

Mineração

Caracterização tecnológica dos tipos de minério de fosfato do Complexo Alcalino de Salitre, MG - Área Fosfertil

(Technological characterization of phosphate ore types from the Salitre Alkaline Complex, MG - Fosfertil Area)

Resumo

São apresentados os resultados de caracterização tecnológica de seis tipos de minério fosfático provenientes do Complexo de Salitre, tendo em vista definir a composição mineralógica das amostras e as características inerentes à apatita e ao minério relevantes para o beneficiamento mineral. Os teores de P_2O_5 variam de 9 a 25% e a proporção de finos (-0,020 mm) situa-se entre 20 e 34% em massa com perdas associadas de 17 a 22% do total de P_2O_5 presente. As amostras são compostas, essencialmente, por apatita, oxi-hidróxidos de ferro, ilmenita, argilominerais, carbonatos, quartzo, piroxênio, perovskita, alumino-fosfatos e outros minerais acessórios, variando apenas suas proporções relativas. Verificou-se que a apatita ocorre, predominantemente, liberada já abaixo de 0,21 mm, com superfície límpida a fracamente impregnada por oxi-hidróxidos de ferro; a parcela altamente impregnada (não flotável) varia de 6 a 9%. Do total de fósforo contido nas amostras, mais de 97% ocorre sob a forma de apatita (acima de 0,020 mm) e a recuperação potencial estimada de P_2O_5 na etapa de flotação é superior a 90% (recuperação global estimada entre 71-76%).

Palavras-chave: Apatita, minério de fosfato, caracterização tecnológica.

Abstract

The present study was carried out on six different ore types from the Salitre Alkaline Complex aiming to determine their mineralogical composition and the major features that are relevant in the mineral processing. The P_2O_5 grades vary from 9 to 25%. The slime content (-0,020 mm) varies between 20 and 34% (w/w) and carries 17-22% of the P_2O_5 content. The samples essentially consist of apatite, iron oxi-hydroxides, ilmenite, clayminerals, carbonate, quartz, pyroxene, perovskite, secondary phosphates and other minor accessory minerals. Below 0.21 mm, apatite essentially occurs in free particles showing a clean surface or a weak coating of iron oxi-hydroxides; the highly covered apatite (not recoverable by flotation) varies from 6 to 9%. In the deslimed fraction (above 0.020 mm) more

Daniel Uliana

Mestrando do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Escola Politécnica da USP
E-mail: daniel.uliana@poli.usp.br

Henrique Kahn

Prof. Dr. da Escola Politécnica da USP
- Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
E-mail: henrique.kahn@poli.usp.br

André Borges Braz

Doutorando do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Escola Politécnica da USP
E-mail: andre.braz@poli.usp.br

than 97% of the total phosphor content occurs as apatite; the estimated P_2O_5 potential recovery in flotation concentration is over 90% (71-76% overall recovery).

Keywords: Apatite, phosphate ore, process mineralogy.

1. Introdução

Os principais depósitos brasileiros de fosfato estão associados a complexos alcalino-carbonatíticos e, em geral, estão relacionados a processos de alteração intempérica (Altschuler, 1973; Toledo et al., 1999), como é o caso do Complexo de Salitre. Além de baixo teor, quando comparados aos depósitos de origem sedimentar (fosforitos marinhos), apresentam uma complexidade mineralógica acentuada (Amaral, 1997; Kahn, 1999; Kahn et al., 2008), tornando-se indispensável a caracterização geológica e tecnológica do minério, desde a fase de pesquisa até a fase do acompanhamento das operações de lavra (Sant'Agostino & Kahn, 1997).

O Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre, localizado no município de Patrocínio, 70 km a norte de Araxá - MG, conhecido desde a década de 70 (Barbosa et al., 1970), conta com importantes recursos de P, os quais vêm sendo rea-

validados nos últimos anos para a implantação de dois distintos empreendimentos mineiros. Nesse complexo, as rochas presentes estão relacionadas a eventos intrusivos de pequena profundidade e com natureza ultrabásica, podendo-se citar a presença de mica-peridotitos, piroxenitos e carbonatitos, com tipos transicionais entre estes. Tem-se, ainda, a presença de coberturas lateríticas, nas quais ocorrem mineralizações de fosfato, titânio e nióbio (Melo & Chaban, 1997).

Análises de testemunhos de sondagens permitiram identificar, inicialmente, um conjunto de seis tipos distintos de minério, os quais foram objeto dos estudos de caracterização ora apresentados. As amostras estudadas são referentes a composições de testemunhos de sondagens realizadas na porção centro-norte do complexo, em uma área sob concessão da Fosfertil - Fertilizantes Fosfatados S.A.

2. Materiais e métodos

Foram estudadas seis amostras compostas identificadas por Apatitito, Foscorito Intemperizado, Foscorito Silicificado, Zona de Mistura, Piroxenito e Piroxenito Intemperizado.

Os procedimentos de caracterização desenvolvidos são descritos a seguir e apresentados na Figura 1.

- Cominuição de todo o material abaixo de 0,60 mm (28 malhas Tyler) em moinho de rolos - circuito fechado.
- Homogeneização e amostragem através de pilhas alongadas ou amostrador Jones, para retirada de alíquotas representativas destinadas aos ensaios de caracterização.
- Cominuição em moinho de bolas de modo a obter cerca de 7% de material retido em 0,21 mm.
- Análise granulométrica do produto da moagem, através de peneiramento a úmido em peneiras com aberturas de 0,21 mm, 0,15 mm, 0,074 mm, 0,037 mm e 0,020 mm.
- Separações minerais por líquido denso (tetrabrometano - TBE; $2,95 \text{ g/cm}^3$) e separador magnético Frantz (modelo de barreira) nos produtos pesados obtidos, empregando-se duas intensidades distintas (frações +0,020 mm). Desta forma, obtiveram-se os produtos: flutuado ($\delta < 2,95 \text{ g/cm}^3$), afundado magnético (+0,0 A ou 1 kGauss), afundado fracamente magnético (+0,3 A ou 4 kGauss) e afundado não magnético (-0,3 A).
- Análises químicas com determinações de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, K_2O , TiO_2 e BaO foram efetuadas através da técnica de fluorescência de raios X (FRX - pérolas fundidas) para todos os produtos obtidos, além de perda ao fogo.

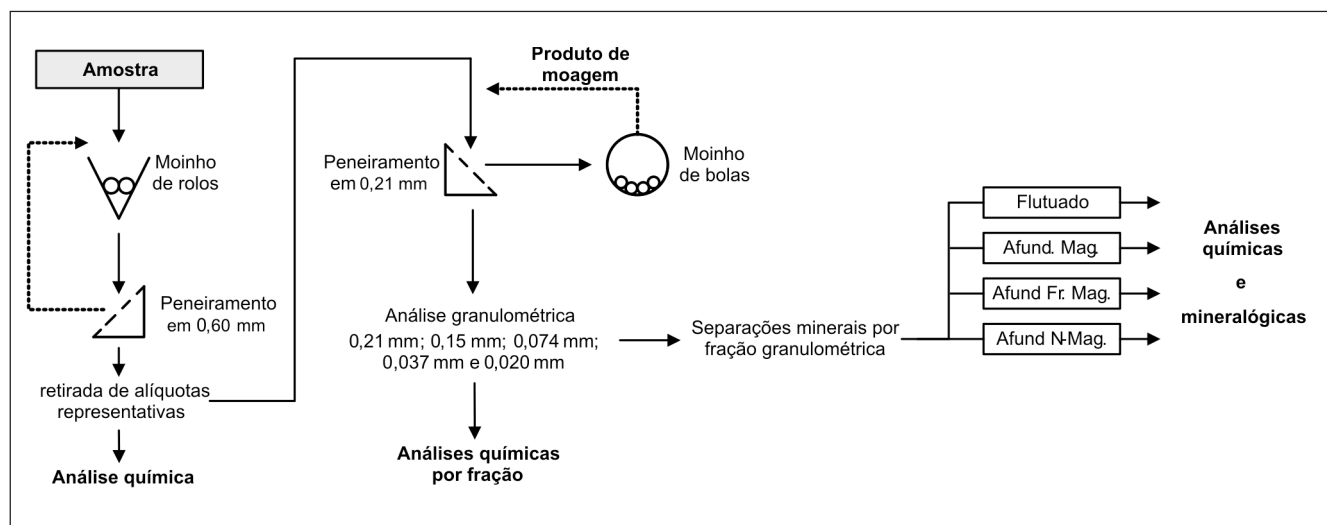


Figura 1 - Fluxograma do procedimento experimental.

- Análises mineralógicas por difratometria de raios X e microscopia óptica por luz transmitida (MO) e microscopia eletrônica de varredura com microanálise acoplada (MEV/EDS), enfocando a forma de ocorrência da apatita e suas associações com os minerais de ganga.
- Quantificação mineralógica das amostras estudadas através da interação dos resultados obtidos.
- Determinação da partição do fósforo entre a apatita e fosfatos secundários (quando existentes).

3. Resultados

3.1 Composição química das amostras

As análises químicas das seis amostras estudadas são apresentadas na Tabela 1.

Das amostras estudadas, o Apatitito mostra o maior teor de P_2O_5 (25,2%) e os mais baixos de SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 .

Em relação aos Foscoritos, o Intemperizado tem os mais altos teores de Fe_2O_3 (41,0%), P_2O_5 (16,0%) e BaO (1,2%); o Silicificado, por sua vez, apresenta teores mais elevados de SiO_2 (19,5%) e MgO (5,0%) e teor de P_2O_5 de 13,5%.

O Piroxenito apresenta o mais baixo teor de P_2O_5 (9,0%) e os maiores teores de SiO_2 (24,1%), MgO (11,1%) e CaO (19,6). Já o Piroxenito Intemperizado apresenta teores mais elevados de Fe_2O_3 (28,6%), TiO_2 (8,5%), Al_2O_3 (4,6%) e BaO (1,1%), com teor de P_2O_5 de 11,7%.

A Zona de Mistura corresponde a uma zona mista na área mineralizada e apresenta teor de P_2O_5 de 14,7%.

3.2 Distribuição de massa e teores por fração granulométrica

As distribuições de massa e dos teores de P_2O_5 , SiO_2 e Fe_2O_3 , por fração granulométrica são apresentadas graficamente na forma de curvas acumuladas na Figura 2.

As amostras apresentam comportamento muito semelhante, notadamente quanto às distribuições em massa e de P_2O_5 e SiO_2 . Em média, cerca de 90 a 95% em massa e do conteúdo desses óxidos, bem como do Fe_2O_3 , estão abaixo de 0,21 mm.

As proporções em massa de lamelas (-0,020 mm) são de 20% no Apatitito e 24% no Foscorito Intemperizado, chegando a 30-34% nas demais amostras, sendo que a parcela de P_2O_5 associada às referidas amostras representa de 17 a 22% do total de P contido.

3.3 Composição mineralógica e características da apatita

As amostras estudadas apresentam basicamente a mesma assembléia mineralógica, variando apenas suas proporções relativas. São compostas por apatita, oxi-hidróxidos de ferro (magnetita, hematita e goethita), ilmenita, argilominerais (vermiculita, micas interestratificadas e ilita), quartzo, carbonatos (calcita e/ou dolomita), além de barita e outros minerais menores como acessórios (zirconolita, calzirtita, badeleíta e niobatos).

O Apatitito é a amostra com maior conteúdo em apatita (62%) e o Piroxenito, a mais pobre (24%); nas demais amostras, essas proporções situam-se entre 33 e 41%.

Nos ensaios de separações minerais, a apatita concentra-se, preferencialmente, no produto afundado não magnético, na forma de partículas liberadas e com a superfície límpida ou ligeiramente recoberta por películas de oxi-hidróxidos de ferro. Secundariamente, a apatita pode ocorrer na forma mista, principalmente com magnetita, ilmenita e piroxênio ou com a superfície altamente impregnada, fato este que interfere no seu comportamento na separação magnética. Como pode ser observado nas fotomicrografias obtidas ao MEV (Figura 3a/3b), é característica a ocorrência de apatita primária em núcleos preservados, ci-

Tabela 1 - Composição química das amostras estudadas.

Amostra	Teores (% em peso)									CaO/ P_2O_5
	P_2O_5	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO	PF	P_2O_5
Apatitito	25,2	33,3	1,73	0,81	27,2	1,36	1,45	0,96	3,19	1,32
Fosc. Intemp.	16,0	19,8	3,79	2,44	41,0	2,86	4,10	1,18	4,06	1,24
Fosc. Silic.	13,5	20,7	19,5	2,85	23,2	5,00	5,48	0,83	6,30	1,53
Zona de Mist.	14,7	21,3	13,2	3,33	26,9	3,48	6,35	0,92	6,91	1,44
Pirox. Intemp.	11,7	14,6	21,7	4,58	28,6	1,41	8,45	1,06	5,82	1,25
Piroxenito	9,0	19,6	24,1	2,57	18,2	11,10	5,28	0,68	8,56	2,18

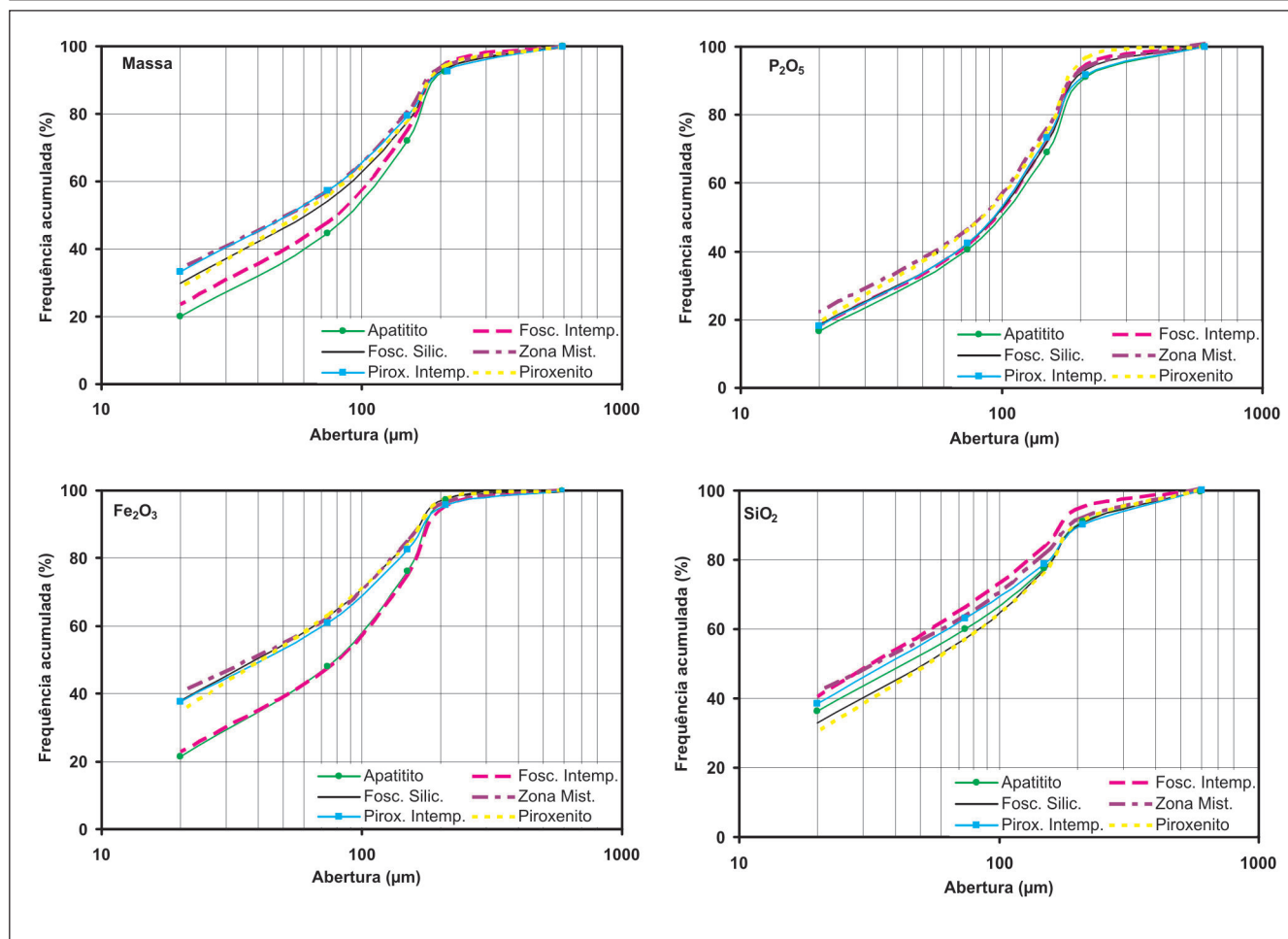


Figura 2 - Curvas acumuladas de distribuições em massa e dos principais óxidos para os produtos de moagem (-0,21 mm).

mentados por apatita secundária. Estudos recentes sobre essas duas formas de ocorrência da apatita no Complexo de Salitre foram realizados por Braz et al. (2004), através de microscopias óptica e eletrônica aliadas à técnica de catodoluminescência para distinção dessas duas fases.

A Figura 3, relativa a fotomicrografias obtidas ao MEV/EDS, apresenta algumas das principais formas de ocorrência da apatita e suas associações com os minerais de ganga.

Na Figura 4, relativa a fotomicrografias obtidas ao MO dos produtos afundados não magnéticos, são mostrados os diferentes graus de recobrimento superficial da apatita por películas de oxihidróxidos de ferro, além de sua rugosidade. Kahn (1999) discute estes e ou-

tros fatores como seletividade entre apatita e outros minerais portadores de cátions de elementos alcalino-terrosos e presença de fosfatos secundários, fatores estes que podem contribuir em eventuais quedas na recuperação da apatita na etapa de flotação.

Os fosfatos secundários, presentes nas amostras Apatitito, Foscorito Intemperizado e Piroxenito Intemperizado, ocorrem, principalmente, abaixo de 0,21 mm, com tendência a aumentar nas frações finas, e, nos ensaios de separações minerais, tendem a concentrar-se no produto afundado fracamente magnético. Para o Apatitito, 99% do total de P₂O₅ estão contidos na forma de apatita. Já para o Piroxenito Intemperizado e Foscorito Intemperizado, esses valores correspondem a 99 e 97%, respectivamente.

4. Discussão

As principais características das amostras estudadas são apresentadas comparativamente na Tabela 2.

Observa-se que o Apatitito apresenta teor de P₂O₅ total mais elevado (25,2%), com relação CaO/P₂O₅ de 1,32, enquanto que o Piroxenito, o mais baixo (9%). Essa amostra, por sua vez, mostra a maior relação CaO/P₂O₅ (2,18), enquanto que o Foscorito Intemperizado apresenta a mais baixa (1,24).

As amostras apresentam, basicamente, a mesma composição mineralógica, variando apenas a proporção relativa dos minerais presentes. Todas as amostras são constituídas por apatita, oxihidróxidos de ferro, ilmenita, argilominerais, quartzo, carbonatos, barita e

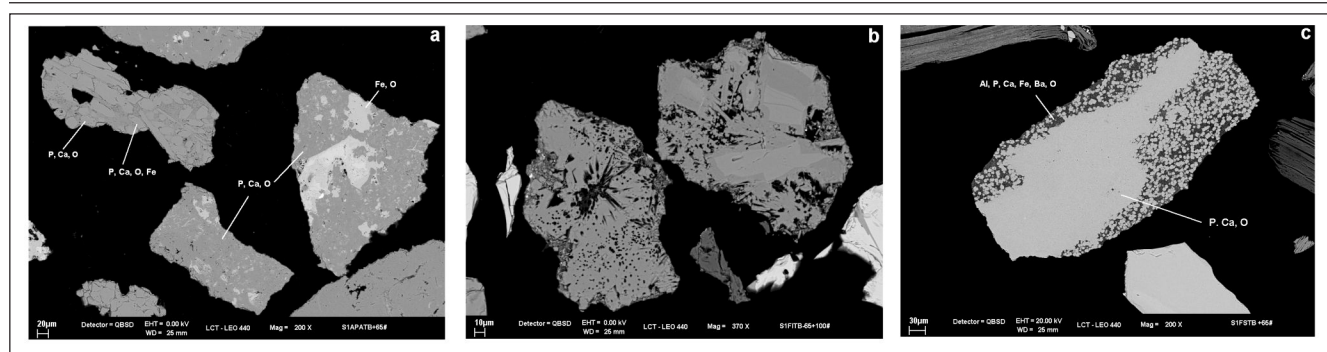


Figura 3 - (a) Apatitito, -0,30 +0,21 mm: apatita livre, com núcleos preservados de apatita primária, ou associada a oxi-hidróxidos de ferro. (b) Foscorito Intemperizado, -0,21+0,15 mm: apatita secundária porosa, com hábito acicular e núcleos preservados de apatita primária. (c) Foscorito Silicificado, -0,30+0,21 mm: apatita envolta por agregado de alumino-fosfatos microcristalinos.

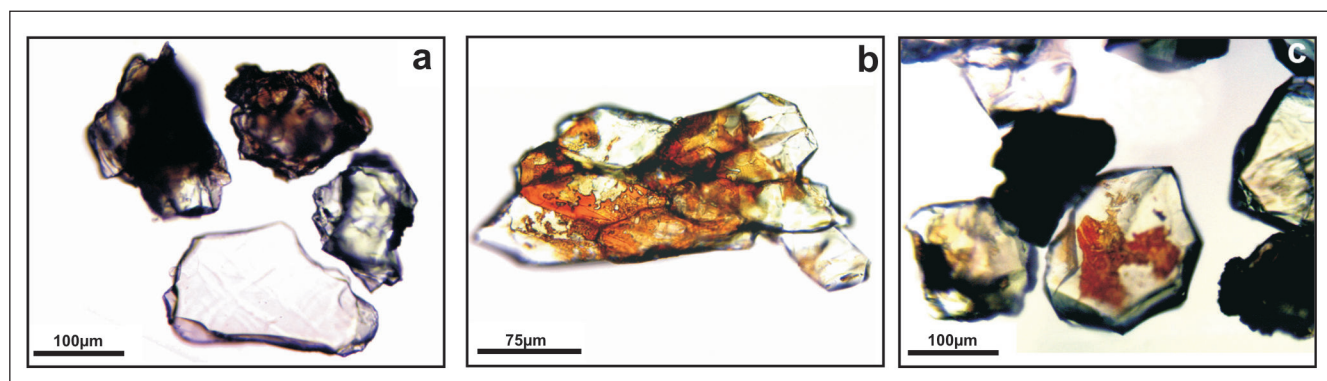


Figura 4 - (a) Foscorito Silicificado: apatita com superfície lisa e limpa e rugosa e fortemente impregnada. (b) Foscorito Silicificado: agregado de apatita parcialmente recoberto por película de oxi-hidróxidos de ferro. (c) Piroxênio Intemperizado: apatita parcialmente recoberta por películas de oxi-hidróxidos de ferro.

outros minerais acessórios, que representam cerca de 1% nas amostras Foscorito Intemperizado e Piroxênio e traços nas demais. Piroxênio ocorre somente no Foscorito (7%) e no Piroxênio (20%) e anatásio apenas no Piroxênio Intemperizado (3%). Barita está presente em todas as amostras em proporções da ordem de 1%, à exceção do Foscorito Silicificado, onde representa traço. Alumino-fosfatos secundários representam 2% no Foscorito Intemperizado e traços no Piroxênio Intemperizado e no Apatitito. Perovskita constitui entre 3 e 5% nas amostras Foscorito Silicificado, Piroxênio e Zona de Mistura e traço no Foscorito Intemperizado.

Os menores conteúdos de apatita são observados no Piroxênio (~24%) e no Piroxênio Intemperizado (~33%); o maior conteúdo é encontrado no Apatitito (62%), enquanto que nas demais este se situa entre 37 e 41%. A apatita ocorre, normalmente, na forma liberada, apresentando superfície límpida à fracamente

impregnada por oxi-hidróxidos de ferro. A parcela altamente impregnada (não flável) nas amostras Foscorito Silicificado, Piroxênio Intemperizado e Piroxênio é da ordem de 6%; já nas amostras Apatitito, Foscorito Intemperizado e Zona de Mistura situa-se por volta de 8 a 9%. A recuperação potencial estimada de apatita na etapa de concentração por flotação está compreendida entre 90 e 93% para todas as amostras (recuperação global superior a 74%, exceto para a Zona de Mistura, onde corresponde a 71%).

As lamas, correspondentes à fração -0,020 mm, representam 20% no Apatitito, 24% no Foscorito Intemperizado e de 29 a 34% nas demais amostras. Os conteúdos de P_2O_5 associados a essa fração são de 17 a 19% para todas as amostras, à exceção da Zona de Mistura, onde atinge 22%. Os fosfatos secundários (principalmente goeicita e/ou goiazita) foram observados no Apatitito e no Foscorito Intemperizado como traços, atingindo cerca de 2% em massa apenas no Piroxênio Intemperizado.

5. Conclusões

Considerando-se a assembléia mineralógica das amostras estudadas e as características da apatita presente nas mesmas, não são esperados maiores problemas em termos de concentração da apatita por flotação. No entanto, deve ser avaliada a seletividade na flotação entre a apatita e outros minerais portadores de cálcio, tais como a perovskita e carbonatos nas amostras Foscorito Silicificado, Zona de Mistura e Piroxênio e, em menor proporção, nas amostras Apatitito e Piroxênio Intemperizado. Outro parâmetro a ser considerado refere-se à impregnação superficial da apatita por oxi-hidróxidos de ferro nas amostras Apatitito, Foscorito Intemperizado e Zona de Mistura, implicando, eventualmente, a necessidade de uma etapa prévia de atrição de forma a minimizar perdas de fósforo na flotação.

Tabela 2 - Comparação entre as principais características das amostras estudadas.

Amostras		Apat.	Fosc. Intemp.	Fosc. Silic.	Zona Mist.	Pirox. Intemp.	Pirox.
Composição química (% em massa; teores dosados)	P ₂ O ₅	25,2	16,0	13,5	14,7	11,7	9,0
	CaO	33,3	19,8	20,7	21,3	14,6	19,6
	SiO ₂	1,73	3,79	19,5	13,2	21,7	24,1
	Al ₂ O ₃	0,81	2,44	2,85	3,33	4,58	2,57
	Fe ₂ O ₃	27,2	41,0	23,2	26,9	28,6	18,2
	MgO	1,36	2,86	5,0	3,48	1,41	11,1
	CaO/P ₂ O ₅	1,32	1,24	1,53	1,44	1,25	2,18
Parcela de fósforo apatítico	Acima de 0,020 mm (%)	99	97	100	100	99	100
Composição mineralógica estimada (% em massa; acima de 0,020 mm)	Apatita	62	40	37	41	33	24
	Fosfatos secundários	1	2	-	-	0,5	-
	Quartzo	1	1	11	9	17	5
	Carbonatos	1	tr	3	9	2	5
	Argilominerais	5	8	14	7	9	25
	Piroxênio	-	-	7	-	-	20
	Barita	1	1	1	1	1	1
	Oxi-hidróxidos de ferro	6	6	3	6	10	tr
	Magnetita	20	33	12	13	11	9
	Ilmenita	3	8	8	9	14	5
	Anatásio	-	-	-	-	3	-
	Perovskita	-	tr	3	5	-	4
	Outros	tr	1	tr	tr	0,4	1
Características da apatita para concentração por flotação (-0,21 +0,020 mm)	Malha de liberação	-0,21mm	-0,21mm	-0,21mm	-0,21mm	-0,21mm	-0,21mm
	Apatita impregnada (%)	9	10	5	8	6	4
	Recup. potencial na flotação (%)	91	90	93	91	92	94
	Finos (-0,020 mm) (% massa)	20	24	30	34	33	29
	Perdas de P ₂ O ₅ nos finos (%)	17	18	18	22	18	19

Nota: tr < 0,5%.

6. Agradecimentos

À FOSFERTIL - Fertilizantes Fosfatados S.A. por possibilitar a realização desse trabalho.

7. Referências bibliográficas

- ALTSCHULER, Z. S. The weathering of phosphate deposits - geochemical and environmental aspects. In: GRIFFITH, E. J., BEETON, A., SPENCER, J. M., MITCHELL, D. T., eds., *Environmental Phosphorus Handbook*. New York: John Wiley & Sons, 1973. cap. 3, p. 33-95. 715 p.
- AMARAL, A. J. R. Geologia do fosfato. *Principais depósitos minerais do Brasil*. In: SCHOBENHAUS, C., QUEIROZ, E. T., COELHO, C. E. S. (Ed.). Brasília: DNPM/CPRM, 1997. v. 14, Parte C, cap. 1. 634 p.
- BARBOSA, O. et al. *Geologia da região do triângulo mineiro*. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 1970. 140 p. (Boletim 136).
- BRAZ, A. B. et al. Caracterização da apatita primária e secundária de Salitre, MG. In: *Semana Ibero-Americana de Engenharia de Minas*, São Paulo, 2004. v. 1, p. 21-25.
- KAHN, H. *Caracterização de matérias-primas minerais associadas a complexos alcalino-carbonatíficos*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1999. 216 p. (Tese de Livre Docência).
- KAHN, H. et al. Apatite from alkaline complexes - geological aspects, behavior in mineral processing and characterization techniques. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR APPLIED MINERALOGY (ICAM), 9. *Proceedings...* Brisbane, 2008. p. 507-514.
- MELO, M. T. V., CHABAN, N. Depósitos de fosfato, titânio e nióbio de Salitre, Minas Gerais. In: *Principais depósitos minerais do Brasil*. DNPM (Ed.), Brasília: 1997. v. 4-C, cap. 5.
- SANT'AGOSTINO, L. M., KAHN, H. Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. BT/PMI/069, São Paulo: 1997. 29 p.
- TOLEDO, M. C. M. et al. Lateritic weathering effects over phosphatic Brazilian ores: Catalão and Juquiá (Brasil). In: INTERNATIONAL GEOCHEMICAL EXPLORATION SYMPOSIUM, 19. *Proceedings...* Vancouver: 1999. Abstracts volume, p. 142-143.

Artigo recebido em 17/10/2008 e aprovado em 24/08/2009.