Salvador, 1990. Anais. Salvador, ABM, 1990. v-1, p.50-65.

TAKATA, L.A., SACHS, P.F.T. & ASSIS, J.M.N. Caracterização tecnológica de fosfatos aplicada ao planejamento de lavra da Araxá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 1., Brasília, 1985. Coleânea de trabalhos técnicos. Belo Horizonte, IBRAM, 1985. p. 78-95.

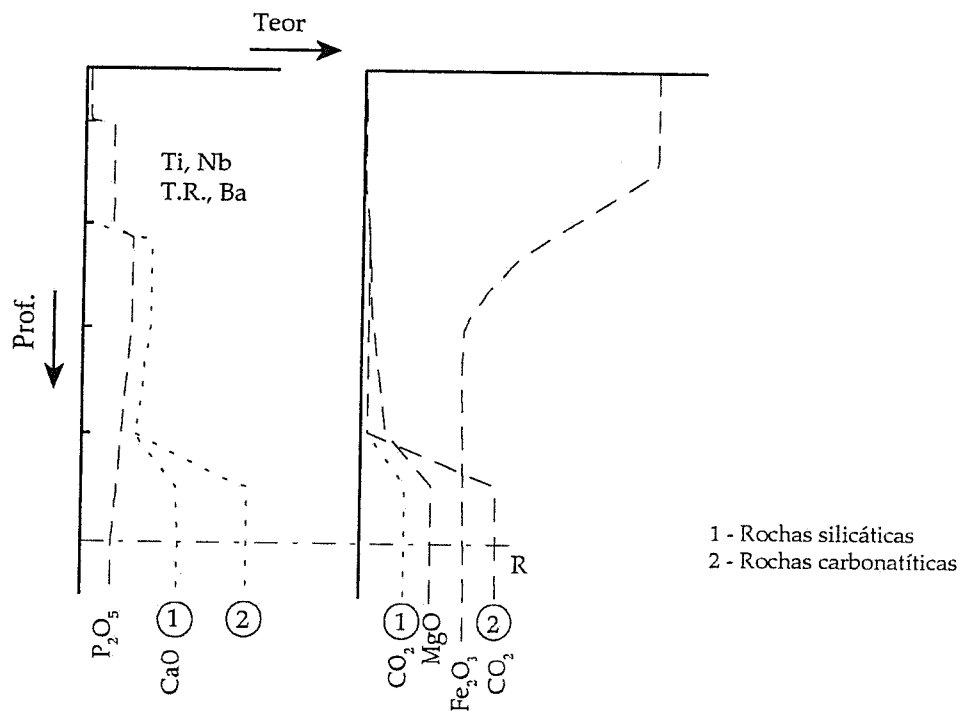
## DEPÓSITOS BRASILEIROS DE FOSFATO

ASSOCIAÇÃO		EM LAVRA	EM AVALIAÇÃO
ROCHAS ALCALINAS E CARBONATITOS	MANTO DE INTEMPERISMO	ARAXÁ TAPIRA CATALÃO (SERROTE)	ANGICO DOS DIAS ANITÁPOLIS IPANEMA SALITRE MAECURÚ
ROCHAS SEDIMENTARES	ROCHA	JACUPIRANGA  PATOS DE MINAS LAGAMAR	IGARASSÚ PAULISTA IRECÊ
OUTRAS			ITATAIA TRAUIRA PIROCAUA

### COMPORTAMENTO DOS PRINCIPAIS MINERAIS NO MANTO DE INTEMPERISMO DE ROCHAS ALCALINO - CARBONATÍICAS



### DISTRIBUIÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PRINCIPAIS ÓXIDOS EM PERFIL DE INTEMPERISMO DE ROCHAS (R) ALCALINO - CARBONATÍICAS.



### FAFORES DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO

- PRESENÇA DE MAGNETITA
- CONTEÚDO DE FINOS NO MINÉRIO.
- PRESENÇA DE ELEMENTOS ALCALINO - TERROSOS
  - Carbonatos : calcita
    - dolomita
    - ankerita
  - Silicatos : micáceos:
    - piroxênio
    - anfíbólio
    - olivina
    - clorita
    - serpentina
- IMPREGNAÇÃO SUPERFICIAL DA APATITA
- LIBERAÇÃO INADEQUADA DA APATITA
- PRESENÇA DE FOSFATOS NÃO APATÍTTICOS
- PRESENÇA DE DIVERSAS VARIEDADES DE APATITA
  - Hábito : prismático
    - ovóide
    - agregados
  - Superfície : lisa
    - rugosa
  - Composição : fluorapatita
    - carbonato-apatita

### PARÂMETROS A CONSIDERAR NO ESTABELECIMENTO DE TIPOLOGIA DE MINÉRIOS

