

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**  
**Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais**

**MONOGRAFIA**

**Uma Breve Discussão sobre Caracterização Mineralógica do Minério Fosfático:  
Tapira e Salitre - MG**

**Aluna: Lorenzza Gonçalves França**

**Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão**

**Setembro 2014**

F814u

França, Lorenza Gonçalves.

Uma breve discussão sobre caracterização mineralógica do minério fosfático [manuscrito]: Tapira e Salitre - MG / Lorenza Gonçalves França. – 2014.

39 f., enc.: il.

Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização do Departamento de Engenharia de Minas.

Bibliografia: f.35-39.

1. Engenharia de Minas. 2. Flotação. 3. Determinação mineralógica. 4. Minérios. I. Brandão, Paulo Roberto Gomes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia de Minas. III. Título.

CDU: 622.7

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
esposo, amigos e aos mestres com carinho.*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA .....	9
3. METODOLOGIA.....	10
4. BREVE DISCUSSÃO: APATITA.....	11
4.1 Mineralogia da apatita: Composição, estrutura e substituição .....	11
4.2 Flotabilidade: Conceito e Complexidades da Apatita .....	14
5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA .....	16
6. RESULTADOS .....	22
6.1 Métodos analisados .....	23
6.2 Complexos Tapira e Salitre: um sucinto diagnóstico .....	26
7. CONCLUSÕES .....	32
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	33
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização dos complexos Tapira e Salitre.....	8
Figura 2.1 – Estrutura da fluorapatita.....	13
Figura 5.1 – Localização das ocorrências alcalinas.....	17
Figura 5.2 – Geologia da região em estudo.....	19
Figura 6.1 – Ensaio de flotabilidade dos diferentes tipos de apatita de Salitre em função do pH. ....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Grupo da Apatita.....	12
Tabela 6.1 – Composição química – Complexo Salitre. ....	27
Tabela 6.2 – Composição química – Complexo Tapira. ....	28

## **RESUMO**

O presente trabalho objetiva conceituar os métodos utilizados para a caracterização mineralógica/tecnológica, pretendem-se elaborar um comparativo, quando possível, dos resultados obtidos para os complexos Tapira e Salitre expostos por Chula (2004) e Barros (2005) respectivamente. Associado a este objetivo, buscou-se, apresentar as características físicas dos referidos complexos, com destaque para a identificação dos carbonatos. Esta caracterização mineralógica, se bem feita, propiciará um melhor planejamento da mina.

## **ABSTRACT**

This paper aims to conceptualize the methods used for the mineralogical / technological characteristics, are intended to establish a comparison, when possible, the results obtained for the Tapira and Salitre complex exposed for Chula (2004) and Barros (2005) respectively. Associated with this objective, we sought to present the physical characteristics of these complexes, with emphasis on the identification of carbonates. This mineralogical, if done well, will provide a better mine planning.

## 1. INTRODUÇÃO

No contexto tecnológico e econômico nacional a agricultura brasileira encontra-se em evidência por causa da revolução tecnológica, que ocasionou um aumento na produtividade que tornou este ramo mais eficiente e competitivo com os outros e ramos da economia nacional. Neste contexto, tal fato propiciou um aumento da fronteira agrícola do País e da capacidade produtiva ampliando, assim, o uso de fertilizante.

Conforme Borlaug (2004), a utilização de fertilizantes propiciou a melhoria da aptidão agrícola de determinados solos o que ampliou a sua utilização para lavoura e culturas.

Porém, a utilização de fertilizante deve ser controlada para não acarretar agressões ao meio ambiente.

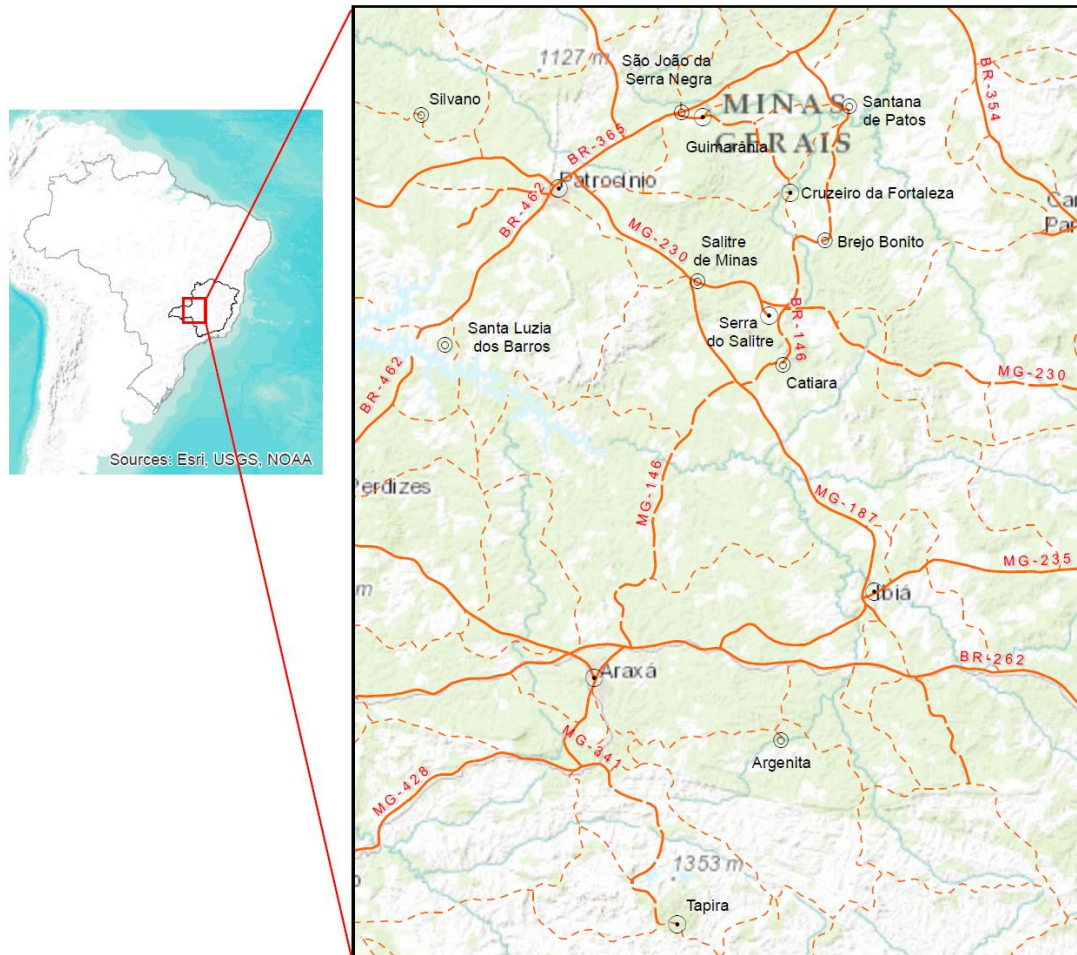
O desenvolvimento no Brasil de fertilizante abarca a produção de matéria-prima básica (concentrado fosfático) com o intuito de garantir a produtividade necessária. A produtividade é garantida pela composição dos fertilizantes, sendo o fósforo um macronutriente indispensável ao crescimento das plantas, este estimula: o crescimento das raízes durante a floração; a formação de sementes; e, aceleração da maturação.

Chula (2004) infere que por causa do aumento da demanda de produtos que possuem fósforo em sua composição ocorreu um investimento em tecnologia por parte as empresas deste âmbito, com o intuito de conseguir bons resultados no aumento da recuperação, qualidade do produto e na redução de custos.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo propor uma conceituação sobre a caracterização tecnológica do minério fosfático extraído da apatita tendo como exemplo os dados secundários das amostras das minas de Tapira e Salitre ambas localizadas em Minas Gerais, conforme Figura 1.1.

Destaca-se que o conhecimento detalhado dos aspectos mineralógicos e texturais são de suma importância ao processo de beneficiamento. Pois, tais propriedades iram adequar

os processos industriais em prol de se obter um produto final de qualidade e com um elevado grau de recuperação.



**Figura 1.1** – Localização dos complexos Tapira e Salitre.

## 2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

Segundo Chula (2004), na década de 90 a indústria de fertilizantes do Brasil investiu em tecnologia específica para concentrar fósforo, em prol de um melhor aproveitamento da reserva mineral do País. Neste período todos os esforços foram voltados pela mineração de fósforo produtiva e capaz de atender o mercado nacional. Entretanto, conforme Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA 1997-2013) ocorreu um acréscimo na produção e consumo de fertilizantes ocasionando pelo aumento da produção agrícola do Brasil.

Em virtude deste aumento no consumo de fertilizante e da alta complexidade mineralógica e morfológica da apatita faz-se necessária uma discussão sobre a caracterização tecnológica do minério fosfático extraído da apatita. Deste modo optou-se por analisar as amostras apresentadas por, especificamente das minas de Tapira e Salitre ambas localizadas em Minas Gerais.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo principal conceituar os métodos utilizados para caracterização mineralógica sendo estes: difração de raios-X, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microanálises químicas (EDS) e espectrometria de infravermelho (EIV). Associado a tal discussão fez-se um comparativo, quando possível, dos resultados obtidos por Chula (2004) e Barros (2005) para cada método supracitado.

Coligado a tal objetivo esse trabalho busca, ainda, apresentar as características físicas da área onde se insere as minas de Tapira e Salitre, com destaque para a identificação dos carbonatos (principais contaminantes dos concentrados de rocha fosfática). Tal levantamento de dados faz-se necessário para compreender o contexto geológico que as referidas áreas das minas estão alocadas e por conseqüências os tipos de apatita que podem ser extraídas deste local.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para este trabalho foi dividida em três fases, sendo elas:

**Fase 1 - Levantamento de dados secundários:** Esta fase foi realizada a partir do levantamento de bibliografias e materiais de cunho técnico/científico que pudessem fundamentar e caracterizar os seguintes tópicos:

- Caracterização mineralógica tendo como referencia a: difração de raios-X, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microanálises químicas (EDS) e espectrometria de infravermelho (EIV).
- Geologia da área em estudo.
- Mineralogia da apatita (Composição e estrutura, Substituição, Flotabilidade)

**Fase 2 - Discussão dos dados:** Neste ponto foi discutido os dados levantados na fase 1, associando-os aos resultados obtidos após as análises das amostras coletadas em Tapira (frente de lavra) e na região de Salitre (ROM). Os resultados das análises destas amostras foram realizados respectivamente por Chula (2004) e Barros (2005). Destaca-se que Chula (2004) coletou e analisou 12 amostras na frente de lavra e Barros (2005), por sua vez, coletou e analisou 19 amostras no ROM. Destaca-se que ambos os autores analisaram em seus estudos 50 kg de cada amostra. Desta forma, sendo possível a comparação entre os resultados obtidos nos métodos de caracterização mineralógica.

**Fase 3 - Interpretação dos resultados:** De posse dos dados das fases 1 e 2 fez-se uma análise comparativa global dos resultados obtidos nos processos de caracterização mineralógica/tecnológica, ao final pode-se inferir o complexo que apresentou-se relevante frente a presença de apatita na sua composição mineralógica.

## 4. BREVE DISCUSSÃO: APATITA

### 4.1 Mineralogia da apatita: *Composição, estrutura e substituição*

Conforme Deer *et al.* (1981), os elementos que constituem o grupo da apatita são considerados minerais acessórios, apresentando-se em quantidade considerável em complexos carbonáticos. Normalmente a apatita é o mineral útil de fósforo, sendo a fluorapatita, clorapatita, hidroxiapatita e carbonato apatita os mais frequentes deste grupo. De acordo com Toledo e Pereira (2001), o conteúdo aniônico do *sítio* monovalente, ocupado por F<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup> ou Cl<sup>-</sup>, será o responsável por distinguir esses principais tipos.

Slansky (1980) e Deer *et al.* (1981), apresentam em seus estudos que há duas variedades da apatita que merecem destaque a francolita e a dalita, os quais constituem-se de quantidades plausíveis de carbonato. A primeira constitui-se de carbonato e mais que 1,0% de flúor. Já a segunda é uma carbonatohidroxiapatita e possui teores de flúor inferiores a 1,0%.

Deste modo o grupo da apatita possui uma extensa família de minerais como apresentado na Tabela 2.1. Segundo Toledo e Pereira (2001), a composição das apatitas depende de sua estrutura mineralógica, do ambiente de sua formação e da necessidade de compensação de cargas para manter sua eletroneutralidade.

**Tabela 2.1** – Grupo da Apatita.

<b>MINERAL</b>	<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>
Fluorapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3\text{F}$
Cloroapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3\text{OH}$
Carbonatohidroxiapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3 (\text{OH})$
Carbonatofluorapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3\text{F}$
Esvabita	$\text{Ca}_5 (\text{AsO}_4)_3\text{F}$
Turneureita	$\text{Ca}_5 [(\text{As}, \text{P}) \text{O}_4]_3\text{Cl}$
Johnbaumita	$\text{Ca}_5 (\text{AsO}_4)_3 (\text{OH})$
Fermorita	$(\text{Ca}, \text{Sr})_5 (\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3 (\text{OH})$
Fluorcafita	$\text{Ca} (\text{Sr}, \text{Na}, \text{Ca}) (\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ce})_3 (\text{PO}_4)_3 \text{F}$
Estrôncioapatita	$(\text{Sr}, \text{Ca})_5 (\text{PO}_4)_3 (\text{OH}, \text{F})$
Belovita – (Ce)	$\text{Sr}_3 \text{Na} (\text{Ce}, \text{La}) (\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{OH})$
Belovita – (La)	$\text{Sr}_3 \text{Na} (\text{La}, \text{Ce}) (\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{OH})$
Alforsita	$\text{Ba}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Morelandita	$(\text{Ba}, \text{Ca}, \text{Pb})_5 (\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Hedifana	$\text{Pb}_3\text{Ca}_2 (\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
Piromorfita	$\text{Pb}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Mimetita	$\text{Pb}_5 (\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
Clinomimetita	$\text{Pb}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Vanadinita	$\text{Pb}_5 (\text{VO}_4)_3\text{Cl}$

**Fonte:** Athena Mineralogy<sup>1</sup>

A estrutura dos minerais apatíticos é hexagonal, no qual cada átomo de F está rodeado por três átomos de Ca num mesmo nível, têm-se, ainda, colunas de Ca-O são atreladas com tetraedros  $\text{PO}_4$  formando uma estrutura de colmeia (Figura 2.1).

O estudo de Náray-Szabó e Mehmel *apud* Dana & Dana (1951), informa que tal estrutura possui uma ampla substituição de cátions e ânions. De acordo com McClellan (1980), tais substituições são normais, a ponto de serem consideradas como uma regra e não uma exceção, as quais ocorrem substituindo os íons constituintes da posição A, X ou Z. Por tal característica é difícil observar uma espécie natural pura do grupo da apatita.

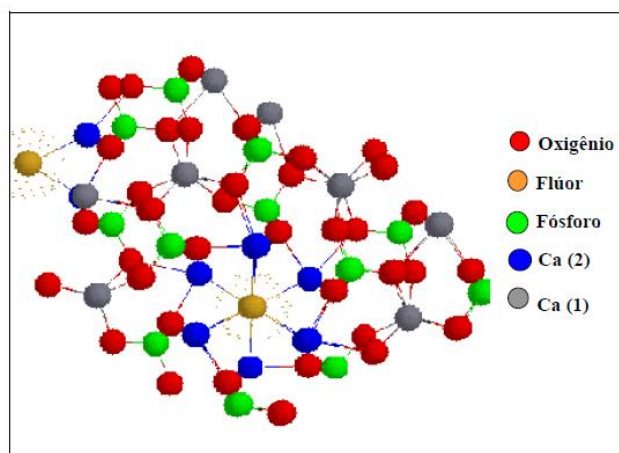
<sup>1</sup> <http://www.un2Sg4.unique.ch/athena/mineral/mimppc17.html>

Assim a fórmula química geral deste grupo é:



Onde:

- A = Ca, Pb, Sr, ETR, Na, Ba, Mg, Mn, Zn, Cd, Ag, dentro outro;
- X = P, Si, S, C, As, V, dentre outros; e,
- Z = F, Cl, OH, dentro outros.



**Figura 2.1** – Estrutura da fluorapatita.

**Fonte:** Ribeiro, C. C. (2002).

Segundo McClellan (1980), as referidas substituições têm sido estudadas tanto em amostras naturais e em produtos sintéticos. Assim, constata-se que tais podem ocorrer nos sítios do cátion  $Ca^{2+}$ , do ânion  $PO_4^{3-}$  e do ânion monovalente dos canais ( $F^-$ ), bem como substituições de menor importância em sítios vazios do mineral. Os limites de substituição podem ser previstos pelo raio iônico dos elementos substituintes. De tal modo, o referido raio irá influenciar diametralmente na estabilidade do íon na estrutura do mineral.

O ETR é um tipo de substituição extremamente importante nos complexos carbonatíticos, pois refletem a composição do magma e sua evolução. A perovskita serve como o principal mineral portador dos ETR, além da apatita, ilmenita e monazita. Em geral, quando o íon  $Ca^{2+}$  é substituído por  $ETR^{3+}$  na estrutura da apatita ocorre uma combinação de substituições ( $ETR^{3+} + Si^{4+} \leftrightarrow Ca^{2+} + P^{5+}$  e  $ETR^{3+} + Na^+ \leftrightarrow 2Ca^{2+}$ ) para

manter o balanço de cargas (Hughes *et al.*, 1991, Fleet & Pan, 1997 e Chakhmouradian & Mitchell, 1999).

Mariano (1978) e Mitchell *et al.*(1997), indicam que quando a apatita é irradiada por feixes de elétrons nota-se a presença de ETR por meio de uma forte catodoluminescência (CL). De tal modo, as apatitas de diferentes paragéneses expõem cores distintas de CL, que refletem a presença de proporções diferentes dos ativadores de CL.

Segundo o estudo de Chula (2004):

*“Uma técnica instrumental excelente para identificação de algumas substituições de íons na estrutura da apatita é a espectrometria de infravermelho (EIV). O espectro infravermelho das apatitas é caracterizado pelas vibrações dos grupos iônicos  $PO_4$ , que em seu estado livre mostram uma simetria de grupo espacial representada por um tetraedro perfeito  $T_d$ .”*

#### **4.2 Flotabilidade: Conceito e Complexidades da Apatita**

Flotação é um processo de separação de partículas sólidas, que está fundamentado na união de uma bolha de ar a uma partícula mineral parcialmente hidrofóbica. Neste contexto, para que a adesão aconteça é necessária à utilização de surfatantes que irão adsorver-se às suas superfícies, tornando-os hidrofóbicas.

De acordo com Assis *et al.* (1985) e Assis *et al.* (1987), para auxiliar na previsão do comportamento do minério na flotação deve-se avaliar as características intrínsecas dos minerais. Pela heterogeneidade química e física das partículas minerais, pode-se alterar a intensidade da interação dos minerais com os coletores aniônicos no processo de flotação.

Rodrigues (1992), Rodrigues & Brandão (1993) e Brandão & Rodrigues (1997) estudaram as apatitas de diversos depósitos e constataram certa dependência entre o grau de cristalinidade e a flotabilidade das apatitas. Assim, “uma apatita com baixa

cristalinidade atingem os mesmos níveis de flotabilidade de uma apatita altamente cristalina, torna-se necessário um aumento considerável da concentração do coletor” (CHULA, 2004).

Os estudos sobre apatita, calcita e dolomita de Jacupiranga (SP) e Itataia (CE) constataram que a granulção, forma do cristal e a rugosidade superficial modificam o comportamento destes minerais na flotação. Vale salientar que a elevação da flotabilidade está relacionada ao maior tamanho do grão, as formas subédricas e euédricas e a menor rugosidade. No caso específico da apatita constatou-se que o aumento no teor de ferro na estrutura diminui sua flotabilidade (ASSIS *et al.*, 1985) e (ASSIS *et al.*, 1987)

Conforme Kahn (1988) há determinadas características físicas da apatita que intervêm no seu processo de flotação, sendo estas descritas a seguir:

- impregnação superficial da apatita por óxidos-hidróxidos de ferro, no qual, os grãos com maior cobertura não respondem adequadamente ao processo;
- quando há minerais portadores de cálcio, estes tendem-se a ser coletados juntamente com a apatita, diluindo o concentrado, elevando os teores de Mg;
- presença de silicatos ferromagnesianos (vermiculita e minerais argilo-limoníticos de granulção fina) que tendem a ser parcialmente coletados com a apatita, elevando os teores de Mg, Fe e Al no concentrado; e,
- liberação inadequada da apatita, acarretando maiores perdas de fosfato. Associando tal fator com a impregnação da sua superficial por óxidos-hidróxidos de ferro haverá uma redução do concentrado na moagem em granulometria mais fina.

O beneficiamento da apatita torna-se mais complexo, visto que, além das características químicas e físicas que interferem no processo de flotação, tem-se, ainda, a seletividade em relação aos minerais da ganga. A contaminação do concentrado com minerais da ganga acarretará um aumento no consumo de ácido sulfúrico no estágio de produção do ácido fosfórico, o que proporcionará um grande aumento nos custos operacionais. Precisa-se, promover melhores condições a seletividade no processo.

## 5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

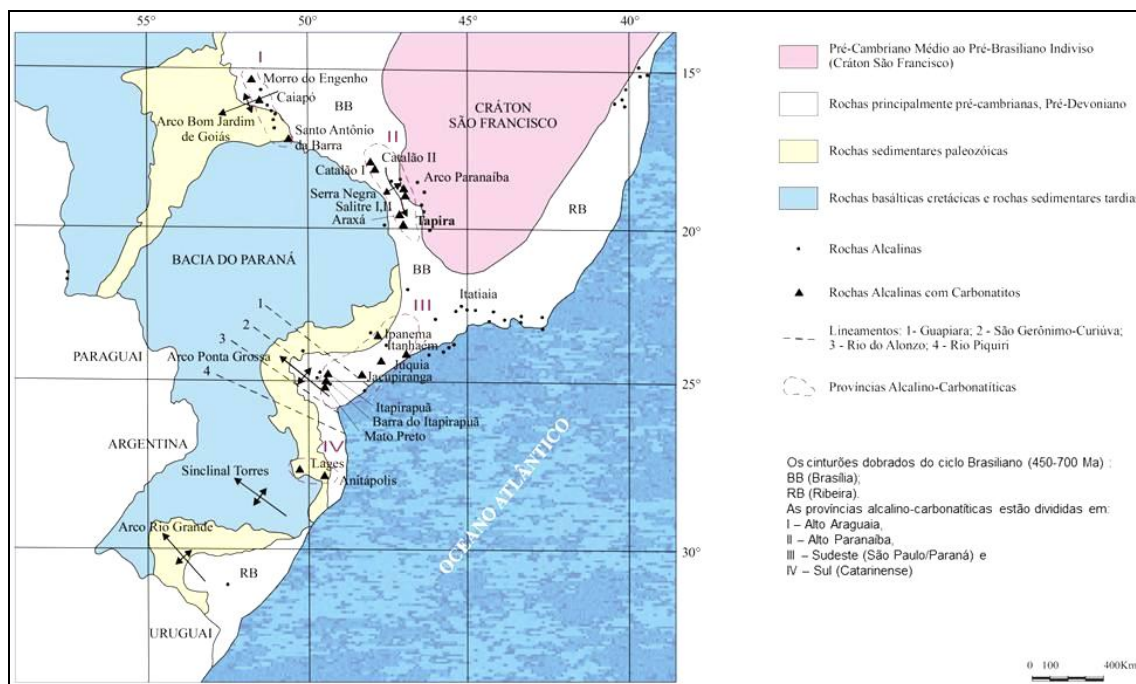
No estudo apresentado por Lapin *et al.* (1999), os carbonatitos e os complexos alcalinos, com idade que variam de Pré-cambriano até o Cenozóico, são feições essencialmente continentais e situando-se nas zonas de reativação tectono-magmática nos crátons e faixas de dobramentos estabilizadas. Segundo Biondi (1986), aqueles necessitam de um ambiente propício para mineralização de P, Ti, Nb e terras-raras.

Desta forma, os complexos alcalinos-carbonatíticos são de extrema importância econômica, por serem fontes de depósitos de nióbio, terras-raras (cério e lantânio), fosfato, titânio e calcário.

Frolov (1971) observou que no referido complexo a um aumento do desenvolvimento de rochas ultrabásicas (dunitos e piroxenitos) e rochas de sua alteração (metassomatitos micáceos ou ricos em anfibólio), fato que se justifica pelo aumento da erosão nos maciços associados à perda de carbonatitos. Por tal motivo, estes ocorrem geralmente em forma de veios.

No Brasil há cerca de 21 complexos carbonatíticos, segundo Rodrigues & Lima (1984), que estão relacionados com as rochas alcalinas. Estes se encontram agrupados em 5 províncias geográficas: Amazônica, Alto Araguaia, Alto Paranaíba, Sudeste e Sul (Figura 5.1).

Destaca-se que há um controle tectônico na distribuição dos complexos brasileiros, visto que estes advêm em uma faixa orientada NW-SE. As feições que marcam tal controle são as fraturas paralelas e profundas de direção NW, sendo estas relacionadas às estruturas de arcos (CHULA, 2004).



**Figura 5.1** – Localização das ocorrências alcalinas.

**Fonte:** Chula (2004).

Com relação à geocronologia merece destaque o estudo realizado por Hasui & Cordani (1968), no qual são utilizados os métodos K-Ar em rochas alcalinas do oeste mineiro e sul de Goiás. Neste contexto, os complexos de Tapira, Serra Negra, Salitre e Catalão estão datados no Cretáceo Superior, com idade em torno de 70 a 80 milhões de anos. Apenas o complexo de Araxá apresentou idade um pouco mais antiga (cerca de 90 m.a.).

Vale salientar que os complexos intrusivos de Tapira e Salitre que são alvos deste estudo estão alocados na Província do Alto Paranaíba, considerada a mais importante economicamente no Brasil, em relação às reservas de nióbio, fosfato, titânio e terras-raras.

Neste sentido, tais complexos encontram-se alinhados ao longo de falhas com direção NW, associada ao arco cratônico Paranaíba, estando este situado entre os basaltos da bacia do Paraná e o cráton do São Francisco. Segundo Brod *et al.* (2000), a Província Ígnea do Alto Paranaíba é composta por uma variedade de tipos de rochas ultrapotássicas, incluindo kimberlitos, lamproítos, kamafugitos e grande quantidade de complexos alcalinos-carbonatíticos intrusivos.

Especificamente, o complexo de Tapira tem a origem dos seus litótipos associada à cristalização fracionada de um magma alcalino-silicático seguido por ações de imiscibilidade de líquidos silicáticos-carbonáticos (BRIGATTI *et al.*1996). Já o complexo de Salitre, conforme Haggerty & Mariano (1983) e Mariano & Marchetto (1991), possui como tipos petrográficos os bebedouritos, foscoritos e carbonatitos, além de rochas feldspáticas subordinadas, como tinguáito e traquito, as quais incidem especialmente como diques inclusos a este complexo. Esta intrusão de carbonatitos transformou as rochas ultramáficas em flogopititos metassomáticos.

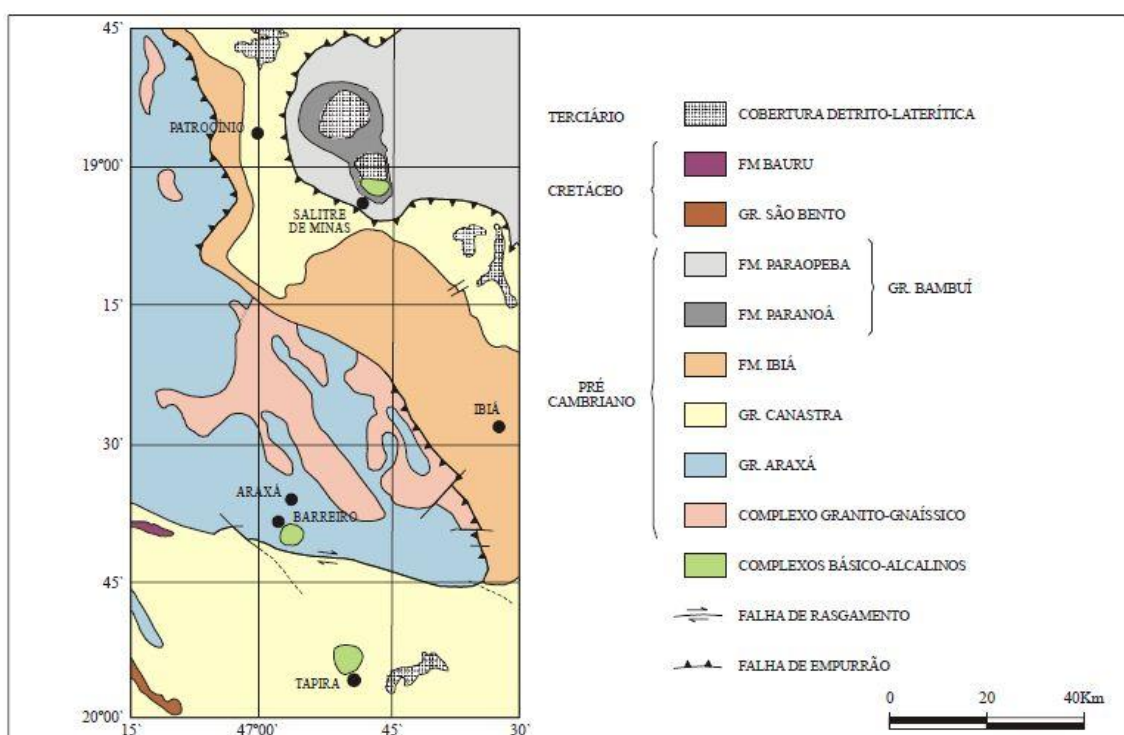
A Figura 5.2 mostra um esboço geológico da região do oeste mineiro, onde se verifica que o complexo de Tapira está encaixado em metassedimentos do grupo Canastra e complexo de Salitre possui rochas do grupo Bambuí associados a formações grupo da Canastra.

Segundo Chula (2004) no Grupo Canastra os metassedimentos encontra grandes veios de quartzo que são divididos em dois compartimentos, sendo eles:

*“- porção superior pelítica, constituída por filitos/xistos a moscovita, clorita, quartzo e, às vezes, grafita, pirita, rutilo e granada. A pirita e a granada ocorrem como porfiroblastos com diâmetro médio de 5 mm. Subordinadamente ocorrem lentes de calcário; e, - porção inferior psamítica composta principalmente por quartzitos micáceos, com quantidade variável de feldspato, bem como presença local de hematita e magnetita. Ocorrem ainda intercalações de calcário dolomítico, com alguma grafita e quartzo.”*

Destaca-se que os quartzitos do Grupo Canastra, da intrusão de Tapira, sofreram uma ascensão, por causa do empuxo do magma básico-alcalino, que acarretou a formação de estruturas semi-anelares. Estas influenciaram diretamente na forma radial da drenagem ao redor dos maciços. De acordo com Chula (2014) *“os quartzitos formam um anel quase completo ao redor do complexo e, onde está ausente, encontra-se substituído por um material fenitizado”*.

Já o grupo Bambuí é subdividido em três formações sendo elas: Paranoá, Paraopeba e Três Marias. Estas, por sua vez, possuem rochas embrionárias ao metamorfismo, sendo compostas por calcários, arenitos quartzíticos, arcósios, conglomerados, siltitos, margas e filitos ardosianos. Destaca-se que a área de Salitre apresenta exclusivamente rochas das formações Paranoá e Paraopeba, as quais possuem como representantes litológicos os calcários, ardósias, siltitos, quartzitos e filitos.



**Figura 5.2** – Geologia da região em estudo.

**Fonte:** Chula (2004).

Especificamente, para os complexos de Tapira e Salitre são identificados os litótipos descritos resumidamente, segundo os dados de Cruz & Cheney (1976), Grossi Sad & Torres (1971), Grossi Sad & Torres (1976) e Vieira (1997), em:

- Piroxenitos ou “bebedouritos” são rochas que variam de cor verde acinzentado a marrom escuro ou marrom amarelado e exibem textura granular. O piroxênio apresentando grandes quantidades de apatita, biotita, flogopita, perovskita, titanomagnetita, melanita/schorlomita, calcita, ilmenita e pirita. Alguns exibem

uma foliação definida pela orientação do piroxênio e da mica definido por níveis onde concentram-se perovskita, apatita ou magnetita.

- Dunitos são rochas que fazem parte de corpos intrusivos onde processos de acumulação, levam à concentração extrema em olivina. Visto que há tempo e temperatura suficiente para os cristais se desenvolverem plenamente eles crescem até se tocarem formando uma textura granular poligonal caracterizando pela cor cinza escuro e granulação fina a média.
- Peridotitos são rochas constituídas por anfíbolos e piroxenas e, sobretudo, por olivina. São rochas ultrabásicas muito densas e escuras. O magma que as originou formou-se em grande profundidade, muitas vezes na parte superior do manto. Os peridotitos são rochas muito alteráveis por efeito dos agentes meteóricos, transformando-se em serpentinitos, é rochas que possuem cor verde escuro a verde acinzentada quando frescas, ou coloração marrom amarelado a marrom acinzentado quando decompostas e mostram granulação média a grossa e textura inequigranular.
- Glimeritos é uma rocha ígnea máfica formada quase que essencialmente por biotita, segregados nos peridotitos, piroxenitos e carbonatitos e são os produtos de alteração de piroxenitos e peridotitos, pela interação com fluidos alcalinos metassomáticos, provenientes do magma carbonatítico. Apresentam cor arroxeadada, quando frescos, e adquirem tonalidades mais claras, quando decompostos.
- Traquitos e lamprófiros são rocha vulcânica associada a erupções efusivas de magmas ácidos (siliciosos) a intermédios. Rocha geralmente de cor cinzenta clara, compacta e de granularidade fina, onde é possível observar cristais de feldspato. Os lamprófiros são grupo de rochas magmáticas escuras, de cor escura melanocrática ou mesocrática, muito rico em minerais ferromagnesianos (principalmente biotite e hornblenda) pertencentes a duas gerações, uns com fenocristais, outros integrados na pasta, são rochas originadas por magmas ricos

em água, que cristalizam rapidamente, tornando os equilíbrios químicos muitas vezes incompletos, pelo que é possível a existência de olivina e quartzo.

- Carbonatitos são rochas de cor clara, branca e acinzentada quando frescas e castanho escuro quando decompostas e se classifica uma considerável variedade de rochas vulcânicas e ígneas intrusivas cujos principais constituintes são minerais carbonáticos na proporção de 50% ou mais. O material carbonatítico, tardio no processo magmático, metassomatizou irregularmente as rochas magmáticas iniciais, resultando na formação de novos minerais (anfíbólio e flogopita), podendo o resultado final ser um glimerito.
- Silexitos são rochas sedimentar silicosa, compacta, de granulação muito fina, de diversas origens, que por conter alguma goethita, que se decompõe com muita facilidade, apresentam sempre uma cor acastanhada clara ou escura. Podem conter barita e mais raramente fluorita.
- Silicocarbonatito são compostos por rochas que apresentam predominância de silicatos, de 50,0 a 70,0%, com carbonatos.

Destaca-se que no complexo de Salitre, encontra-se foscorítica, cercada por uma canga limonítica. Esta última trata-se de um produto do intemperismo tropical, que atuou sobre a rocha foscorito. O intemperismo ocorrido nessa rocha remove a apatita e carbonetos deixando-a rica em magnetita, sobra-se assim uma rocha com tonalidade de ferrugem e porosa (BARROS, 2005).

## 6. RESULTADOS

A caracterização mineralógica tem como objetivo apresentar a composição e principais propriedades de um material. Para tanto são necessárias diversas técnicas instrumentais que serão discutidas neste tópico. Vale salientar que esta etapa é de suma importância, pois é neste momento que se avalia a possibilidade de uso industrial determinado mineral, além de estabelecer as operações de beneficiamento.

Neste aspecto fez-se necessário uma comparação, quando possível, dos dados apresentados por Chula (2004) e Barros (2005) em relação às amostras coletadas em cada diferentes litologias presentes nos complexos Tapira e Salitre, respectivamente. Destaca-se que Chula (2004) coletou e analisou 12 amostras na frente de lavra e Barros (2005), por sua vez, coletou e analisou 19 amostras no ROM.

Vale salientar que Chula (2004) agrupou as 12 amostras de clinopiroxenito da seguinte forma:

- amostras 2, 5 e 10 – clinopiroxenito pouco alterado;
- amostras 1, 4 e 9 – clinopiroxenito micáceo;
- amostras 11 e 12 – clinopiroxenito argilizado; e,
- amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita.

Já Barros (2005) agrupou suas 19 amostras da seguinte forma:

- amostras 3, 23B, 24 e 25 – apatitito;
- amostras 1, 08A, 9, 10, 14, 16 e 19 – zona de mistura;
- amostra 08B – foscorito intemperizado;
- amostra 6 – foscorito silicificado;
- amostras 17, 18, 20, 26 e 27 – piroxenito; e,
- amostras 22 e 23A – piroxenito intemperizado.

## 6.1 Métodos analisados

### a) Difração de Raios-X

A difração de raios-X, segundo Formoso (1984), é um processo no qual os raios-X são espalhados pelos elétrons dos átomos da amostra sem que haja alteração no seu comprimento de onda. Assim, neste processo ocorre um fenômeno conhecido por espalhamento coerente ou espalhamento de *Rayleigh*, onde o intercâmbio entre o fóton do feixe incidente e os elétrons da amostra não sofrem perda de energia.

Porphírio & Barbosa (1998) em seus estudos informam que a difração de raios-X não é somente empregada na identificação de substâncias inorgânicas, Mas também pode ser utilizada na determinação do grau de cristalinidade, bem como parâmetros de cela unitária, tamanho e orientação de cristais.

Chula (2004) em seu estudo adotou-se o dois tipos sendo o primeiro o “*difratômetro de raios-X de fabricação Rigaku, modelo Geigerflex, semi-automático, com monocromador de cristal de grafita curvo e tubo de cobre.*” Já o segundo refere-se a marca Philips, modelo PW 3710, com trocador automático.

Já Barros (2005) optou-se pelo uso do “*difratômetro de raios-X, marca Phillips, modelo MPD 1880*”.

Enfatiza-se que ambos os autores utilizaram o método de pó, por este ser ideal na identificação das fases minerais e por utilizar a radiação monocromática ( $\lambda$  constante) (FORMOSO, 1984; BRANDÃO, 2013).

### b) Microscopia Óptica

Com o microscópio óptico é possível identificar os minerais mais comuns de uma amostra, além de apresentar e mostrar as relações entre eles. Vale mencionar que este tipo de microscópio utiliza a luz visível, sendo o instrumento mais prático e simples para as análises das estruturas na faixa de 1 cm a 1  $\mu$ m.

Chula (2004) indica que esta técnica pode ser aplicada em estudos quantitativos, ou seja, pode ser utilizada para contagem dos grãos e para determinar a composição percentual por fase.

De acordo com Craig & Vaughan (1994) são dois os tipos de instrumentos mais comuns neste tipo de caracterização, sendo um o microscópio óptico de luz transmitida (MOLT) e outro microscópio óptico de luz refletida (MOLR). Destaca-se que em ambos os modelos pode-se utilizar a luz polarizada. Entretanto, o primeiro MOLT é usado para minerais transparentes, e o segundo MOLR é utilizado para minerais opacos.

Com relação aos equipamentos utilizados destaca-se que Chula (2004) realizou um estudo petrográfico/mineralógico com o microscópio óptico Leitz-Ortoplan, com recursos para observação em luz transmitida e refletida. Já Barros (2005) optou por um microscópio de marca Leica, modelo DMRXP.

#### c) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microanálises Químicas (EDS)

A MEV é uma técnica de caracterização microestrutural que pode ser aplicada em diversas áreas do conhecimento passando da mineralogia até a biologia. Fato que pode ser justificado por tal técnica permitir a caracterização local de distintos tipos de matérias, sem perder sua principal qualidade que é a alta resolução espacial e a excelente qualidade dos resultados.

Destaca-se para a análise em MEV as amostras devem estar secas e serem condutoras de corrente elétrica. Quando o material não for condutor, por natureza, deve-se recobri-lo com uma película fina de algum material condutor, para torná-lo condutor e poder ser analisado.

Nas rotinas de microanálises químicas quantitativas a microsonda eletrônica é o equipamento mais indicado, principalmente para materiais pequenos. Isto deve-se ao fato dos limites de detecção serem bem baixos ou em situações que exijam maior resolução espectral (Kahn, 2001).

Em seu estudo Chula (2004) escolheu um microscópio eletrônico da marca JEOL, modelo JSM-5410. Já as microanálises foram realizadas no equipamento da marca Noran, modelo TN-M3055, composto de EDS. Este último permitiu a detecção dos elementos de número atômico idêntico ou superior ao boro. As análises quantitativas, por sua vez, foram realizadas por microsonda eletrônica da marca JEOL, modelo JXA8900RL.

Barros (2005), por sua vez, utiliza em seu estudo de MEV o equipamento da marca Leo, modelo Stereoscan 440, acoplado com sistema de microanálise EDS e WDS. Já o equipamento utilizado para análises de microsonda eletrônica (MSE) foi o modelo Camebax SX-50, fabricante Cameca.

#### d) Espectrometria de infravermelho (EIV)

A EIV, segundo Brandão *et al.* (1990) e Skoog *et al.* (1998), é considerado um dos métodos que tem extenso aproveitamento na química orgânica e no estudo de minerais e compostos inorgânicos. Este método fornece resultados qualitativos e quantitativos sobre a amostra, sendo utilizada nas análises de amostras gasosas, líquidas, sólido cristalino e sólido amorfo.

Para as espécies mineralógicas, como a apatita, a EIV apresenta a impressão “digital do minerais” e é utilizado como técnica complementar. Assim, tal processo permite compreender de forma mais abrangente a identificação de minerais de baixa cristalinidade, com altos índices de substituição e materiais amorfos.

Neste procedimento Chula (2004) utiliza o equipamento da marca Bomem Hartmann & Braun, modelo DA8. “*Os espectros foram obtidos na faixa de número de onda de 500-4000 cm<sup>-1</sup>.*”

Já Barros (2005) emprega a espectrometria de infravermelho para complementar a diferenciação das apatitas, visto que tal procedimento permite detectar a presença dos grupamentos iônicos OH<sup>-</sup> e CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, que são diagnosticados por meio das análises de microsondas (WDS ou EDS).

## 6.2 Complexos Tapira e Salitre: *um sucinto diagnóstico*

Os resultados da caracterização mineralógica apresentados nos estudos de Chula (2004) e Barros (2005) referente à composição química e análises mineralógicas das amostras, possibilitou a comparação entre os complexo de Tapira e Salitre.

Deste modo, ao analisar as Tabelas 6.1 e 6.2 nota-se que as amostras do complexo Salitre apresentam maior conteúdo de  $P_2O_5$ , ou seja, de minerais do grupo das apatitas, se comparado as amostras do complexo Tapira. Vale salientar que as amostras deste último apresentaram valores elevados de  $MgO$  e  $SiO_2$  ao fazer a mesma comparação.

Destaca-se, ainda, que nas amostras de Salitre seria possível realizar uma separação magnética visto que os teores de  $Fe_2O_3$  apresentaram-se mais elevados ao ser comparado com as amostras de Tapira.

A presença de íons determinadores de potencial, cálcio e magnésio, influenciam significativamente no processo de flotação. Neste sentido nota-se que no complexo Tapira há um predomínio de elementos que tem em sua composição estes íons, sendo necessário uma verificação mais detalhada buscando identificar as fontes emissoras. Posteriormente, propor ações que reduza-as em prol de bons resultados neste processo.

**Tabela 6.1** – Composição química – Complexo Salitre.

Elementos (% em peso)	Amostras					
	Apatitito	Foscorito Intemperizado	Foscorito Intemperizado	Zona de Mistura	Piroxenito Intemperizado	Piroxenito
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	30,9	21,3	17,3	19,3	14,1	10,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,4	39,3	28,1	22,1	30,0	19,2
MgO	0,5	1,4	0,8	2,2	2,9	10,4
CaO	42,3	27,2	22,8	26,2	19,4	21,1
SiO <sub>2</sub>	2,3	1,6	15,9	12,9	14,4	22,0

**Fonte:** Adaptado de Barros (2005).

Tabela 6.2 – Composição química – Complexo Tapira.

Elementos (% em peso)	Amostras											
	Clinopiroxenito pouco alterado			Clinopiroxenito micáceo			Clinopiroxenito argilizado		Clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita			
	2	5	10	1	4	9	11	12	3	6	7	8
P2O5	3,42	3,44	9,60	6,84	3,85	5,29	11,80	6,37	8,96	6,87	5,91	5,89
Fe2O3	16,80	13,80	12,1	14,7	15,2	19,5	26,30	26,83	17,70	19,30	13,90	17,40
MgO	10,30	11,90	4,63	11,9	11,3	8,58	1,32	6,15	7,80	5,68	5,25	5,15
CaO	24,4	25,20	31,1	20,3	20,8	16,8	16,80	11,3	28,10	26,60	27,30	27,4
Al2O3	1,11	1,75	0,70	2,43	3,44	1,72	4,26	5,87	0,66	0,78	0,40	0,41
SiO2	26,04	27,58	19,3	30,7	26,8	34,1	16,8	23,56	13,48	18,49	19,30	15,5
TiO2	7,57	3,31	3,72	7,03	6,34	9,88	11,8	12,04	12,80	10,20	14,30	17,6
Na2O	1,33	0,89	0,50	0,45	0,10	0,37	0,10	0,43	0,94	0,20	0,14	0,12
K2O	0,41	0,18	0,51	0,70	1,50	0,25	0,18	1,46	0,22	0,088	0,18	0,11
MnO	0,23	0,20	0,24	0,19	0,24	0,23	0,43	0,31	0,20	0,28	0,24	0,23
BaO	0,052	0,072	0,40	0,055	0,14	0,042	0,16	0,14	0,043	0,054	0,21	0,10
SrO	0,17	0,13	0,73	0,23	0,27	0,18	0,23	0,25	0,34	0,24	0,34	0,25
ZrO2	0,14	0,17	0,013	0,051	0,10	0,044	0,10	0,09	0,074	0,048	0,06	0,07
ThO2	0,005	0,005	0,035	<0,005	<0,005	<0,005	0,017	<0,005	0,014	0,009	0,009	0,009
U3O8	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y2O3	0,012	0,010	0,020	0,010	0,009	0,011	0,024	0,011	0,02	0,016	0,013	0,01
Nb2O5	0,11	0,062	0,10	0,097	0,070	0,090	0,17	0,08	0,16	0,11	0,11	0,12
La2O3	0,11	0,057	0,14	0,11	0,070	0,12	0,21	0,081	0,18	0,13	0,15	0,17
CeO2	0,22	0,11	0,35	0,23	0,16	0,24	0,43	0,16	0,37	0,28	0,34	0,38
Pr6O11	0,024	0,011	0,040	0,025	0,017	0,030	0,043	0,018	0,042	0,03	0,037	0,042
Nd2O3	0,081	0,040	0,15	0,083	0,060	0,090	0,15	0,059	0,14	0,10	0,13	0,15
Sm2O3	0,012	0,005	0,022	0,014	0,008	0,013	0,022	0,009	0,021	0,015	0,019	0,021
Eu2O3	<0,002	<0,002	0,005	<0,002	<0,002	0,003	0,006	<0,002	0,004	0,003	0,004	0,004
Gd2O3	0,006	0,004	0,010	0,010	<0,004	0,007	0,012	0,005	0,011	0,008	0,009	0,010
Dy2O3	<0,004	<0,004	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,007	<0,004	0,006	<0,004	<0,004	0,005
F	0,14	0,13	0,25	0,24	0,23	0,14	0,21	0,60	0,24	0,22	0,14	0,13
P.F.	9,01	9,75	16,3	3,64	9,57	4,19	8,98	6,04	9,75	11,40	13,30	10,8
CaO/P2O5	7,13	7,33	3,24	2,97	5,40	3,18	1,42	1,77	3,14	3,87	4,62	4,65

Fonte: Adaptado de Chula (2004).

Destaca-se que a estabilidade da apatita identificada nas 12 amostras clinopiroxenitas da mina de Tapira apresentaram substituição do ânion  $\text{PO}_4^{3-}$  por  $\text{CO}_3^{2-}$ , sendo classificada como carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita e estudada de forma similar por Cruz & Cheney (1976). A classificação primorosa da composição da apatita como carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita foi possível por causa da técnica de espectrometria de infravermelho juntamente com microanálises WDS.

A substituição descrita anteriormente tem um efeito desestabilizador da estrutura, tornando a apatita mais solúvel. Contudo, ela poderá levar a incorporar F (flúor) na sua composição o que acarretará um aumento na estabilidade, ou seja, a fluorapatita torna-se o tipo menos solúvel no grupo das apatitas.

Outro tipo de substituição comum as amostras de Tapira refere-se ao cátion  $\text{Ca}^{2+}$  por  $\text{Sr}^{2+}$  e  $\text{ERT}^{3+}$ , esta alteração propicia um efeitos conflitante nos parâmetros de cela unitária e da estabilidade. Destaca que a referida substituição de  $\text{Ca}^{2+}$  por  $\text{Sr}^{2+}$  propiciará um aumento na densidade da apatita (CHULA, 2004).

No depósito de Salitre, conforme Barros (2005) há um processo de substituição de apatitas por carbonatos, como observado no complexo de Tapira. Tal substituição no caso de Salitre resulta em grãos pseudomórficos de apatita parcialmente substituídos por carbonatos. Este intercrescimento entre apatita e carbonatos, no caso de Salitre, dificilmente poderá ser separados, a não ser este seja submetido à moagem muito fina. A grande influência da morfologia das apatitas irá interferir de forma negativa nos processos de beneficiamento, apesar do teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ser maior neste depósito como supracitado.

A microflotação que é um parâmetro importante para o dimensionamento e para as etapas do projeto de tratamento de minério necessita primeiramente da caracterização mineralógico. Após realizado os procedimentos pode-se realizar a microflotação e discutir as principais dificuldades neste processo.

Assim em Tapira, segundo Lenhoro (1994), os níveis de flotabilidade da apatita estão ligados ao grau de intemperismo das amostras e a presença de apatitas secundárias, ou seja, com o aumento destas duas características haverá um diminuição na flotabilidade. Comumente, o estudo de Lenhoro (1994), que avaliou a flotabilidade de apatitas

oriundas de distintos depósitos brasileiros, confirmou a informação supracitada, na qual as apatitas secundárias apresentaram flotabilidade inferior às apatitas primárias.

Outro fato limitante, conforme Salum *et al.* (1990), é a presença de contaminantes Fe, Si e Ti na superfície das partículas de apatita o que reduz a sua flotabilidade, para uma igual concentração de reagente coletor.

De acordo com Rodrigues e Brandão (1993) citado por Barros (2005), a flotabilidade esta ligada, ainda, aos diferentes grau de cristalinidade da apatita. Portanto, as apatitas com maior cristalinidade possuem um desempenho melhor frente à flotação. Em contrapartida as amostras de apatita com índices de cristalinidade menores necessitaram uma dosagem elevada de coletor para que atingisse o mesmo desempenho das amostras com boa cristalinidade.

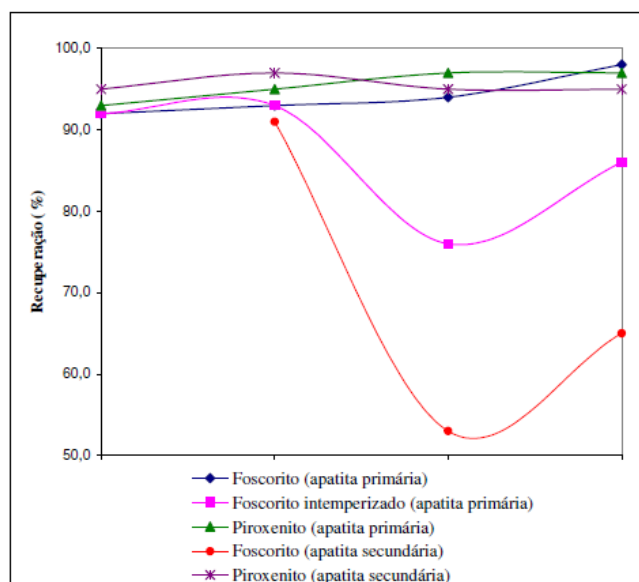
Considerando a afirmativa anterior faz-se necessário um estudo aprofundado do grau de cristalinidade nos complexos Salitre e Tapira, vislumbrando uma possível comparação do melhor complexo frente ao processo de flotabilidade.

Deste modo, de acordo com Chula (2004) as após a análise das 12 amostras de clinopiroxenitos de Tapira constatou-se que estes apresentam apenas apatita primária. Por tal motivo infere-se que possivelmente que seu desempenho no processo de flotação será bom. Contudo, ao fazer tal análise deve-se levar “*em consideração a seletividade em relação aos minerais de ganga*”.

Corroborando com as considerações de Chula (2004) e Lenharo (1994) quanto à flotabilidade da apatita secundária Barros (2005) apresenta a Figura 6.1, na qual, nota-se que há elevada recuperação esta relacionada à presença de apatitas primárias.

No entanto, as apatitas secundárias provenientes do piroxenito apresentaram excelente flotabilidade ao compará-la com as apatitas originarias do foscorito. Isto justifica-se pela existência de alguma característica essencial a esta amostra que lhe atribui esta boa flotabilidade.

A Figura 6.1 mostra, ainda, uma variação no compartimento da amostra de apatita primária do foscorito intemperizado é inerente as substituições químicas de sua estrutura, principalmente pela substituição do substituição do ânion  $\text{PO}_4^{3-}$  por  $\text{CO}_3^{2-}$ .



**Figura 6.1** – Ensaio de flotabilidade dos diferentes tipos de apatita de Salitre em função do pH.

Fonte: Barros (2005).

## 7. CONCLUSÕES

O ponto inicial para o conhecimento dos minerais, bem como os seus comportamentos face ao processo de concentração adotado é a caracterização tecnológica. Este processo permitirá, si for bem feito, um planeamento de mina seguro e confiável, sendo este responsável por minimizar as possíveis desventuras que o minério propicia a industrialização. Além de reduzir os riscos na operação industrial como perdas de qualidade e a falta de comprimento das especificações dos produtos.

Este estudo é de suma importância, pois possibilita a constatação da ocorrência dos carbonatos no minério, sendo favorável a explicação de sua presença nos concentrados.

No caso do complexo de Tapira nota-se que a identificação da apatita primária, juntamente com uma superfície geralmente lisa e límpida é importante para esclarecer o bom desempenho na flotação destas amostras na flotação.

Nos complexo Salitre e Tapira nota-se a presença de elevada de minerais micáceos que é sempre uma fonte potencial de problemas para a flotação.

Vale salientar que comparado ambos os complexos Tapira, apesar de possuir teores  $P_2O_5$  nas amostras de frente de lavra menores que as amostras de Salitre, esta por possuir características intrínsecas apresenta-se com uma melhor flotabilidade.

Fundamentado neste diagnóstico é possível identificar que há variações modais na composição de cada complexo (Tapira e Salitre), sendo assim necessária a escolha de reagentes de flotação mais apropriados. Esta escolha é de fundamental importância, pois permitirá uma melhora do concentrado produzido por meio de uma melhor recuperação da apatita.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se com trabalhos futuros a análise de amostras dos complexos Tapira e Salitre levando em consideração o grau de cristalização, o intemperismo e quantidade de apatitas secundárias.

Sugere-se, ainda, que seja realizada uma caracterização mineralógica em outros complexos que contenha representantes do grupo da apatita no território brasileiro. De porte destes dados juntamente com a localização, unidade geológica, características peculiares e se houver mineração no local levantar o planejamento do beneficiamento. De porte destes dados será possível elaborar um banco de dados comparativo, no qual, poderá ser verificado as influencias destes fatores frente à fotabilidade da apatita e uma discussão sobre o projeto que melhor se adéqua ao beneficiamento deste minério.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, S. M. & BRANDÃO, P. R. G. Os minerais micáceos do minério fosfático de Tapira. Parte I. Estudos com os minérios micáceos puros. Brasil Mineral, No. 175, p. 32-36, 1999.

ASSIS, S. M. de, VIANA, S. H. M. & SILVA, J. M. da. Calcitas, dolomitas e apatitas. Algumas características inerentes x microflotação. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Hidrometalurgia, 12, 1987, Rio de Janeiro, RJ. Anais...Rio de Janeiro, 1987, v.1, p. 265-80.

BARROS, L. A. F. de.. 2005. Caracterização tecnológica de minério fosfático de salitre Patrocínio – MG. Tese de Doutorado. CPGEM/UFMG. 483p.

BIONDI, J. C. Depósitos de minerais metálicos de filiação magmática. São Paulo: T. A. Queiroz, 1986. 602 p.

BORLAUG, N. E. Abril, 2004. A salvação da lavoura. Entrevista à Revista Veja (edição especial n.30, ano 37, Agronegócio), p.73-75.

BRANDÃO, P. R. G. Métodos de instrumentação e análise. Belo Horizonte: Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, 2013. (Notas de aula).

BRANDÃO, P. R. G., ARAUJO, A. C. de & PERES, A. E. C. Espectrofotometria infravermelha na investigação de espécies adsorvidas. In: Simpósio EPUSP de Caracterização Tecnológica na Engenharia e Indústria Mineral, 1990, São Paulo. Anais... São Paulo: coord. Técnica de H. Kahn, 1990. p. 211-230.

BRIGATTI, M. F., MEDICI, L., SACCANI, E. & VACCARO, C. Crystal chemistry and petrologic significance of Fe<sup>3+</sup>- rich phlogopite from the Tapira carbonatite complex, Brazil. American Mineralogist, v. 81, p. 913-927, 1996.

BROD, J. A., GIBSON, S. A., THOMPSON, R. N., JUNQUEIRA-BROD, T. C., SEER, H. J., MORAES, L. C. de & BOAVENTURA, G. R. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba igneous province (APIP) southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n°. 3, p. 404-408, 2000.

CHAKHMOURADIAN, A. R. & MITCHELL, R. H. Niobian ilmenite, hydroxyapatite and sulfatian monazite: alternative hosts for incompatible elements in calcite kimberlite from Internatsional'Naya, Yakutia. *The Canadian Mineralogist*, v. 37, p. 1177-1189, 1999.

CHULA, A. M. D.. 2004. Caracterização mineralógica de minério fosfático da Mina de Tapira. Tese de Doutorado. CPGEM/UFMG. 336p.

CRAIG, J. R. & VAUGHAN, D. J. *Ore microscopy & ore petrography*. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.

CRUZ, F. F. & CHENEY, T.M. Recursos de fosfato no complexo carbonatítico de Tapira, MG. In: Congr. Bras. Geol., 29, 1976, Ouro Preto. Anais... Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976, v.1. p. 89-107.

DANA, J. D. & DANA, E. S. *The system of mineralogy*. 7. Ed. New York: John Wiley & Sons, v. II, 1951. p. 877-889.

DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. *Minerais constituintes das rochas – uma introdução*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1981. 558.

FLEET, M. E. & PAN, Y. Site preference of rare earth elements in fluorapatite: binary (LREE + HREE) – substituted crystals. *American Mineralogist*, v. 82, p. 870-877, 1997.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de raios X. In: GOMES, C. B. *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda: Prominério, 1984. p. 1-43.

FROLOV, A. A. Vertical zonation in deposition of ore, as in ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites. *International Geology Review*, v. 13, n°. 5, p. 685-695, 1971.

HAGGERTY S.E. & MARIANO A.N. 1983. Strontian-loparite and strontio-chevkinite: two new minerals in reomorphic fenites from the Paraná Basin carbonatites, South America. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 84:365-381.

HASUI, Y. & CORDANI, U. G. Idades potássio-argônio de rochas eruptivas mesozóicas do oeste mineiro e sul de Goiás. In: *Congr. Bras. Geol.*, 22, 1968, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1968. p. 139-143.

HUGHES, J. M., CAMERON, M. & MARIANO, A. N. Rare-earth-element ordering and structural variations in natural rare-earth-bearing apatites. *American Mineralogist*, v. 76, p. 1165-1173, 1991.

KAHN, H. Caracterização mineralógica e tecnológica da jazida de fosfato do maciço alcalino de Anitápolis, SC. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1988. 219 p. (Dissertação, Mestrado em Mineralogia e Petrologia).

LAPIN, A. V., IWANUCH, W. & PLOSHKO, V. V. Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese. *Rev. Bras. Geociências*, São Paulo, v. 29, n° 4, p. 483-490, dezembro, 1999.

LENHARO, S. L. R. Caracterização mineralógica/tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfato. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994. 194 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).

MARIANO, A. N. The application of cathodoluminescence for carbonatite exploration and characterization. In: *Simpósio Internacional de Carbonatitos*, 1, 1976, Poços de Caldas, MG. *Anais...* Belo Horizonte: Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1978, p. 39-57.

MARIANO A.N. & MARCHETTO M. 1991. Serra Negra and Salitre carbonatite alkaline igneous complex. In: Leonardos O.H., Meyer H.O.A., Gaspar J.C. (eds.). In:

5th International Kimberlite Conference Araxá, Field Guide Book, CPRM, Special Publication 3/91, p. 75-79.

McClellan, G. H., Lehr, J. R. 1969. Cristal chemical investigation of Natural apatites. *The American Mineralogist*, vol. 54, p.1374-1391.

MITCHELL, R. H., XIONG, J., MARIANO, A. N. & FLEET, M. E. Rare-earth-element-activated cathodoluminescence in apatite. *The Canadian Mineralogist*, v. 35, p. 979-998, 1997.

PORPHÍRIO, N. H. & BARBOSA, M. I. M. Caracterização mineralógica de minérios. In: LUZ, A. B da, POSSA, M. V. & ALMEIDA, S. L. de. *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1998. p. 59-104.

RIBEIRO, C. C. Apatita. Relatório interno Ultrafértil, Maio, 2002, 28p.

RODRIGUES, A. J. & BRANDÃO, P. R. G. The influence of crystal chemistry properties on the floatability of apatites with sodium oleate. *Minerals Engineering*, v. 6, No. 6, p. 643-653, 1993.

RODRIGUES, A. J. Influência dos aspectos cristalquímicos na flotabilidade das apatitas. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 1992. 264 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

RODRIGUES, C. de S. & LIMA, P. R. A. S. Complexos carbonatíticos do Brasil: geologia. São Paulo: CBMM - Departamento de Geologia, 1984, p. 1-17.

Salum, M. J. G., Assis, S. M., Pinto, A. P., Araujo, M. A. C. Barros, L. A. F. 1990. Microflotação, constituição e potencial zeta de fases minerais de um fosfato alterado de Tapira-MG. In: XIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Salvador, Pad. 148-160.

SKOOG, D. A., HOLLER, F. J. & NIEMAN, T. A. *Principles instrumental analysis*. Orlando, Florida: Saunders College Publishing 1998. 849 p.

SLANSKY, M. Geology of sedimentary phosphates. Ed. Bureau de Recherches Geologiques et Minières. 1980, 210p.

TOLEDO, M. C. M., PEREIRA, V. P. 2001. Variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. Revista do Instituto Geológico, 22 (1/1), p.27-64.