

MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO DEPÓSITO DE TERRAS
RARAS DE CATALÃO I, GO.**

ÁREAS: CÓRREGO DO GARIMPO E LAGOA SECA

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Doutor em Engenharia.

SÃO PAULO

2001

MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO DEPÓSITO DE TERRAS
RARAS DE CATALÃO I, GO.**

ÁREAS: CÓRREGO DO GARIMPO E LAGOA SECA

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

SÃO PAULO

2001



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
TERMO DE JULGAMENTO
DE
DEFESA DE TESE DE DOUTORADO**

Aos 16 dias do mês de julho de 2001, às 14:00 horas, no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores Doutores Henrique Kahn, orientador(a) do(a) candidato(a), Paulo Roberto Gomes Brandão, Lilia Mascarenhas Sant'Agostino, Helmut Born e Eldon Azevedo Masini iniciou-se a Defesa de Tese de Doutorado do(a) Sr(a). **MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI.**

Título da Dissertação: "CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO DEPÓSITO DE TERRAS RARAS DE CATALÃO I, GO. ÁREAS: CÓRREGO DO GARIMPO E LAGOA SECA".

Concluída a argüição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado o(a) candidato(a):

Prof.Dr. Henrique Kahn.....(*APROVADO*)
 Prof.Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão.....(*APROVADO*)
 Prof.Dr. Lilia Mascarenhas Sant'Agostino.....(*APROVADA*)
 Prof.Dr. Helmut Born.....(*Aprovado*)
 Prof.Dr. Eldon Azevedo Masini.....(*APROVADO*)

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pela Secretária de Pós-Graduação.

São Paulo, 16 de julho de 2001.

A COMISSÃO JULGADORA

Henrique Kahn

Paulo Roberto Gomes Brandão

Lilia Mascarenhas Sant'Agostino

Helmut Born

Secretária: Mara Fatima J. Luz Sanches

Obs: Resolução 4476, de 17.09.1997 Altera dispositivos do Regimento Geral da USP Art.109 - Imediatamente após o encerramento da argüição da dissertação ou da tese cada examinador expressará seu julgamento em sessão secreta, considerando o candidato aprovado ou reprovado.

Homologado pela C.P.G. em reunião realizada 20/08/01.

*Para Colombo,
Fernanda, Juliana e Daniela,
pelo apoio e compreensão demonstrados.*

991 12
21228
61222

*Ao Prof. Dr. Henrique Kahn,
por proporcionar a continuidade da minha atuação
na área de Caracterização Tecnológica.*

AGRADECIMENTOS

A autora expressa os seus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que direta ou indiretamente colaboraram para a execução deste trabalho.

Ao Grupo Fertifos, por permitir a utilização dos resultados experimentais obtidos nos estudos de caracterização tecnológica para a elaboração desta tese. Em especial, meus agradecimentos ao engenheiro Luiz Antonio Fonseca de Barros, que soube entender o interesse acadêmico e a importância de sua publicação e discussão e que sempre acreditou na relevância dos estudos relativos à caracterização tecnológica, sendo seu defensor ferrenho. Ao geólogo Carlos Cordeiro Ribeiro, por todo o apoio logístico, discussões durante as viagens de campo e pela cessão de fotografias e mapas.

À INB - Indústrias Nucleares do Brasil S.A., em particular aos químicos Valter José Gomes Mortagua e Walter Scassiotti Filho, pelos ensaios de abertura química da monazita e ao Dr. Simon Rosenthal, pelos artigos técnicos referentes ao seu tratamento químico.

Ao Prof. Dr. Henrique Kahn pelo constante apoio, idéias e sugestões sempre bem vindas e que em muito contribuíram não só para a elaboração deste trabalho, como também para a minha formação e aprimoramento profissionais.

À Profa. Dra. Lilia M. Sant'Agostino, a quem devo a minha iniciação na especialidade de caracterização tecnológica, por toda a sua paciência e confiança em mim depositadas ao longo dos anos em que trabalhamos juntas, bem como pela sua colaboração e valiosas sugestões neste trabalho específico.

À equipe técnica do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP (LCT), envolvida na execução deste trabalho, em particular aos técnicos Jailson Cardoso e Juscelino Santana Rocha e à química Giuliana Ratti, além de todos os estagiários. Agradeço ainda ao Dr. Roberto H. Sameshima e às MSc. Sandra G. Gabas e Gabriela C. Fronzaglia, à geóloga Eliana Satiko Mano e à secretária Ilda M. Sarraipa, pelo apoio e auxílio na execução do trabalho.

À bibliotecária Maria Cristina Martinez Bonesio, pelo auxílio na organização das referências bibliográficas.

Às agências de fomento FINEP, através do Programa PADCT-GTM, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, à FAPESP através de projetos de infra-estrutura laboratorial e ao CNPq, pela bolsa de doutorado a mim concedida.

À minha família, pelo incentivo e apoio para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	página
Lista de tabelas	viii
Lista de figuras	xi
Lista de fotos	xiii
Resumo	xv
“Abstract”	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. MINERAIS DE TERRAS RARAS	6
3.1.1 Os fosfatos de terras raras	9
3.1.2 A monazita, (Ce, La, Y, Th) PO ₄	9
3.1.3 A rabdofanita, (CePO ₄ .H ₂ O)	11
3.2. OS CARBONATITOS E AS TERRAS RARAS	11
3.2.1 Carbonatitos tardios	12
3.2.2 Carbonatitos extrusivos	13
3.2.3 Formação dos minerais de terras raras nos carbonatitos	13
3.3. COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS DE TERRAS RARAS NO INTEMPERISMO	14
3.4. MINERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS	16
3.4.1 Bastnaesita	17
3.4.2 Argilas com íons de ETR adsorvidos	17
3.4.3 Monazita	18
3.4.4 Xenotima	20
3.4.5 Apatita	21
3.4.6 Outras fontes	21
3.5. ASPECTOS ECONÔMICOS	21
3.5.1 Depósitos de terras raras no Brasil	25
3.6. PERFIL DA INDÚSTRIA CONSUMIDORA	29
3.7. USOS	31
3.8. PRODUÇÃO E DEMANDA	32

3.9.	PREÇOS.....	33
3.10.	O COMPLEXO ALCALINO DE CATALÃO.....	33
3.10.1	Localização e acessos.....	33
3.10.2	Geologia do complexo alcalino de Catalão I.....	35
3.10.3	Estudos de caracterização mineralógica efetuados anteriormente.....	41
4.	ÁREAS ESTUDADAS	45
4.1.	O DEPÓSITO DE TERRAS RARAS DO CÓRREGO DO GARIMPO	45
4.1.1	Histórico	45
4.1.2	A monazita de Catalão I.....	53
4.1.3	Estudos de caracterização e de desenvolvimento de processos realizados	55
4.2.	DEPÓSITO DA LAGOA SECA	60
5.	METODOLOGIA DE TRABALHO E ETAPAS DESENVOLVIDAS.....	62
5.1.	CÓRREGO DO GARIMPO	62
5.1.1	Primeira etapa de trabalhos - Caracterização e desenvolvimento de processo.....	62
5.1.2	Segunda etapa - Caracterização do depósito do Córrego do Garimpo	71
5.1.3	Estudos complementares	73
5.2.	ESTUDOS PRELIMINARES EM AMOSTRAS DO DEPÓSITO DA LAGOA SECA.....	75
5.2.1	Procedimento experimental	76
6.	RESULTADOS OBTIDOS PARA O DEPÓSITO DO CÓRREGO DO GARIMPO... 79	
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE SAPROLITO - CÓRREGO DO GARIMPO.....	79
6.1.1	Composição química das alíquotas estudadas	79
6.1.2	Análise granulométrica	79
6.1.3	Separações magnéticas em separador Frantz.....	82
6.1.4	Separações minerais em líquidos densos e em separador Frantz	85
6.1.5	Composição mineralógica e características da monazita	89
6.1.6	Conclusões da caracterização da amostra saprolito.....	97
6.2.	ESTUDO DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO - AMOSTRA SAPROLITO, ALÍQUOTA 2... 97	
6.2.1	Resultados da preparação de amostras (definição das condições de atrição).....	97
6.2.2	Ensaio de atrição e deslamagem.....	100
6.2.3	Considerações sobre o procedimento empregado e características dos produtos passíveis de serem obtidos	103
6.2.4	Separações magnéticas a úmido	104
6.3.	CONCLUSÕES DOS ESTUDOS EFETUADOS PARA O SAPROLITO.....	105
6.3.1	Caracterização do material saprolítico	105
6.3.2	Estudos de desenvolvimento de processos para o material saprolítico.....	105

6.4.	ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO E PROCESSAMENTO DA AMOSTRA TR 02 - CÓRREGO DO GARIMPO	106
6.4.1	Composição química	106
6.4.2	Análise granulométrica	107
6.4.3	Moagem e atrição após remoção dos finos naturais (-0,020 mm) - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo).....	108
6.4.4	Separações magnéticas dos finos naturais (-0,020 mm)	108
6.4.5	Estimativa da composição mineralógica da amostra TR 02 - Córrego do Garimpo .	109
6.4.6	Conclusões	110
6.5.	CARACTERIZAÇÃO DO DEPÓSITO DO CÓRREGO DO GARIMPO	111
6.5.1	Tipologia preliminar do depósito	111
6.5.2	Ensaio padrão (estágios sucessivos de atrição e deslamagem) nas amostras compostas - Córrego do Garimpo	117
6.5.3	Ensaio de tratamento químico da monazita.....	120
6.6.	ESTUDOS COMPLEMENTARES EFETUADOS EM AMOSTRAS DA TRINCHEIRA ABERTA NO CÓRREGO DO GARIMPO (ARGILA FERRUGINOSA E SILEXITO).....	123
6.6.1	Argila ferruginosa.....	123
6.6.2	Silexito.....	123
6.6.3	Comparação entre as amostras volumétricas estudadas	124
7.	RESULTADOS PRELIMINARES OBTIDOS PARA AMOSTRAS DO DEPÓSITO DA LAGOA SECA.....	126
7.1.	AMOSTRA TR 01	126
7.1.1	Composição Química.....	126
7.1.2	Análise granulométrica	127
7.1.3	Moagem e atrição	128
7.1.4	Separações minerais	130
7.1.5	Estimativa da composição mineralógica da amostra TR 01 - Lagoa Seca	132
7.1.6	Características da monazita e partição dos ETR	134
7.1.7	Ensaio padrão na amostra TR 01 (Lagoa Seca)	137
7.1.8	Conclusões	137
7.2.	AMOSTRAS VOLUMÉTRICAS DA REGIÃO DA LAGOA SECA.....	138
7.2.1	Composição química	138
7.2.2	Ensaio padrão.....	138
7.2.3	Características da monazita	140
8.	CONCLUSÕES.....	144
8.1.	CÓRREGO DO GARIMPO	144

8.2. LAGOA SECA	147
9. LISTA DE REFERÊNCIAS	149

Lista de tabelas

	página
Tabela 1 - Minerais formadores de depósitos de terras raras.....	8
Tabela 2 - Alguns dos principais minerais portadores de terras raras	8
Tabela 3 - Reservas mundiais de terras raras, 1998 (Mt OTR)	24
Tabela 4 - Quadro das reservas do material mineralizado à terras raras - Córrego do Garimpo	46
Tabela 5 - Estimativa de reservas para o material saprolítico - Córrego do Garimpo	51
Tabela 6 - Composição química das amostras estudadas	79
Tabela 7 - Distribuição de teores por fração granulométrica - Amostra saprolito.....	80
Tabela 8 - Distribuição de teores nos produtos de separação magnética - Amostra saprolito ..	83
Tabela 9 - Distribuição de teores nos produtos de separação por líquidos densos - Amostra saprolito	85
Tabela 10 - Sumário dos resultados de separação em líquidos densos (+ 0,020 mm) - Amostra saprolito	87
Tabela 11 - Distribuição de teores nos produtos de separação magnética efetuada nos produtos afundados - Amostra saprolito.....	87
Tabela 12 - Sumário dos resultados de separação magnética efetuada no produto afundado (fração total + 0,037mm) - Amostra saprolito.....	89
Tabela 13 - Composição mineralógica estimada da amostra saprolito	90
Tabela 14 - Resultados da etapa de preparação de amostras - Amostra saprolito.....	98
Tabela 15 - Distribuição de teores nos produtos gerados nos ensaios de atrição e deslamagem - Amostra saprolito.....	102
Tabela 16 - Características dos produtos passíveis de serem obtidos - Amostra saprolito.....	103
Tabela 17 - Sumário dos resultados de separação magnética - Amostra saprolito.....	104
Tabela 18 - Características dos produtos finais passíveis de serem obtidos por separação magnética - Amostra saprolito.....	105
Tabela 19 - Produtos obtidos por desagregação seletiva e deslamagem - Amostra saprolito	106
Tabela 20 - Composição química da amostra TR 02 - Córrego do Garimpo	106

Tabela 21 - Distribuição de teores por fração granulométrica - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo).....	107
Tabela 22 - Distribuição de teores por fração nos produtos de atrição após remoção dos finos naturais - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo)	108
Tabela 23 - Distribuição de teores nos produtos de separação magnética a úmido para a fração -0,020 mm - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo).....	109
Tabela 24 - Estimativa da composição mineralógica da amostra TR 02 - Córrego do Garimpo	110
Tabela 25 - Distribuição dos tipos de materiais - Córrego do Garimpo	116
Tabela 26 - Teores iniciais obtidos nas amostras compostas, por tipo - Córrego do Garimpo	118
Tabela 27 - Resultados obtidos no ensaio padrão - Córrego do Garimpo	119
Tabela 28 - Resultados da extração nos produtos gerados a partir das amostras compostas - Córrego do Garimpo	121
Tabela 29 - Sumário da recuperação de terras raras nos processos mineral e hidrometalúrgico a partir das amostras compostas - Córrego do Garimpo	122
Tabela 30 - Distribuição de teores no produto britado a -3,36 mm após atrição e deslamagem - Amostra argila ferruginosa.....	123
Tabela 31 - Distribuição de teores no produto britado a -3,36 mm após atrição e deslamagem - Amostra silexito	124
Tabela 32 - Características dos Produtos Finais (Finos Naturais + 2 Atrições) - Córrego do Garimpo	125
Tabela 33 - Composição química das amostras TR 01 e Saprolito	126
Tabela 34 - Distribuição de teores por fração granulométrica - Amostra TR 01.....	127
Tabela 35 - Distribuição de teores por fração. Produto de atrição após remoção dos Finos Naturais - Amostra TR 01.....	129
Tabela 36 - Distribuição de teores nos produtos de separação mineral. Produto de atrição após remoção dos finos naturais - Amostra TR 01.....	130
Tabela 37 - Estimativa da composição mineralógica - Amostra TR 01	133
Tabela 38 - Características dos produtos finais da amostra TR 01 - Lagoa Seca.....	137

Tabela 39 - Composição química das amostras volumétricas estudadas - Lagoa Seca.....	138
Tabela 40 - Resultados obtidos no ensaio padrão para os diferentes níveis da mineralização - Lagoa Seca.....	139
Tabela 41 - Características dos produtos finais - Lagoa Seca.....	140

Lista de figuras

	página
Figura 1 - Mapa de localização (Ribeiro, 1998a)	34
Figura 2 - Imagem de satélite do complexo alcalino de Catalão	35
Figura 3 - Mapa “geológico” (pedológico) do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, GO (adaptado de Carvalho, 1974a, e Baecker, 1983).....	38
Figura 4 - Mineralizações observadas no complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I.....	40
Figura 5 - Localização dos furos de sondagem - Córrego do Garimpo.....	51
Figura 6 - Modelo de blocos com teores de OTR - Córrego do Garimpo.....	52
Figura 7 - Esquema geral do procedimento experimental adotado - Amostra saprolito	63
Figura 8 - Esquema do procedimento experimental adotado na caracterização - Amostra saprolito	65
Figura 9 - Esquema de preparação da amostra saprolito	67
Figura 10 - Esquema do procedimento experimental para a amostra saprolito	69
Figura 11 - Esquema do procedimento experimental adotado para a amostra TR 02 - Córrego do Garimpo	75
Figura 12 - Esquema do procedimento experimental para amostra TR 01 - Lagoa Seca	78
Figura 13 - Distribuição em massa e dos principais óxidos na granulometria (%) - Amostra saprolito	81
Figura 14 - Proporção em massa e teores nos produtos obtidos na separação magnética (fração total +0,037 mm) - Amostra saprolito	82
Figura 15 - Teores dos produtos afundados não magnéticos por fração granulométrica - Amostra saprolito	89
Figura 16 - Distribuição em massa na preparação de amostras - Amostra saprolito	99
Figura 17 - Distribuição de OTR na preparação de amostras - Amostra saprolito	99
Figura 18 - Comparação entre os resultados dos ensaios de preparação de amostras - Amostra saprolito	100
Figura 19 - Características dos produtos obtidos nas etapas de atrição e deslamagem - Amostra saprolito	101

Figura 20 - Correlação de teores de OTR versus a relação $\text{CaO} / \text{P}_2\text{O}_5$ - Córrego do Garimpo	112
Figura 21 - Correlação de teores de CaO versus P_2O_5 - Córrego do Garimpo	112
Figura 22 - Correlação de teores de OTR versus CaO - Córrego do Garimpo	113
Figura 23 - Correlação de teores de OTR versus SiO_2 - Córrego do Garimpo.....	113
Figura 24 - Correlação dos teores de OTR versus a relação $\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3$ - Córrego do Garimpo	114
Figura 25 - Teores de OTR versus Fe_2O_3 - Córrego do Garimpo	114
Figura 26 - Diagrama triangular $\text{CaO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$ para a zona mineralizada - Córrego do Garimpo	115

Lista de fotos

	página
Foto 1 - Aspecto geral da mata nativa que cobre a área do depósito do Córrego do Garimpo.....	47
Foto 2 - Trabalhos de sondagem na área do Córrego do Garimpo	50
Foto 3 - Testemunhos de sondagem da área do Córrego do Garimpo.....	50
Foto 4 - Trincheira aberta no depósito do Córrego do Garimpo.....	53
Foto 5 - Deposição de sedimentos constituídos essencialmente por apatita, monazita e ilmenita na base de uma chaminé ou duto hidrotermal sobre rochas carbonatíficas	61
Foto 6 - Localização das amostras correspondentes aos diferentes níveis da mineralização, coletadas na área da Lagoa Seca.	76
Foto 7 - Aspecto de um agregado de monazita. observa-se a textura coliforme da monazita (MEV, elétrons retroespalhados).....	91
Foto 8 - Partícula mista de monazita com apatita (MEV, elétrons retroespalhados).....	91
Foto 9 - Agregados de monazita (grãos claros). Nota-se a presença de discontinuidades nesses agregados, o que os torna frágeis e quebradiços (MEV, elétrons retroespalhados).....	92
Foto 10 - Partícula mista de monazita (parte clara) com apatita (parte escura; MEV, elétrons retroespalhados).....	92
Foto 11 - Monazita de aspecto coliforme. Nota-se gradação de cor na monazita, possivelmente decorrente da variação do conteúdo de água (MEV, elétrons retroespalhados).....	93
Foto 12 - Monazita coliforme em grão de óxido-hidróxido de ferro. Nota-se as diminutas dimensões desses agregados (MEV, elétrons retroespalhados).....	93
Foto 13 - Grão misto apresentando monazita coliforme (cinza claro), óxido-hidróxido de ferro (cinza médio), quartzo (cinza escuro) e barita (branco; MEV, elétrons retroespalhados).....	94
Foto 14 - Partículas mistas de monazita (coliforme) com óxidos de ferro ou com apatita. (MEV, elétrons retroespalhados).....	94
Foto 15 - Partícula mista de monazita (coliforme) com quartzo. (MEV, elétrons retroespalhados).....	95

Foto 16 - Partícula mista de monazita (coliforme) com quartzo. Nota-se a dimensão diminuta dos cristalitos de monazita. (MEV, elétrons retroespalhados).....	95
Foto 17 - Agregados de monazita coliforme, com dimensão média da ordem de 10 μm . apresentando auréolas mais claras, referente a aumento de número atômica médio (núcleo hidratado??). (MEV, elétrons retroespalhados)	96
Foto 18 - Aspecto geral. Observa-se monazita intimamente associada à fosfato secundário (gorceixita; MEV, elétrons retroespalhados).....	134
Foto 19 - À direita, monazita associada à fosfato secundário. À esquerda, grãos mistos de Ba-pirocloro e fosfato secundário (MEV, elétrons retroespalhados)	135
Foto 20 - Inclusões diminutas de monazita coliforme em grão de fosfato secundário (MEV, elétrons retroespalhados).....	135
Foto 21 - Monazita coliforme mista com fosfato secundário. (MEV, elétrons retroespalhados).....	136
Foto 22 - Inclusões de monazita, de dimensões variadas, em grãos de fosfato secundário (MEV, elétrons retroespalhados).....	136
Foto 23 - Agregados de monazita (grãos claros) apresentando, essencialmente, aspecto concrecionar (MEV, elétrons retroespalhados).....	141
Foto 24 - Detalhe de agregado de monazita concrecionar; imagem de elétrons retroespalhados à esquerda e de secundários, à direita, onde é ressaltado o aspecto de superficial do mesmo (MEV).	141
Foto 25 - Agregados concrecionares/globulares de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).	142
Foto 26 - Detalhe de agregados concrecionares/globulares de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).	142
Foto 27 - Agregados concrecionares/globulares de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).	143
Foto 28 - Detalhe de agregado concrecionar/globular de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).	143

Resumo

O Córrego do Garimpo é descrito na literatura como um depósito de elementos de terras raras (ETR) relacionado à alteração hidrotermal de rochas dolomito-carbonatíticas. Embora esse depósito seja conhecido desde os anos 60, todas as tentativas anteriormente efetuadas visando a concentração das terras raras presentes foram infrutíferas. Estudos de caracterização tecnológica efetuados em material proveniente desse depósito mostraram-se extremamente importantes para a adequada compreensão do comportamento do material em questão, permitindo estabelecer um processo de concentração física não usual apoiado nessas características.

O material corresponde a um solo com granulação média a extremamente fina, contendo significativa parcela de minerais secundários. Monazita é o principal portador de terras raras e ocorre em agregados microcristalinos, muitas vezes com textura coliforme e freqüentemente associado a óxidos-hidróxidos de ferro e quartzo. Estes agregados são extremamente friáveis, o que faz com que os cristalitos de monazita estejam contidos preferencialmente nas frações inferiores a 0,020 mm.

As características particulares apresentadas pela monazita, altamente friável, com tendência natural à concentração nas frações finas, serviram de base para a definição do processo de concentração: etapas sucessivas de atrição e deslamagem. Três amostras volumétricas e 28 amostras compostas (relativas à quatro tipos de material previamente definidos da área do Córrego do Garimpo) e outras cinco, provenientes da área da Lagoa Seca, foram estudadas. Os produtos finais obtidos referentes às 28 amostras compostas (-0,020 mm) foram submetidos a testes hidrometalúrgicos, para a lixiviação da monazita presente, com a utilização de ácido sulfúrico, à temperatura ambiente.

“Abstract”

Corrego do Garimpo is described as a lateritic rare earths (REE) deposit related to hydrothermal alteration of dolomitic carbonatitic rocks. Although the deposit is known since the sixties, all the previous mineral dressing attempts made for the concentration of the REE bearing minerals resulted in unsatisfactory outcomes. Process mineralogy studies of bulk and borehole samples were fundamental to understanding the ore's behavior and to the development of an unusual physical concentration process.

The ore comprises a medium to very fine-grained soil material with large amounts of secondary (autigenous) minerals. Monazite, the essential REE bearing mineral, occurs as microcrystalline aggregates, sometimes presenting colloidal textures, which are frequently associated with iron oxide-hydroxides and quartz. Since these aggregates are extremely friable, the monazite crystallites are mainly associated with the -20 μm size fraction.

These particular characteristics supported the development of an unconventional mineral processing method for monazite based on desegregation, followed by scrubbing and hydrocyclone classification operations. Three volumetric samples and 28 borehole samples, comprising four ore types, from Corrego do Garimpo and other 5 samples from Lagoa Seca atra have been studied. The attained final products, -20 μm , were further submitted to leaching tests, simulating a chemical processing for the REE sulphuric extraction at low temperature.

1. Introdução

As ocorrências de minerais de terras raras no Brasil são numerosas, existindo recursos geológicos importantes associados a complexos alcalino-carbonatíficos, que constituem depósitos bem individualizados. Nestes, os minerais de ETR (elementos de terras raras) ocorrem como componentes principais, ou são subprodutos potenciais de outros bens minerais. Nesses complexos, a concentração de minerais de terras raras resultou de um enriquecimento residual associado ao intemperismo.

Tais depósitos, embora com recursos significativos, não apresentam até o momento um equacionamento tecnológico satisfatório para o seu aproveitamento econômico. Dentre eles, destaca-se o depósito do “Córrego do Garimpo” no domo alcalino de Catalão I, associado à jazida de fosfato (apatita), em área de concessão da Ultrafértil, no qual a monazita é o principal mineral portador de terras raras.

O conhecimento atual do depósito de Catalão indica recursos associados ao manto de intemperismo, com teor médio de 8,31% de OTR (óxidos de terras raras), na forma de monazita. São reconhecidos três tipos básicos de mineralizações: silexitos, saprolitos e carbonatito, sendo o saprolito o material de maior representatividade no depósito.

Vários estudos tecnológicos foram desenvolvidos anteriormente, porém sem a obtenção de resultados satisfatórios, seja pela baixa recuperação e relação de enriquecimento obtida através das tentativas de concentração física, seja pelo elevado custo do tratamento químico do material “in natura”, sem a etapa prévia de concentração.

A viabilização do aproveitamento dos ETR associados ao depósito de Catalão I depende, essencialmente, do equacionamento da etapa de concentração física, visando a elevação dos teores de ETR no produto que constituirá a alimentação do processo químico.

Por outro lado, estes recursos de terras raras encontram-se na área de influência da lavra de fosfato e atualmente estão preservados “in situ”, sendo que a cava já os expôs em uma das frentes de lavra. Para a evolução da mina de fosfato, far-se-á necessária a remoção de parte deles e, em não havendo condições técnico-econômicas de exploração, serão incorporados aos rejeitos (estéril da mina e bacia de sedimentação de rejeitos).

Permanece, portanto, um desafio tecnológico para o aproveitamento do material mineralizado em questão.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi verificar a possibilidade de se estabelecer uma alternativa de concentração física para o material mineralizado a fosfato e terras raras, proveniente de Catalão, área Ultrafertil, de modo a gerar concentrados de OTR (óxidos de terras raras) com teores e recuperações compatíveis com o seu posterior processamento por rota química (purificação / separação dos elementos de terras raras).

As principais metas a serem atingidas no presente estudo compreenderam:

- a caracterização e o desenvolvimento de beneficiamento físico do material mineralizado a terras raras, através da utilização de procedimentos laboratoriais aplicáveis a materiais de granulação fina;
- a caracterização tecnológica do depósito de terras raras, resultando na definição da tipologia do material portador desses elementos e de suas principais características;
- a geração de pré-concentrados de minerais de terras raras para a realização de testes químicos, visando avaliar o comportamento dos mesmos na etapa de digestão ácida.

3. Revisão bibliográfica

Os metais de terras raras (ou elementos de terras raras, ou simplesmente terras raras), denominação recomendada pela Comissão de Nomenclatura em Química Inorgânica da IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry, 1960) correspondem ao Grupo III-B da tabela periódica. Compreendem o escândio (Sc, número atômico 21), o ítrio (Y, número atômico 39), o lantânio (La, número atômico 57) e os lantanídeos (que vão do cério - Ce, número atômico 58, ao lutécio - Lu, número atômico 71; Abrão, 1994; Araújo e Gaspar, 1992).

A denominação "terras raras" vem do século passado, quando estes elementos começaram a ser descobertos e está relacionada ao aspecto terroso dos seus óxidos e à suposição equivocada de que seriam escassos na natureza.

As terras raras (como são freqüentemente designadas na literatura e obedecendo à recomendação da IUPAC) não são elementos tão escassos como o seu nome sugere, quando considerados em termos de abundância na crosta terrestre. São mais abundantes que o ouro, o mercúrio e o índio, por exemplo. O mais comum deles, o cério, é tão freqüente quanto o zinco e o estanho, enquanto que o mais raro, o túlio, ocorre praticamente na mesma concentração que a prata (Henderson, 1984).

Todos esses elementos apresentam comportamento químico muito semelhante. As diferenças, entretanto, são suficientes para direcionar o seu uso específico. As terras raras apresentam potenciais de ionização relativamente baixos, o que as torna altamente eletropositivas e seus compostos essencialmente iônicos. Formam cátions trivalentes, embora algumas delas ocorram no estado divalente (como o európio - Eu e o itérbio - Yb) e tetravalente (cério - Ce), porém esses íons são sempre menos estáveis do que os trivalentes. A proporção dos diferentes estados de oxidação do cério e do európio, em alguns sistemas, pode ser dependente da temperatura, pressão, composição e condições redox.

As terras raras apresentam o fenômeno da "contração lantanídica", que consiste na diminuição do tamanho dos átomos e dos íons com o aumento do número atômico. Como resultado desse fato, observam-se também mudanças nos números de coordenação do lantânio (La) para o lutécio (Lu) (Burt, 1989).

Seu raio iônico é relativamente grande (em torno de 1 Å, o que é semelhante aos dos cátions Ca, Na, Th, dentre outros) e sua substituição usualmente envolve cátions de grandes dimensões, tais como cálcio e estrôncio. Comparativamente a outros cátions

trivalentes, como o ferro, alumínio ou boro, o seu raio iônico é significativamente maior (Henderson, 1996).

Os elementos de terras raras são convenientemente agrupados em dois grupos (Miyawaki; Nakai, 1993):

- ⇒ o “grupo do cério”, composto pelos lantanídeos do La até o Eu (terras raras leves) e
- ⇒ “grupo do ítrio”, formado pelos lantanídeos do Gd (gadolínio) até o Lu (lutécio; terras raras pesadas).

Na natureza, as terras raras leves estão associadas preferencialmente aos granitos pegmatíticos, nefelina-sienitos e seus pegmatitos, pneumatolitos, depósitos hidrotermais relacionados a álcali-grano-sienitos, perfis de alteração crustal de álcali-sienitos, depósitos marinhos costeiros, e pláceres. Nas rochas magmáticas, esses elementos estão preferencialmente dispersos em minerais portadores de cálcio. Minerais de terras raras propriamente ditos são geralmente formados em condições pós-magmáticas, especialmente por processos hidrotermais (Cullers, Graf, 1984; Notholt et al, 1990; Salvi, Williams-Jones e Wood, 1991).

Depósitos de terras raras pesadas estão geneticamente relacionados a corpos graníticos (pegmatitos graníticos, pegmatitos e pneumatolitos de álcali-granitos, hidrotermalito-granitos e depósitos eluvionares.

Segundo Henderson (1984 e 1996), o arranjo eletrônico das diversas terras raras em torno do seu núcleo é o fator determinante das propriedades desses elementos. Esse arranjo é muito particular, na medida em que, apesar da presença de três elétrons nas camadas mais externas, passar do lantânio ao lutécio envolve o preenchimento progressivo da camada 4f para se obter a configuração eletrônica $(Xe) 4f^n 5d^1 6s^2$ ($0 < n < 14$).

Pelas suas propriedades químicas (predominantemente iônicas), aliadas ao fenômeno de contração iônica e do preenchimento da camada interna 4f, os elementos de terras raras apresentam aplicações tecnológicas muito importantes (Abrão, 1994).

Certos íons apresentam luminescência ou fluorescência (especialmente o Eu e o Y), quando usados como ativadores em óxidos, silicatos e outros compostos.

Além do promécio (Pm; lantanídeo obtido artificialmente pela fissão do urânio e que aparece como traços nos minerais como consequência de fissão espontânea), um outro elemento apresenta um isótopo radioativo. É o lutécio-176, de ocorrência natural, um beta-emissor com meia vida de $7,3 \times 10^{10}$ anos (Abrão, 1994).

Em razão da presença de tório, urânio e de seus descendentes naturais nos minerais contendo terras raras, em particular na monazita, os radioisótopos naturais actínio-227, tório-228, rádio-226, rádio-228, chumbo-210 e polônio-210 podem estar presentes nos cloretos de terras raras, sendo necessária a utilização de procedimentos radioquímicos para a detecção e determinação desses componentes (Abrão, 1994).

São os elétrons da camada 4f que conferem aos elementos de terras raras a sua individualidade, o que possibilita a distinção de uma terra rara da outra. Por exemplo, em temperaturas mais baixas do que a ambiente o gadolínio (Gd) metálico é ferromagnético, enquanto as outras terras raras não o são. Em temperaturas extremamente baixas (da ordem de -267°C), o lantânio metálico é a única terra rara que perde a resistência ao fluxo de eletricidade, tornando-se um supercondutor.

Os compostos comercializáveis de ETR limitam-se atualmente a três tipos distintos de produtos:

- misturas naturais;
- produtos que representam frações ou estágios de separação de misturas naturais;
- terras raras individualizadas, com grau de pureza variável.

Os compostos provenientes das misturas naturais normalmente variam de composição dependendo do mineral de origem. Os dois tipos mais comumente comercializados são:

- terras raras oriundas de monazita ou de bastnaesita, onde as terras raras leves são as principais;
- terras raras advindas de xenotima, gadolinita e euxenita, onde há predominância de terras raras pesadas e ítrio.

O “didímio” é um dos produtos comerciais mais comuns. Representa uma fração ou estágio de separação de misturas naturais onde o cério foi quase que totalmente removido. Há ainda uma outra fração, conhecida como “neodímio comercial”, onde estão presentes o Nd, Pr, Sm e o Gd, que é resultante da produção de lantânio puro. Frações de Sm e Gd e concentrados de ítrio também existem e são comercializadas na forma de óxidos, cloretos, carbonatos, hidróxidos, sulfatos simples e duplos (Abrão, 1994).

3.1. *Minerais de terras raras*

Em muitos dos processos formadores de rochas, as terras raras estão dispersas como constituintes menores ou traços nos diversos minerais presentes.

Segundo Clark (1984), o comportamento das terras raras, nos diversos tipos de rocha, pode ser sumariado como:

- centenas de ppm de lantanídeos podem estar presentes nas rochas ígneas, associadas aos minerais principais ou aos acessórios. Nestes casos, os maiores conteúdos de terras raras estarão presentes nos anfibólios e piroxênios cálcicos e também nos feldspatos (que sempre apresenta uma anomalia positiva para európio);
- as terras raras, nas rochas graníticas, normalmente concentram-se nos minerais acessórios, tais como monazita, titanita, zircão, apatita e alanita;
- nas rochas sedimentares (calcários e arenitos), ocorre uma tendência à concentração das terras raras nos minerais de argila, em detrimento do quartzo e dos carbonatos presentes;
- nas rochas metamórficas, as granadas são os minerais com maior teor de terras raras; há, ainda, importantes concentrações de terras raras em monazita ou em apatita;
- os carbonatitos são as rochas que contêm os maiores teores de terras raras. Nos carbonatitos tardios formam minerais específicos e nos precoces associam-se a calcita, apatita e pirocloro.

Do ponto de vista mineralógico, as terras raras podem ocorrer em diversas famílias de minerais, na forma de óxidos, carbonatos, fluorcarbonatos, fluoretos, fosfatos, haletos, e silicatos e, em menor proporção, como sulfatos, tungstatos, boratos e arseniados.

Assim, mais de 200 minerais de terras raras já foram descritos. Levinson (1966), apud Miyawaki e Nakai (1996), definiu como mineral de terras raras todo aquele que contivesse elementos de terras raras como constituinte essencial. Segundo esse critério, a Associação Mineralógica Internacional (IMA) decidiu que o nome correto do mineral de terras raras deveria ser escrito incluindo o símbolo químico do elemento predominante entre parênteses; dessa forma ter-se-ia, por exemplo, monazita-(La), [LaPO₄], e monazita-(Ce), [CePO₄].

Posteriormente, Bayliss and Levinson (1988) definiram como minerais de terras raras aqueles nos quais a porcentagem atômica total de elementos de terras raras (incluindo o ítrio) fosse maior do que outros elementos.

A estrutura cristalina de cerca de metade dos minerais de ETR é bem conhecida. A análise estrutural tem revelado que muitos desses minerais raras são constituídos por soluções sólidas, envolvendo não só cátions de terras raras, mas de outros elementos químicos, tais como sódio, cálcio ou tório, desde que essas substituições sejam adequadas em termos de raios iônicos. Similaridades entre raios iônicos e entre eletronegatividade são, às vezes, fatores mais importantes para as substituições isomórficas, do que comportamentos químicos semelhantes (Miyawaki e Nakai, 1996).

Compensações de carga freqüentemente são necessárias quando ocorre a substituição de cátions trivalentes de ETR por outros cátions de valências distintas. Isto é muito importante quando se quer entender o comportamento dos ETR nos sólidos.

Segundo Miyawaki e Nakai (1987; 1993), os minerais de terras raras podem ser classificados em seis classes, em função do tipo de grupo aniônico presente em sua estrutura cristalina:

- ⇒ minerais com estrutura cristalina apresentando grupos triangulares aniônicos isolados – *carbonatos*, tais como bastnaesita-(Ce), $[\text{Ce}(\text{CO}_3)\text{F}]$;
- ⇒ minerais com estrutura cristalina contendo apenas grupos aniônicos tetraédricos isolados – *fosfatos*, tais como xenotima-(Y), $[\text{YPO}_4]$, e monazita-(Ce), $[\text{CePO}_4]$;
- ⇒ minerais com estrutura cristalina contendo grupos aniônicos de íons tetraédricos – *silicatos*, como a talenita-(Y), $[\text{Y}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})]$;
- ⇒ minerais com estrutura cristalina contendo grupos aniônicos de íons tetraédricos e octaédricos – *alumino-silicatos e titano-silicatos*, tais como alanita-(Ce), $[\text{Ca}(\text{Ce,Ca})\text{Al}(\text{Al,Fe})(\text{Fe,Al})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})]$;
- ⇒ minerais com estrutura cristalina contendo grupos aniônicos de íons octaédricos – *titanatos e niobatos*, tais como a fergusonita-(Y), $[\text{Y}(\text{NbO}_4)]$;
- ⇒ minerais com estrutura cristalina sem grupos aniônicos – *fluoretos e óxidos*, como fluocerita-(Ce), $[\text{CeF}_3]$, e cerianita-(Ce), $[(\text{Ce,Th})\text{O}_2]$.

Segundo Semenov (1966) e Clark (1984), embora existam mais de 200 espécies de minerais portadoras de elementos de terras raras em pequenas concentrações (até 0,01%) e cerca de 70 minerais que são enriquecidos nesses elementos (podendo atingir

teores da ordem de 10%), apenas três são importantes formadores de depósitos de terras raras. São eles:

- ⇒ a bastnaesita;
- ⇒ a monazita;
- ⇒ a xenotima.

Esses minerais são responsáveis por quase todo o abastecimento de ETR da indústria de transformação, juntamente com a parcela advinda das argilas, que apresentam conteúdo importante de terras raras adsorvidas (Wu et al, 1996).

A Tabela 1 apresenta os principais minerais formadores de jazidas e a Tabela 2 traz alguns minerais portadores de terras raras.

Tabela 1 - Minerais formadores de depósitos de terras raras

Mineral	Sistema	Fórmula	Conteúdo de OTR (%)*	Jazimento
bastnaesita	hexagonal	(Ce, La...)(CO ₃)F	67 a 75	Pegmatitos, associados normalmente a allanita, cerita e fluorcerita; granitos, granitos pegmatitos a hidrotermal, rochas alcalinas e carbonatitos
monazita	monoclínico	(Ce, Y) PO ₄	55 a 75	Mineral detrítico em placers, pegmatitos associados a granitos e sienitos, rochas metamórficas e depósitos de veios e acessórios em granitos, rochas alcalinas e carbonatitos
xenotima	tetragonal	YPO ₄	42 a 62	rochas ígneas ácidas e alcalinas, pegmatitos, metamórficas e mineral detrítico

* OTR => óxidos de terras raras totais; apud Lorenzi (1999)

Tabela 2 - Alguns dos principais minerais portadores de terras raras

Mineral	Sistema	Fórmula química simplificada	Ocorrência	Família
allanita	monoclínico	(Ca, Ce, Th) ₂ (Al, Fe, Mn, Mg) ₃ (Si O ₄) ₃ OH	em granitos, granodioritos, monzonitos e sienitos	silicato
brannerita	monoclínico	(U, Ca, Fe, Y, Th) ₃ (Ti, Si) ₅ O ₁₆	pegmatitos, mineral detrítico de pegmatitos ou depósitos de veios	óxido
cerita	trigonal	Ca Ce ₈ Si ₃ O ₁₆	pegmatitos, veios hidrotermais em alcali sienitos e granitos	silicato
euxenita	ortorrômbico	(Y,Ca,Ce,U,Th) (Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	granito pegmatito, acessório em pegmatito e placers	óxido
fergusonita	tetragonal	(Y, Ce,U,Th,Ca) (Nb,Ta,Ti) ₂ O ₄	pegmatitos associados a euxenita, monazita e outros minerais de ETR	óxido
gadolinita	monoclínico	Be ₂ Fe Y ₂ Si ₂ O ₁₀	granito e granito pegmatito, associado a fluorita e allanita	silicato
pirocloro	cúbico	(Na,Ca,Ce) ₂ Nb ₂ O ₆ F	nefelina sienito, maciço alcali sienito carbonatito	óxido
rabdofanita	hexagonal	(Ce, Y) P O ₄ . H ₂ O	mineral secundário formado a partir do intemperismo da bastnaesita, belovita, britolita e outros minerais de ETR	fosfato
samarsquita	ortorrômbico	(Y, Ce, U, Ca) (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆	granito pegmatito, freqüentemente associado a columbita ou como mineral detrítico em placers	óxido
zircão	tetragonal	(Zr,Th,Y,Ce) SiO ₄	nefelina sienitos, granitos	silicato

Apud Lorenzi (1999)

3.1.1 Os fosfatos de terras raras

Os fosfatos de terras raras são classificados em:

- ⇒ fosfatos anidros (monazita e xenotima);
- ⇒ hidroxí-fosfatos (belovita e florencita);
- ⇒ fosfatos hidratados (rabdofanita e churchita).

Destes, serão detalhados, na seqüência, apenas a monazita e a rabdofanita, dada a importância destes minerais na área objeto do presente estudo.

3.1.2 A monazita, (Ce, La, Y, Th) PO₄

A monazita foi identificada por Breithaupt em 1829 na Suécia. Seu nome deriva do grego *μοναζειν*, ser solitário, em alusão a sua raridade em depósitos onde ela foi originalmente encontrada (Semenov, 1966).

O conteúdo de óxidos de terras raras (principalmente Ce e La) está compreendido entre 50 e 68%, ao passo que o de P₂O₅ oscila entre 22 e 31,5% (Betejtin, 1970). Como substituições isomórficas, podem estar presentes Y₂O₃ (até 5%), ThO₂ (5 a 10%, podendo chegar até 28%, conferindo-lhe um caráter radioativo) e mais raramente ZrO₂ (até 7%) e SiO₂ (até 6%, que pode estar relacionado ao conteúdo de tório, ou ser relativo à substituição do P₂O₅), além de CaO e SO₃. Em quantidades muito pequenas, pode conter ainda MgO, MnO, PbO, Fe₂O₃, Al₂O₃ e H₂O.

É um dos mais abundantes minerais de ETR, ocorrendo em depósitos endógenos de várias filiações genéticas. Muito freqüentemente, encontra-se como mineral acessório em granitos, gnaisses, aplitos e pegmatitos, e como grãos rolados resultantes da decomposição dessas mesmas rochas (Overstreet, 1967 apud Wall e Mariano, 1996; Klein e Hurlbut, 1994; Parfenoff, 1970). Neste caso, concentra-se em sedimentos arenosos, em razão da sua resistência química aos ataques do intemperismo e pela sua elevada densidade, em associação com outros minerais pesados, tais como magnetita, ilmenita, rutilo e zircão (a exemplo do que ocorre com a monazita encontrada em cordões litorâneos dos estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro).

Seus cristais, por vezes, são recobertos por uma crosta de coloração amarelo-acastanhada, aparentemente constituída por rabdofanita (CePO₄.H₂O).

A monazita derivada de granitos, geralmente apresenta uma composição intermediária entre as terras raras (leves e pesadas; La~Lu) e carrega quantidades

substanciais de tório (Overstreet, 1967 apud Wall e Mariano, 1996). A monazita encontrada nos pláceres da Índia e do Ceilão, formados a partir de rochas charnoquíticas, contém mais tório do que as encontradas em pláceres do Brasil, Nigéria, Malásia e Estados Unidos, que são formados a partir de granitos normais (9-11% e 3-6% de ThO₂, respectivamente).

A monazita cristalina granular é comum em pegmatitos graníticos contendo ortita, zircão, samarskita, dentre outros minerais. Essa monazita contém quantidades crescentes de ThSiO₄ (torita), urânio (superior a 0,5%) e terras raras pesadas (Nd, Sm, Gd, associadas), como é o caso da monazita em pegmatitos da Noruega, antiga União Soviética e também nos Estados Unidos. Para o mesmo conteúdo de neodímio, a monazita proveniente desses pegmatitos contém entre 7 e 10% de Sm, enquanto que a de granitos normais mostra entre 3 e 5% (a relação Nd/Sm em pegmatitos é de cerca de 2,5, elevando-se para quase 6 nos granitos; Semenov, 1966).

Pegmatitos com espodumênio ocasionalmente apresentam monazita com uma grande proporção do componente cheralita (variedade de monazita composta por cálcio e tório).

Em depósitos hidrotermais do tipo greisen, a monazita pode estar associada à presença de molibdenita, cassiterita e wolframita, como na Bolívia, África do Sul e na antiga União Soviética. Esta monazita caracteriza-se pelos baixos conteúdos de tório e de terras raras pesadas (Nd, Sm, Gd). Nos depósitos tipo greisen de alta temperatura, a monazita pode conter teores variáveis entre 1 e 5% de ThO₂, enquanto que, para os depósitos hidrotermais de baixa temperatura, esse teor cai para valores muito inferiores a 1% de ThO₂ (Semenov, 1966).

Monazita é abundante em produtos derivados de rochas alcalino-miasquíticas (sienitos e granitos). Em Mountain Pass ela ocorre em depósitos hidrotermais relacionados a essas rochas, em associação com bastnaesita, fluorita, dolomita, siderita e barita. Esta monazita é amarelo-clara e contém não mais do que 1% de ThO₂; contém grande quantidade de lantânio e baixos conteúdos de samário e de gadolínio.

Nos Urais, tório-monazita ocorre em miasquitos, álcali-sienitos-pegmatitos e fenitos. Na Sibéria, uma monazita com características similares, foi encontrada em pegmatitos graníticos.

A monazita também ocorre em depósitos tipo alpino na Suíça, e na Alemanha. Em depósitos hidrotermais do tipo greisen, localizados na Ásia Central, é substituída por fluocerita, ítrio-parisita, etc. É abundante em depósitos metamórficos, como em migmatitos na Índia, silimanita-xistos e mármore nos Estados Unidos (Semenov, 1966).

3.1.3 A rabdofanita, (CePO₄.H₂O)

Descrita por Hartley na Cornuália, Inglaterra, em 1822. Seu nome deriva do grego ραβδος (bastão, varinha) e φαίνεσθαι (parecer), em alusão ao seu característico aspecto bandado (Semenov, 1966).

É constituída teoricamente por cerca de 64,9% de óxidos de terras raras, 28% de P₂O₅ e 7,1% H₂O. Seu padrão difratométrico é muito similar ao da monazita.

Em pegmatitos alcalinos da península de Kola, muitas vezes ocorre como produto de alteração intempérica de outros minerais de terras raras, como belovita, britolita, monazita, entre outros (Semenov, 1966).

Cristais de rabdofanita de origem epitermal ocorrem associados às cavidades das drusas de zeólitas em pegmatitos alcalinos. Na península de Kola, a rabdofanita sempre apresenta conteúdos elevados de tório e silício.

Como produto de alteração da bastnaesita, ocorre em depósitos hidrotermais relacionados a granosienitos alcalinos (Mongólia) e também nos fenitos do maciço Vishnevye.

Nos maciços alcalinos é marcante o aumento no conteúdo de La.

Sua ocorrência também é citada em alguns depósitos sedimentares da Cornuália, em limonitas de Connecticut (Estados Unidos) e em arenitos terciários na Ucrânia. A rabdofanita encontrada nesses depósitos é enriquecida em európio, ítrio e terras raras pesadas.

3.2. Os carbonatitos e as terras raras

Carbonatitos (segundo Wooley e Kempe, 1989 e Le Maitre et al, 1989) são rochas ígneas contendo mais de 50% de minerais na forma de carbonatos.

Idealmente, os carbonatitos recebem o nome do principal carbonato presente, podendo ser designados, por exemplo, como calcita carbonatito, dolomita carbonatito ou anquerita carbonatito). Em relação à sua composição química, eles podem ser divididos em três variedades principais, ou seja: cálcio-carbonatito; magnésio-carbonatito e ferro-carbonatito (Wall e Mariano, 1996).

O conteúdo médio de ETR nesses três tipos de carbonatitos foi calculado por Wooley e Kempe (1989), apud Wall e Mariano (1996), como sendo respectivamente 0,37% em peso, 0,42% em peso e 1% em peso, evidenciando maior enriquecimento nos ferro-carbonatitos.

O termo “carbonatito rico em terras raras” não apresenta uma definição precisa, mas rochas que se enquadram nesta definição contêm níveis de ETR superiores a 2% e apresentam minerais típicos de terras raras (Wall e Mariano, 1996).

Os carbonatitos apresentam enriquecimento em elementos de terras raras leves (valores normalizados a condritos) em relação aos elementos de terras raras pesados, o que se reflete na predominância de minerais desses elementos. Segundo Loubet et al. (1972), essas rochas são as que apresentam os maiores teores de terras raras.

Hogarth (1985), apud Wall e Mariano (1996), listou 27 minerais de terras raras comuns em carbonatitos (excluindo o depósito de Bayan Obo), embora o número de minerais de terras raras seja superior a 200 (Kapustin, 1980; Lottermoser, 1994). Isto provavelmente deve-se à baixa atividade da sílica nos carbonatitos, o que restringe a variedade de minerais de terras raras nessas rochas. Os minerais mais abundantes são a bastnaesita, a sinquisita e a parisita (fluocarbonatos), a ancillita (carbonato hidratado) e a monazita (fosfato). Em alguns carbonatitos ocorrem minerais do tipo Ba-ETR-fluocarbonatos (tais como cordilita, huangoita, zongarecita), alumino-fosfatos (grupo da crandalita) e silicatos (alanita).

Minerais de terras raras pesadas são raros, sendo conhecidos no carbonatito de Khibina, na península de Kola (Voloshin et al, 1990, apud Wall e Mariano, 1996), agregados microcristalinos de xenotima em fluorita no domo de Hicks, nos Estados Unidos, e em Mt. Weld, na Austrália (Mariano, 1984 e 1987, apud Wall e Mariano, 1996).

3.2.1 Carbonatitos tardios

O conceito de estágios de formação de carbonatitos é importante quando se consideram os possíveis minerais portadores de terras raras. Dentre as variedades de carbonatitos que formam um complexo, a seqüência mais tardia é aquela que contém as maiores concentrações de ETR, e conseqüentemente são as mais enriquecidas em minerais de ETR (Wall e Mariano, 1996).

Os carbonatitos tardios são, em geral, ferro-carbonatitos. Possuem coloração escura e são constituídos por dolomita rica em ferro ou anquerita, de acordo com Le Bas (1989). Podem apresentar características de campo e texturais de outras rochas ígneas ou hidrotermais e contêm, normalmente, minerais de terras raras como bastnaesita e/ou monazita. Barita, fluorita, mineralizações de urânio e tório e sílica na forma de quartzo ou calcedônia são comuns.

Calcita-carbonatitos também são portadores de terras raras. Estes carbonatitos podem ser tardios e não contêm apatita e magnetita, assembléia usual em carbonatitos dos estágios iniciais de formação (Wall e Mariano, 1996).

Nos estágios iniciais de evolução, predominam as variedades cálcio e magnésio-carbonatitos, e os ETR se encontram principalmente na estrutura da apatita e da calcita e nos minerais acessórios tais como perovskita e pirocloro; monazita pode se formar ao término da cristalização da apatita. Os níveis de ETR nesses minerais são normalmente baixos (<0,5% em peso), mas pelo fato deles constituírem os principais componentes dessas rochas, quantidades significativas de terras raras podem estar presentes (Mariano, 1979, apud Wall e Mariano, 1996).

3.2.2 Carbonatitos extrusivos

Um raro exemplo de carbonatito extrusivo rico em terras raras ocorre em Uyaynah, nos Emirados Árabes; trata-se de um calcita-carbonatito com grandes quantidades de alanita-(Ce) (Woolley et al., 1991, apud Wall e Mariano, 1996). No entanto, este carbonatito passou por um processo metamórfico de baixo grau, de tal forma que parte da alanita pode ser produto dessa alteração, o que não deixa clara a origem primária extrusiva dos minerais portadores de terras raras.

3.2.3 Formação dos minerais de terras raras nos carbonatitos

A tendência dos minerais de terras raras formarem-se nos estágios finais dos carbonatitos induz a problemas de interpretação quanto à sua gênese, suscitando dúvidas se eles são precipitados diretamente do magma carbonatítico ou de soluções hidrotermais ou carbótermais. A presença de um mineral de terras raras em particular é raramente um indicador confiável de como o depósito se desenvolveu, porque muitos minerais de terras raras podem se precipitar sob diversas condições. Por exemplo, monazita pode se cristalizar em jazimentos magmáticos, hidrotermais ou supérgenos (Overstreet, 1967, apud Wall e Mariano, 1996). Trabalhos experimentais indicaram ser possível cristalizar fluorcarbonatos de ETR hidrotermalmente ou a partir da fusão; estes minerais são constituintes comuns em depósitos hidrotermais.

Depósitos de minerais de terras raras produzidos por cristalização primária a partir de um magma carbonatítico são raros. Segundo Mariano (1989a, 1989b), a bastnaesita e a parisita de Mountain Pass são os principais exemplos. Wyllie, Jones e Deng (1996) sugerem que o monazita-estroncianita-carbonatito de Kangankunde, Malawi, pode ser outra possibilidade.

Mineralizações hidrotermais de ETR são muito mais comuns, produzindo minerais como a bastnaesita, parisita, sinquisita, monazita e ancillita. A maioria desses minerais pode ocorrer em fraturas, onde são usualmente acompanhados por quartzo, fluorita, barita, hematita e sulfetos. Podem ainda apresentar-se como disseminações ou como agregados policristalinos. Nessas rochas, a concentração de terras raras situa-se entre 1 e 3% (Mariano, 1989a, 1989b).

Soluções hidrotermais de baixa temperatura podem causar a “quebra” dos minerais primários, e provocar uma remobilização das terras raras, formando minerais secundários desses elementos, de forma similar à formação por intemperismo. Acredita-se que este mecanismo seja o responsável por muitos dos minerais de terras raras presentes em carbonatitos, tais como monazita, rabdofanita, churchita e florencita, além de minerais do grupo das crandalitas (goiazita, gorceixita e crandalita).

Do ponto de vista econômico é digno de nota que, apesar dos depósitos de terras raras serem comuns e poderem apresentar teores consideráveis, a granulação fina dos minerais portadores desses elementos é um fator extremamente danoso em termos de seu beneficiamento, prejudicando, sobremaneira, o seu aproveitamento (Wall e Mariano, 1996).

3.3. Comportamento dos elementos de terras raras no intemperismo

Segundo Formoso et al (1989), a evolução das técnicas analíticas, nas últimas décadas, propiciou um grande avanço no entendimento da geoquímica dos elementos de terras raras. Dessa forma, o fracionamento característico entre terras raras leves e terras raras pesadas durante a diferenciação magmática é hoje um fenômeno conhecido.

No ciclo sedimentar, no entanto, o comportamento desses elementos é menos estudado, notadamente quando se considera o intemperismo tropical, onde um mecanismo hidrolítico de alta intensidade provoca a alteração das rochas a ele submetidas.

O fracionamento observado nos processos ígneos tende a ser minimizado nos processos exógenos, principalmente nas rochas clásticas, onde ocorre um somatório das terras raras provenientes de minerais detríticos e autógenos. Em sedimentos depositados em clima árido, Balashov et al (1964) e Ronov et al (1967) observaram que não ocorre fracionamento das terras raras, porém em razão da mobilidade desses elementos, ele existe em clima úmido, com transporte preferencial dos lantanídeos pesados (Gd ao Lu).

Mineralizações supérgenas de ETR associadas a complexos alcalino-carbonatíticos são características de climas tropicais úmidos, com moderada a alta

precipitação pluviométrica, em situações onde a drenagem e a topografia permitem a formação de minerais residuais (Mariano, 1989a; Flicoteaux et al, 1990).

A ação intempérica em minerais portadores de ETR, tais como calcita, dolomita e apatita, causam a remoção dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} , enquanto que os elementos menos móveis, incluindo as terras raras, Sr, Ba e Th, são incorporados em fosfatos, carbonatos e sulfatos.

Sob condições de pH neutro a alcalino, os lantanídeos se acumulam por adsorção nos argilominerais, mas em ambientes com pH ácido, esses íons adsorvidos são removidos (Formoso et al, 1989).

O comportamento dinâmico dos elementos de terras raras no processo intempérico depende de diversos fatores, ligados tanto à rocha em si, como às condições do meio, tais como:

- teor na rocha original;
- sua distribuição nas diversas fases minerais formadoras das rochas;
- estabilidade dessas fases em relação ao processo intempérico;
- natureza das soluções de alteração (pH, Eh, concentração);
- natureza de seus íons nas soluções;
- tipo de intemperismo atuante.

A lateritização provoca uma intensa alteração das rochas. Esta alteração (Formoso et al, 1989) caracteriza-se basicamente por:

- agir simultaneamente sobre todos os minerais primários alteráveis (alteração sincrônica), fazendo com que eles desapareçam dos horizontes em evolução;
- formar grandes espessuras de materiais alterados, nas quais os processos pedogenéticos atuam apenas nos níveis superiores.

Dessa forma, um perfil laterítico normal é constituído por um nível espesso mais superficial, que forma o solum e um mais profundo, que forma as lateritas.

O processo de lateritização é consequência do meio em que os metais Al, Mg, Fe, Cu, Ni e terras raras são total ou parcialmente liberados a partir dos minerais formadores das rochas originais e depois acumulados no perfil de alteração laterito-saprolítico (Morteani; Preinfalk, 1996). A lateritização dá origem a materiais superficiais caracterizados por duas paragêneses minerais:

- paragênese hidróxidos de alumínio / oxi-hidróxidos férricos, resultante da alcalinização total dos minerais primários, com acúmulo integral de ferro e alumínio in situ, e
- paragênese caolinita / oxi-hidróxidos férricos (ferralitização caolinítica), onde ocorre uma recombinação total ou parcial do alumínio com sílica formando então os argilominerais, do tipo 1:1.

Segundo Formoso (1989), nas condições lateríticas, as terras raras, liberadas a partir dos minerais primários, passam para as soluções de alteração como íons trivalentes, e podem se associar aos OH^- da solução, formando hidróxidos, ou ser complexados, principalmente como carbonatos. Nessas condições, o cério e o európio podem apresentar mudanças no grau de oxidação, aparecendo em superfície como Ce^{4+} e Eu^{2+} .

A forte oxidação na zona de intemperismo favorece a separação do Ce^{4+} dos outros ETR trivalentes. O Ce^{4+} apresenta um produto de solubilidade (pS) para hidróxido muito baixo, o que poderia explicar sua elevada concentração nos produtos residuais (oxidação do Ce^{4+}), e extrema dificuldade de ser encontrado em solução verdadeira.

Durante a alteração intempérica, uma “quebra” dos minerais primários presentes nos carbonatitos, tais como a apatita, calcita e dolomita, juntamente com a de alguns dos minerais de terras raras, pode ocorrer, resultando numa remobilização dos elementos de terras raras, que vão se concentrar posteriormente nos produtos dessa alteração. Minerais de terras raras formados dessa forma incluem a monazita (CePO_4), rabdofanita ($\text{CePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), cerianita ($\text{Ce}^{4+}, \text{Th}$) O_2 , churchita e membros da série das crandalitas - florencita [$\text{ETR Al}_3 (\text{PO}_4)_2 (\text{OH})_6$], gorceixita (Ba, ETR) $\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2 (\text{OH}_5 \cdot \text{H}_2\text{O})$, goiazita (Sr, ETR) $\text{Al}_3 (\text{PO}_4)_2 \cdot (\text{OH}_5 \cdot \text{H}_2\text{O})$, crandalita (Ca, ETR) $\text{Al}_3 (\text{PO}_4)_2 (\text{OH}_5 \cdot \text{H}_2\text{O})$ e plumbogumita $\text{PbAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$. A cerianita normalmente se forma intimamente cristalizada com os minerais do grupo da crandalita (Flicoteaux et al, 1990).

A granulação dos minerais supérgenos é muito fina, com indivíduos cristalinos de dimensões sub-micrométricas, ocorrendo em agregados policristalinos de diâmetros médios de 0,1 a 5mm. Segundo Mariano (1989b), os lateritos mineralizados em terras raras podem representar a maior fonte de ETR, em escala mundial, fazendo-se necessárias, no entanto, inovações tecnológicas para o seu aproveitamento.

3.4. Mineração e beneficiamento dos minerais de terras raras

Embora todos os ETR sejam processados e recuperados por várias empresas, a incapacidade de reduzir o preço de muitas das terras raras mais pesadas torna economicamente inviáveis algumas aplicações potenciais desses elementos. Entretanto, é

difícil para o metalurgista justificar a purificação de terras raras pesadas quando sua capacidade é melhor usada para processar terras raras leves, para as quais há uma demanda definida. Maior eficiência, aliada a baixo custo de processamento, podem abrir mercados para as terras raras pesadas no futuro. Isto é evidenciado pelo desenvolvimento de inúmeras novas aplicações para esses elementos, que acabam inibidas por seus altos custos (Roskill, 1998).

3.4.1 Bastnaesita

Na Califórnia, em Mountain Pass, a bastnaesita é explorada através de lavra a céu aberto. Na China, a bastnaesita também é minerada a céu aberto, como subproduto de beneficiamento de minério de ferro. Em Bayan Obo (ou Baiyunebo, conforme algumas citações), ela é separada dos minerais de ferro por flotação e concentração densitária (Roskill, 1998).

No passado, a bastnaesita foi também explorada em Nova Iorque e no Burundi por lavra subterrânea.

Em Mountain Pass, o minério de ETR consiste em 10% de bastnaesita, 60% de carbonatos (predominantemente calcita), 20% de barita-celestina e 10% de outros minerais, principalmente quartzo (Gupta; Krishnamurthy, 1992). A bastnaesita é concentrada por flotação mediante o emprego de ácidos graxos. O concentrado de terras raras obtido, com teor de 60% de OTR é comercializado ou então submetido à lixiviação com ácido clorídrico, e posterior calcinação, o que eleva o teor para 90% OTR, gerando um produto que, posteriormente, alimenta a planta química de separação dos elementos de terras raras (Gupta; Krishnamurthy, 1992; Roskill, 1998).

Os principais compostos de terras raras produzidos a partir da bastnaesita são concentrados de óxido de cério e um cloreto de terras raras livre de cério. Estes são preparados por aquecimento da alimentação para a remoção do CO₂ e oxidando o cério para produzir um composto com 85% de OTR. Lixiviação com ácido hipoclorídrico concentrado produz um resíduo de óxido de cério insolúvel e uma solução de cloreto de terras raras parcialmente isenta de cério. A individualização dos ETR pode ser obtida por extração por solvente ou por técnicas de troca iônica (Roskill, 1998).

3.4.2 Argilas com íons de ETR adsorvidos

As argilas com íons de ETR adsorvidos, encontradas em Jiangxi, China, são facilmente exploradas a céu aberto, em razão de sua natureza alterada. Usualmente, o

minério não requer moagem ou tratamento prévio ao processamento químico. Mais de 90% das terras raras são recuperadas por lixiviação do minério com amônia ou solução salina. Ácido oxálico é então adicionado precipitando o oxalato de terras raras. Após a filtração e calcinação, os oxalatos se convertem em óxidos de terras raras, resultando num concentrado com conteúdos típicos de óxidos de terras raras superiores a 90% (Roskill, 1998).

3.4.3 Monazita

A monazita é produzida predominantemente como subproduto da mineração de areias com minerais pesados, quando elas são explotadas pelo seu conteúdo de minerais de titânio e de zircônio. A baixa concentração de minerais pesados em praias e dunas requer a utilização de métodos mais baratos para sua concentração do que aqueles empregados para a bastnaesita. Dragagem é a técnica de lavra mais usual, embora muitos depósitos de monazita sejam também explotados pelo método de lavra em tiras. Os minerais pesados são inicialmente concentrados mediante a emprego de jigs, cones Reichert, mesas oscilantes ou espirais concentradoras. A monazita, mineral paramagnético e não condutor, é posteriormente separada dos demais pesados através de uma combinação de métodos, que envolvem separações eletrostáticas, magnéticas e densitárias (Roskill, 1998; Gupta e Krishnamurthy, 1992).

O fluxograma de processamento depende da assembléia mineralógica presente e dos minerais a serem aproveitados. Em geral, o processo a seco consiste de uma separação eletrostática visando a separação dos minerais condutores dos não condutores, nos quais se inclui a monazita e o zircão. Os não condutores são separados posteriormente através de separações magnéticas, uma vez que a monazita é magnética e o zircão não. Os concentrados de monazita normalmente apresentam teores entre 55 e 65% de OTR. Eles podem ser processados, através de rotas metalúrgicas, por métodos alcalinos ou ácidos (Roskill, 1998).

A recuperação das terras raras e a remoção do tório associado à monazita pode ser efetuada pelo emprego de vários processos, após o ataque químico do concentrado por ácido sulfúrico ou por hidróxido de sódio. O método mais utilizado, nos Estados Unidos, é o do ácido sulfúrico. Neste procedimento, dependendo da razão ácido/concentrado, temperatura e concentração, o tório ou as terras raras podem ser seletivamente solubilizados, ou então pode ocorrer uma solubilização total de todos esses elementos e, a seguir, as terras raras e o tório são recuperados da solução (Gupta e Krishnamurthy, 1992).

O processo de recuperação das terras raras baseado na precipitação desses elementos na forma de sulfatos duplos foi amplamente estudado por Pilkington e Wylie (1952, apud Gupta e Krishnamurthy, 1992). O ítrio e os sulfatos de terras raras pesadas são completamente solúveis e acompanham o tório. Na etapa seguinte de neutralização, o ítrio e as terras raras pesadas são precipitados juntamente com o tório. As terras raras, entretanto, são recuperadas da fração com tório durante a extração por solventes, usada para a remoção do tório e do urânio.

A extração por solventes com fosfato de tributil (TBP), numa solução com ácido nítrico, permite a recuperação do tório, do urânio, do cério e das demais terras raras (isentas de cério; Gupta e Krishnamurthy, 1992). Outro processo usado comercialmente envolve a precipitação do tório como pirofosfato ou sal básico, enquanto que as terras raras permanecem em solução como sulfatos duplos, fluoretos ou hidróxidos.

Outra alternativa utilizada para o tratamento da monazita envolve o emprego de soda cáustica. O fosfato presente na monazita, neste procedimento, é recuperado como subproduto, na forma de fosfato trissódico, logo no início do processamento, o que tem sido o maior atrativo para a utilização comercial deste procedimento. O desenvolvimento deste processo foi efetuado por Rohden e Peltier (apud Gupta e Krishnamurthy, 1992). Na prática industrial, monazita finamente moída é atacada com uma solução de hidróxido de sódio a 60-70%, à temperatura compreendida entre 140 e 150^o C. Na antiga União Soviética, a moagem e a digestão cáustica é realizada numa única etapa, o que reduz em 50% o consumo normal de soda.

O produto obtido, formado pela mistura de hidróxidos de terras raras e tório, pode então ser processado para a recuperação das terras raras e do tório, por diferentes métodos.

A dissolução direta do hidróxido de terras raras (misturadas) em ácido nítrico e a recuperação das mesmas pela extração do tório e do urânio com TBP é atrativa mas complicada, em razão da interferência causada pela oxidação parcial do cério. Um processo efetivo para remoção completa do tório em elevado estado de pureza é efetuado com a utilização de aminas.

Os processos alcalinos, usados pela Rhodia Rare Earths, consistem de uma abertura do concentrado de monazita com uma solução à quente de hidróxido de sódio, na qual são separadas as terras raras e o tório, na forma de hidróxidos. Os hidróxidos são lavados e dissolvidos em ácido clorídrico. O hidróxido de tório é precipitado pela adição de sódio ou hidróxido de amônia, restando os cloretos de terras raras, que são recuperados por evaporação ou são reprocessados através de extração por solventes, para a

individualização dos ETR. O processo alcalino é o preferido porque permite, mais rapidamente, a obtenção dos cloretos de terras raras e produz, também, fosfatos tri-sódicos comercializáveis como subproduto. Entretanto, o custo dos reagentes é elevado quando comparado aos utilizados no processo ácido, e esse processo não é aplicável a produtos com baixo teor.

No processo ácido, que é empregado para baixos teores de monazita, o concentrado é misturado com ácido sulfúrico concentrado à temperatura de 200° C, produzindo uma solução de sulfato de terras raras e tório. O tório é precipitado com amônia e pirofosfato de sódio. O sulfato duplo de terras raras reage posteriormente com hidróxido de sódio e depois com ácido clorídrico para produzir cloreto de terras raras (Roskill, 1998).

A monazita também pode ser processada no estado sólido. Através do emprego de carbonato de sódio e de uma pequena quantidade de fluoreto de sódio, ela é sinterizada a 700° C, produzindo óxidos de cério e tório. As terras raras restantes ficam como uma mistura de fosfatos duplos, podendo, a seguir, ser extraídas com uma solução diluída de ácido clorídrico. Este processo recupera cerca de 95% do total de terras raras contidos na monazita, entretanto não há descrições de como essa metodologia é utilizada comercialmente (Roskill, 1998).

3.4.4 Xenotima

A xenotima pode ser concentrada a partir de areias de praia ou de depósitos de pláceres por concentração densitária seguida de separação magnética e, eventualmente eletrostática.

Na Noruega, a Hydro Megon A/S, a maior processadora de xenotima, desenvolveu um processo de extração por solventes, onde o concentrado de xenotima é digerido por ácido sulfúrico à quente (Roskill, 1998; Gupta e Krishnamurthy, 1992). O ítrio é então dissolvido em ácido nítrico. A mistura é evaporada e tratada com amônia para a sua neutralização. Os elementos pesados são então precipitados, usando ácido oxálico. Após filtração, secagem e calcinação, é produzido um óxido de ítrio de alta pureza. Este processo também conduz à formação de vários subprodutos, particularmente de samário e gadolínio. A xenotima também tem sido utilizada diretamente por alguns processadores japoneses de terras raras.

3.4.5 Apatita

Os óxidos de terras raras contidos na apatita são recuperados, no processo de produção de ácido fosfórico e fertilizantes, em plantas localizadas na Federação Russa e na Polônia. Esse processo inclui lixiviação da apatita com ácido nítrico concentrado, neutralização dos ácidos silícico e fluorsilícico com nitrato de sódio, filtração e precipitação dos fosfatos de terras raras a partir do filtrado, através de neutralização parcial com amônia, dissolução do concentrado de terras raras em ácido nítrico e purificação final por precipitação com oxalato (Roskill, 1998).

3.4.6 Outras fontes

O refino de cobre pode produzir lamas ricas em terras raras nas células eletrolíticas e algumas refinarias comercializam estes produtos (Roskill, 1998).

As terras raras são extraídas da água do mar usada no resfriamento de plantas térmicas na Federação Russa.

Concentrados de ítrio são produzidos a partir de resíduos de lixiviação de urânio na mina de Denison Elliot Lake no Canadá, através de lixiviação, extração por solvente e precipitação.

Depósitos de perovskita representam, nos Estados Unidos, importantes recursos de nióbio e terras raras. Um processo de sulfatação ácida foi desenvolvido pelo US Geological Survey e extrai mais de 97% do titânio e nióbio e mais de 90% das terras raras como produtos advindos dos concentrados de perovskita; no entanto, o mesmo não foi implantado em escala industrial.

3.5. Aspectos econômicos

A extração comercial de terras raras é efetuada, essencialmente, a partir de:

- bastnaesita;
- íons adsorvidos em argilas;
- monazita;
- xenotima.

Altas concentrações de terras raras leves são encontradas na monazita e na bastnaesita; xenotima, mineral menos comum do que a monazita e ocorrendo em poucos depósitos, é uma fonte importante de terras raras pesadas e ítrio. Argilas são explotadas, no sul da China, pelo seu conteúdo adsorvido de terras raras. Essas argilas são formadas

como resultado do intenso intemperismo atuante em minerais de fósforo, tais como, apatita e a própria xenotima (Zhou et al, 1980). Na Federação Russa, a apatita é também aproveitada no seu estado natural (sem estar alterada), como fonte de terras raras (Roskill, 1998).

Concentrados de flotação obtidos a partir de bastnaesita, com teores da ordem de 60% de OTR, podem, posteriormente atingir valores de 70%, por lixiviação ácida e até 85%, pela combinação de lixiviação e calcinação.

Depósitos explotáveis de bastnaesita são formados por veios ou disseminações em complexos de rochas carbonato-silicatadas relacionadas a intrusões alcalinas, como em Mountain Pass, Califórnia (EUA), em veios de quartzo associados a mica-xistos e a quartzitos, no Burundi e em veios de fluorita e em brechas preenchidas em arenitos permianos no Novo México.

O depósito de bastnaesita melhor conhecido é o de Bayan Obo (ou Baiyunebo) na Mongólia Interior (China), onde é concentrada, juntamente com a monazita, a partir de um complexo de rochas metamórficas pré-cambrianas, explotadas inicialmente pelo seu conteúdo de minerais de ferro (magnetita e hematita; Zhou et al, 1980; Drew et al, 1990).

O maior depósito comercial de bastnaesita é o de Mountain Pass. Este é o único depósito no mundo que é explotado apenas pelo seu conteúdo em terras raras.

Minérios de íon-adsorvidos (também conhecidos como argilas íon-adsorvidas) são encontrados na província de Jiangxi, sul da China. Eles contêm terras raras e ítrio adsorvidos na superfície dos alumino-silicatos tais como caulinita e são possivelmente formados pela alteração intempérica de minerais fosfáticos. As argilas tendem a se enriquecer em terras raras médias a pesadas em detrimento das céricas.

As mais importantes fontes de monazita, hoje em exploração, dizem respeito a aluviões ou areias de praia, nos quais esse mineral, juntamente com outros pesados, foi concentrado por ação da água. Tanto areias de praia atuais como fósseis, com idades do Recente até o Terciário, são hoje aproveitadas economicamente.

A monazita é usualmente um subproduto do processamento mineral de areias para ilmenita, rutilo, cassiterita e zircão (a exemplo das areias do litoral fluminense). Nessas areias, o conteúdo de terras raras é baixo, variando entre 0,04% nos depósitos australianos e 0,43% para os brasileiros. Raramente um depósito é explotado pelo seu conteúdo primário de monazita; um exemplo disto foi a jazida de Ban Rhynsdorp na África do Sul, que representou a maior fonte mundial de monazita entre 1953 e 1963.

Os mais importantes depósitos de areias de praia, dos quais entre 1 e 20% dos minerais pesados presentes são constituídos por monazita, situam-se nas costas da Austrália, no Brasil (entre a Bahia e o Espírito Santo) e em Tamil Nadu e Kerala na Índia. Outras fontes de monazita, a partir de minerais pesados, estão localizadas no Sri Lanka, em Madagascar, na África do Sul, Malásia, Indonésia, China, Tailândia e nas Coreias. Na América do Sul, além do Brasil, ocorrem depósitos de areia de praia com monazita no Uruguai e na Argentina.

A mineração de monazita vem decrescendo desde o início de 1990, em razão dos problemas relacionados à radioatividade, decorrente da presença de tório associado a esse mineral.

Xenotima é aproveitada principalmente como subproduto de depósitos aluvionares de estanho na Malásia, Indonésia e Tailândia e como subproduto de minerais pesados advindos de areias de praia na Austrália. A xenotima contém mais de 62% de óxidos de terras raras e é a maior fonte de terras raras pesadas e ítrio.

Como já citado, os ETR podem substituir o cálcio na estrutura cristalina da apatita (que ocorre em carbonatitos, rochas alcalinas e ocasionalmente em depósitos marinhos). A recuperação de terras raras como subproduto a partir da apatita constitui-se num importante recurso potencial. Até o presente, as terras raras são extraídas apenas das apatitas da península de Kola, entre a Finlândia e a Federação Russa. Este depósito contém cerca de 1% de óxidos de terras raras.

A Tabela 3 traz as reservas mundiais de minerais de terras raras, publicadas em janeiro de 1998 pelo US Geological Survey (Roskill, 1998).

As reservas mundiais representam cerca de 100Mt de óxidos de terras raras contidos. Este total vem crescendo significativamente desde o início dos anos 80, com a inclusão das reservas chinesas.

A China apresenta reservas da ordem de 43Mt de OTR. Os recursos totais de OTR chineses foram estimados pela Sociedade Chinesa de Terras Raras em mais de 100Mt.

O depósito de Bayan Obo, localizado a 150 km de Baotou, na Mongólia, é a maior fonte mundial de minerais de terras raras e é hoje o responsável por mais da metade da produção chinesa. Outros depósitos de terras raras estão localizados em mais 18 províncias e regiões autônomas da China.

Tabela 3 - Reservas mundiais de terras raras, 1998 (Mt OTR)

País	Reserva provada	Reserva total
China	43,0	48,0
Federação Russa e Kirghizia	19,0	21,0
Estados Unidos	13,0	14,0
Austrália	5,2	5,8
Índia	1,1	1,3
Zaire	1,0	1,0
Canadá	0,94	1,0
Brasil	0,28	0,31
Malásia	0,03	0,035
África do Sul	0,39	0,40
Sri Lanka	0,012	0,013
Tailândia	0,001	0,0011
Congo	0,001	0,001
Outros	21,0	21,0
Total	100,0	110,0

Fonte: U.S.Geological Survey, Janeiro, 1998 (Roskill, 1998).

As mais importantes ocorrências da China situam-se no interior da Mongólia e na província de Shandong. As províncias de Guangdong, Guanxi, Fujian e Hunban apresentam reservas abundantes de monazita e xenotima, enquanto que na província de Jiangxi ocorrem reservas de argilas íon-adsorvidas.

Nos Estados Unidos situa-se o depósito de bastnaesita de Mountain Pass, Califórnia, que contém cerca de 4,3Mt de OTR. As reservas totais americanas somam 13,0Mt (OTR contidos), considerando a monazita proveniente de pláceres marinhos, à sudeste, e de pláceres fluviais, à noroeste, e nos sedimentos da plataforma continental do Atlântico.

As reservas australianas cresceram substancialmente na década de 80, somando hoje 5,2Mt.

As maiores reservas da Índia são provenientes de monazita de areias de praia, dos estados de Kerala, Tamil Nadu, Andhra Pradesh e Orissa. Reservas de pláceres estão localizadas nos estados de Bihar, Tamil Nadu e West Bengal. As reservas da Índia foram estimadas em 1,1 Mt de terras raras contidas (não incluindo os depósitos de areia de praia descobertos em Tamil Nadu e em Andhra Pradesh).

Outros depósitos importantes de terras raras estão associados à loparita e apatita na península de Kola, na República Russa (reservas totais estimadas em 19Mt).

3.5.1 Depósitos de terras raras no Brasil

Segundo Lapido Loureiro (1994), as ocorrências de terras raras no Brasil são numerosas e os recursos geológicos, importantes. Porém, apenas os pláceres marinhos relacionados a cordões litorâneos nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia estão em lavra, mas as suas reservas, da ordem de 45000 t de terras raras na forma de monazita, encontram-se em fase de exaustão. São explotadas pela INB - Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (Anuário Mineral Brasileiro, 1990, 1991; Silva, 1994).

De acordo com Lapido Loureiro et al (1989), três depósitos merecem ser destacados pelas suas reservas e teores. Esses depósitos, em razão de sua complexidade mineralógica, alta silicificação ou pela granulação e/ou estado de alteração dos minerais portadores das terras raras (entre outros fatores), não apresentam até o momento um equacionamento tecnológico adequado para o seu aproveitamento. São eles:

- Morro do Ferro, em Poços de Caldas (MG);
- Córrego do Garimpo, no complexo alcalino de Catalão (GO);
- Área Zero, no complexo carbonatítico de Araxá (MG).

Se forem consideradas as terras raras associadas a outros bens minerais e que podem, eventualmente, ser aproveitadas como subproduto, as reservas aumentam consideravelmente. É o caso das terras raras associadas à fluorita roxa de Mato Preto (PR; Lapido Loureiro e Tavares, 1978), e à cassiterita do Pitinga (AM).

3.5.1.1 Pláceres marinhos

Esses depósitos estendem-se no litoral desde o Rio Grande do Norte até o Rio de Janeiro.

Os pláceres marinhos e as restingas vêm sendo explotados, desde 1886, nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia (Maciel e Cruz, 1973; Anuário Mineral Brasileiro, 1990 e 1991).

São constituídos por uma associação de minerais pesados, sendo os mais abundantes a ilmenita (com proporções variáveis entre 42% e 95%), o zircão (3% a 24%), a monazita (0,5% a 18,8%) e o rutilo (0,1% a 4,2%), dentre outros (Lapido Loureiro, 1994).

No Rio de Janeiro, na região de Buena (ao norte e a sul), esses depósitos estendem-se por uma faixa de 18 km, com largura compreendida entre 50 e 100m, acompanhando a linha de praia, no sopé da Formação Barreiras. A mineralização ocorre na forma de lentes, com espessuras variáveis entre 0,1 e 0,3m e com até 60% de minerais pesados. Estas mineralizações são explotadas pelas Indústrias Nucleares Brasileiras (INB), sucedânea da NUCLEMON (Brito, 1995).

No delta do rio Paraíba do Sul, a estrutura desses depósitos é mais complexa, havendo uma integração faciológica intensa entre os aluviões, os sedimentos de brejo, lagoas e cordões litorâneos, resultando na concentração dos minerais pesados em lentes finas que se escalonam desde a superfície até uma profundidade de 4 a 5m (Lapido Loureiro, 1994). A assembléia mineralógica apresenta ilmenita (60%), zircão (5% a 10%), monazita (3% a 4%) e rutilo (1%).

No Espírito Santo, na região de Boa Vista e Guarapari, os depósitos de minerais pesados localizam-se em cordões litorâneos, no sopé da Formação Barreiras. Em Boa Vista, o depósito formou-se numa enseada com 2km de extensão e 150m de largura (Maciel e Cruz, 1973; Lapido-Loureiro, 1994).

São ainda referidos mais dois depósitos no Espírito Santo, um no Rio Sai, que apresenta bons teores de minerais pesados e de monazita, e outro em Linhares, que é relativamente pobre em minerais pesados (predominantemente ilmenita). No extremo sul do estado, existem ocorrências relacionadas a areias de deposição recente, tais como Saco dos Cações (na zona de pós-praia), Caculagem e Mãe-Bá (ambos na zona de espraiamento). Esses depósitos não contêm grandes quantidades de minerais pesados, mas são passíveis de aproveitamento econômico (Lapido Loureiro, 1994).

Na orla marítima do sul da Bahia desde Mucuri até Porto Seguro, são conhecidas ocorrências de areias monazíticas, associadas à ilmenita e outros minerais pesados, desde o século passado. Sua exploração data do ano de 1886, quando o inglês John Gordon se estabeleceu em Cumuruxatiba, jazida situada entre a ponta de Corurubaú e a foz do rio Jucuruçu (Vila de Prado). Muitos desses depósitos estão hoje exauridos, enquanto outros foram depredados pela extração desordenada e intensiva (Maciel e Cruz, 1973).

A aproximadamente 20 km de Cumuruxatiba, a partir da desembocadura do rio Jucuruçu, existe a formação de cordões litorâneos regressivos, separados por brejos e manguezais, com até 300 m de largura e 6 km de extensão, na região de Ponta de Guaratiba. Estes cordões apresentam excelentes concentrações de minerais pesados. Ao

sul de Alcobaça, esses cordões atingem largura máxima (de 10 km, em Ponta da Baleia), formando um depósito com bons teores e reservas razoáveis (Lapido Loureiro, 1994).

Na região de Belmonte, no delta do rio Jequitinhonha, há uma ocorrência de cordões litorâneos regressivos, formando cristas arenosas separadas por brejos e manguezais, podendo atingir uma largura de até 10 km, na qual foi medida uma reserva de monazita da ordem de 3600 t.

No litoral do Ceará, em Majorlândia, Beberibe e Paracuru também foram localizadas concentrações de minerais pesados. Estas diferem das anteriormente mencionadas pela baixa concentração de pesados (de 1,1 a 1,87%) e de monazita (0,55 a 4,12%), alto conteúdo de ilmenita (79,9 a 84,9%) e de zircão (13,2 a 18%).

No Piauí, em Luiz Corrêa, há uma ocorrência com características semelhantes às do Ceará, embora com menor proporção de minerais pesados (que são mais enriquecidos em zircão).

Existem ainda outras ocorrências em Salinópolis (PA); nas regiões de São Luís /Bacia do Barreirinhas e de Tutóia, no Maranhão; ao sul de Natal (RN), nas proximidades de Tibau, Cunhaú e Estrelas e no litoral paranaense, na região de Paranaguá, onde ocorrem areias ilmeníticas pobres em monazita.

3.5.1.2 Pláceres fluviais e depósitos colúvio-eluvionares

Segundo Lapido Loureiro (1994), os pláceres fluviais apresentam grande potencial como fontes de terras raras (monazita e xenotima), se estas forem consideradas como subprodutos de outros bens minerais, tais como cassiterita, columbita-tantalita, ilmenita, rutilo e ouro nativo. É o caso das redes de drenagem de certas áreas da Formação Barreiras, de alguns granitos e de complexos alcalinos.

Enquadram-se aqui os pláceres do rio Sapucaí, na região dos municípios de Turvolândia, Cordislândia, São Gonçalo do Sapucaí, Careaçú, Silvianópolis, São Sebastião da Bela Vista e Pouso Alegre (jazidas de ouro, com ilmenita, zircão e monazita), a região de São João del Rei (depósitos aluvionares de monazita e xenotima, resultantes do intemperismo sobre pegmatitos e gnaisses), em Minas Gerais; a mina do Pitinga (AM), onde os granitos albitizados (Corpos Água Boa e Madeira) apresentam mineralizações de estanho (cassiterita), zircão, columbita-tantalita, pirocloro, criolita e xenotima, a região central de Rondônia (cassiterita associada à monazita e xenotima; as bacias hidrográficas do rio das Almas (região dos municípios de Peixe e Paranã, TO), em rochas alcalinas, onde há bolsões pegmatíticos mineralizados a zircão, monazita, alanita, ilmenita, pirocloro,

niobatos e coríndon) e do rio Paraíba do Sul (RJ), onde é citada a presença de monazita e outros minerais pesados (zircão, rutilo e ouro).

3.5.1.3 Carbonatitos

Além de Catalão, outro carbonatito que merece destaque é o do Barreiro, ou de Araxá, situado a 6km ao sul da cidade do mesmo nome. Aqui, a mineralização de terras raras ocorre de três maneiras distintas (segundo Lapido Loureiro, 1994):

- constituindo um depósito de enriquecimento residual, formado por material terroso, conhecido por Área Zero;
- associada ao minério fosfático e
- associada ao minério de nióbio.

Na Área Zero, os estudos efetuados indicaram que as terras raras ocorrem como monazita e também estão distribuídas nas estruturas cristalinas da gorceixita, da florencita, da apatita, da pandaíta e possivelmente na goethita.

No minério fosfático, as terras raras estão contidas na apatita e nos fosfatos secundários (gorceixita e goiazita).

No minério de pirocloro (nióbio), o teor de terras raras é mais elevado do que o do próprio nióbio. Este material é constituído por limonita/goethita, barita, magnetita, gorceixita, monazita, quartzo, bariopirocloro (que contém cerca de 3,3% de OTR), ilmenita e outros.

O carbonatito de Tapira apresenta terras raras, com teores compreendidos entre 1 e 10%, associadas ao minério de titânio (na forma de anatásio).

Os estudos efetuados em Mato Preto, no município de Cerro Azul (PR), indicaram, para as terras raras, os seguintes aspectos (Lapido-Loureiro e Tavares, 1978; Lapido Loureiro, 1994):

- as mineralizações de fluorita, terras raras, tório e ferro/manganês estão associadas preferencialmente às rochas carbonatíticas e a seus produtos de alteração;
- os teores mais elevados de terras raras, tório e ferro estão nos ferro-carbonatitos (com valores de até 12,8% OTR; média de 7,7%);
- encontraram-se teores de até 9% nos solos residuais associados e valores médios de 3,9% nos carbonatitos e/ou rochas alcalinas;

- podem existir extensos depósitos de colúvio, contendo boas reservas ou teores de terras raras, nas proximidades de Mato Preto;
- como minerais de terras raras identificaram-se a monazita, a rabdofanita, florencita e niocalita. A fluorita (principalmente a roxa) também apresenta terras raras em sua estrutura cristalina.

Em Barra do Itapirapuã, as terras raras ocorrem na forma de fluorcarbonatos (bastnaesita-sinchisita, e ancilita). Segundo Lorenzi (1999), “a diversidade dos minerais portadores de terras raras, os diferentes teores em cada um desses minerais, a partição diferenciada dos lantanídeos, a intrincada morfoscopia dos cristais e agregados e as formas de ocorrência intimamente associadas com outros minerais são obstáculos para o equacionamento tecnológico visando o aproveitamento econômico deste depósito”.

No município de São Gabriel da Cachoeira (Alto Rio Negro, AM), no complexo de Seis Lagos, os estudos por difração de raios X revelaram a presença de monazita, cerita e minerais do grupo da crandalita (florencita e gorceixita). Em Angico dos Dias, as terras raras estão associadas à apatita e aos fosfatos dela originados (Maciel e Cruz, 1973). Em Fazenda Varela, Lages (SC), as terras raras ocorrem associadas a uma brecha feldspato-carbonatítica parcialmente alterada, formando minerais acessórios tais como sinchisita e monazita (Scheibe, 1989).

3.5.1.4 Depósitos hidrotermais plutogênicos

É o caso de Morro do Ferro, que se constitui de um “stockwork” de magnetita cortando rochas alcalinas. A rocha hospedeira da mineralização de terras raras corresponde a um siltito argiloso, por vezes, muito ferruginoso. Os minerais portadores de terras raras, identificados por microscopia eletrônica de varredura, são um silicato de terras raras, bastnaesita, zircão, coffinita, chlopinita e pirocloro, além de alanita (presença não confirmada pela maioria dos autores), bastnaesita, cerianita, torugumita, cheralita e fersunita (Wedow, 1967; Frayha, 1962; Viera e Lins, 1997).

3.6. Perfil da indústria consumidora

A indústria mundial das terras raras tem passado por rápidas mudanças, com o surgimento de novos mercados, desaparecimento de velhas aplicações, novas fontes e novos usos (Tourre, 1999; Abreu, 1991). Os produtos de terras raras são utilizados em uma grande diversidade de aplicações, tais como discos rígidos de computadores, leitores de CD, baterias, capacitores, pigmentos, cerâmicas, abrasivos para polimento, conversores catalíticos, catalisadores para petróleo, dentre outras.

Durante os últimos dez anos, os produtores de terras raras promoveram ajustes que afetaram seriamente toda a estrutura do mercado de terras raras, incluindo-se aí não só reservas, mas também preços. Isto ocasionou o surgimento de novos produtores (especialmente na China), o desaparecimento de outros e fez com que muitos voltassem seus esforços para segmentos específicos do mercado.

A Ásia apresenta as maiores reservas conhecidas de minérios de terras raras. Constitui o maior produtor de compostos intermediários de terras raras e é um dos maiores consumidores desses produtos.

Na última década, a China tornou-se o maior produtor desses compostos e é um importante centro exportador de terras raras isoladas. Hoje, a China possui cerca de 150 fábricas produzindo compostos de terras raras, muitas das quais apresentando dificuldades financeiras, em razão de algum desconhecimento sobre as necessidades do mercado, pouco controle dos canais de distribuição e produção a plena carga. Recentemente, os produtores chineses de terras raras reconheceram a situação e procuraram um caminho para racionalizar a produção desses elementos (Tourre, 1999).

Por outro lado, o Japão tem sido um dos maiores mercados para esses produtos, embora, nos últimos cinco anos, novos grandes mercados tenham surgido, tais como a Coreia do Sul, Taiwan e Malásia.

Em 1970, o consumo de terras raras foi de 15 mil toneladas, aumentando para 26 mil em 1983, 35 mil em 1990, atingindo em 1997 aproximadamente 45 mil, o que representa uma razão de crescimento de menos de 5% ao ano.

Nos anos 70, o mercado era dominado por aplicações que não exigiam a separação dos elementos (misturas não individualizadas). Nos anos 80, a demanda por elementos separados começou a nascer com as novas utilizações, tais como, fósforos (ítrio e európio) e magnetos (samário e, posteriormente, neodímio). Como consequência, as terras raras ítricas carregavam o custo induzido pelas céricas, que não precisavam ser comercializadas individualmente.

Em 1985, a situação começou a mudar com a utilização de novas fontes de terras raras (tais como as argilas íon-adsorvidas da China). Nessa época, esse tipo de minério tinha a melhor composição para servir às necessidades do mercado. Isto possibilitava aumentar a produção do ítrio e do európio, sem gerar grandes excessos de cério e neodímio.

Na década de 90, a demanda por óxidos separados e metais de terras raras, com purezas entre 95 e 99,999%, cresceu enormemente. O consumo mundial de terras raras

dobrou entre 1990 e 1997, passando de 33.000 t para 66.000 t de OTR, o que representa um crescimento anual da ordem de 10,4%.

Hoje, a demanda por terras raras ítricas é satisfeita principalmente pelo processamento de argilas íon-adsorvidas, enquanto que a de terras raras céricas é atendida pelo aproveitamento da bastnaesita. Essas duas fontes são usadas para suprir a demanda de terras raras não separadas, que tem permanecido estável nos últimos dez anos, na maior parte das aplicações.

O padrão de consumo de terras raras varia significativamente entre as principais áreas econômicas. O mercado japonês, o europeu e o americano são dominados por aplicações de alto valor agregado (predominantemente de terras raras isoladas, que representam mais de 75% da demanda), enquanto que no mercado chinês impera a utilização das terras raras não isoladas (catálise FCC, "mischmetal", concentrados céricos). A China também emprega a mistura de terras raras em corantes, fertilizantes e fibras para isolamento.

O mercado para terras raras isoladas cresce à razão de 8% ao ano; entretanto, a situação varia grandemente por segmento de aplicação. A demanda por compostos céricos tem se desenvolvido a uma taxa menor. A natureza da demanda é mutante, especialmente no segmento de catalisadores de automóveis, onde a mudança nas regulamentações de natureza ambiental requerem o emprego de compostos céricos altamente sofisticados.

3.7. Usos

As terras raras são utilizadas numa infinidade de aplicações, tais como:

- catalisadores de petróleo e para automóveis;
- polimento de vidros;
- ímãs permanentes;
- ligas;
- fósforos para televisão;
- semicondutores;
- capacitores cerâmicos;
- fertilizantes;
- refrigeração criogênica;

- fontes de raios X;
- indústria farmacêutica;
- cosméticos;
- fibras ópticas;
- vidros ópticos, dentre outras.

3.8. Produção e demanda

Em 1998, a China e os Estados Unidos dominaram a produção, com pequenas explorações no Brasil, Índia, Malásia, Sri Lanka, Federação Russa e Zaire.

A produção de terras raras nos Estados Unidos, em 1999, refere-se essencialmente à mina de Mountain Pass, na Califórnia. Os maiores usos para esta “commodity” foram como conversor catalítico na indústria automotiva, catalisador para craqueamento de petróleo, ímãs permanentes, compostos polidores para vidros, cerâmicas, aditivos para ligas metálicas e baterias recarregáveis. O consumo de produtos de terras raras aumentou da mesma forma que a economia doméstica se expandiu e a inflação começou a declinar (Hedrick, 2000).

O ítrio não foi produzido internamente em 1999. China, Japão e Reino Unido despontam como os mais importantes fornecedores de compostos desse elemento.

Os principais produtores de minérios de lantanídeos e de ítrio foram a China, a Índia e a Rússia, com a China dominando a oferta mundial. As principais fontes minerais fornecedoras desses elementos foram apatita, a bastnaesita, loparita, monazita e argilas lateríticas com terras raras. Os maiores processadores de minérios com lantanídeos e ítrio foram a China, a Estônia, a França, Índia, o Japão, o Cazaquistão, Noruega, Rússia, Ucrânia e o Reino Unido.

A demanda internacional por compostos de terras raras para uso como material de alimentação em refinarias, cresceu em 1999. A China foi o maior fornecedor de tório livre, cloretos e nitratos de terras raras (Hedrick, 2000).

A demanda por terras raras para uso em ímãs permanentes, baterias a base de hidretos níquel-metal e cloretos de terras raras também aumentaram. No Japão, a demanda de terras raras foi muito forte, principalmente por “mischmetal” (termo usado para a combinação de elementos de terras raras na forma metálica) enriquecido em lantânio, usado em baterias recarregáveis, neodímio usados em ímãs permanentes, óxido de cério para polimento de vidros, catalisadores automotivos e captadores de luz ultravioleta utilizados em vidros de automóveis, além de óxido de ítrio, usado em fósforos

vermelhos para televisão, monitores para computador, luzes fluorescentes e vidros ópticos para computadores pessoais.

A demanda mundial por escândio também se expandiu. Na China continua crescendo a demanda por produtos de terras raras para serem utilizados em televisores coloridos e sistemas de computação.

3.9. Preços

Até o final de 1999, os preços para quantidades padrão de concentrados de bastnaesita não lixiviados, lixiviados e calcinados, contendo, respectivamente, 60%, 70% e 85% de óxidos de terras raras foi de US\$ 2.87/kg, US\$ 3.20/kg e US\$ 3.86/kg. Para a monazita, o preço médio baseado nos valores de importação americana em 1997, foi de US\$ 440.00/t (Hedrick, 2000).

Em 1999, o preço dos metais cério e neodímio decresceu, enquanto que o do ítrio e do escândio aumentou. Os preços de outros elementos de terras raras permaneceu inalterado.

O preço do "mischmetal" também não se alterou em 1999 e foi da ordem de US\$ 5.00 a 7.00/kg.

Para os óxidos de terras raras, os preços variaram. Para o európio e o térbio, o preço subiu, com o aumento da demanda (lâmpadas fluorescentes). Os óxidos de cério, hólmio, lutécio e escândio apresentaram ligeira queda de preços.

Para os metais de terras raras de alta pureza, os preços variaram entre US\$ 27.00/kg, para neodímio grau magnético e US\$25,000/kg, para o lutécio grau destilado. O fornecimento de terras raras em 1999, originário principalmente da China, foi adequado para a demanda e limitou o aumento de preços no mercado mundial.

3.10. O complexo alcalino de Catalão

3.10.1 Localização e acessos

O complexo intrusivo ultramáfico-alcalino de Catalão I situa-se a sudeste de Goiás, no Município do Ouvidor, comarca de Catalão, situando-se a cerca de 23 km a nordeste da cidade de Catalão, a 10 km a norte da cidade de Ouvidor e a 280 km ao sul de Brasília (Figura 1; Ribeiro, 1998a). Suas coordenadas geográficas aproximadas são 47°48' de longitude oeste e 18°08' de latitude sul.

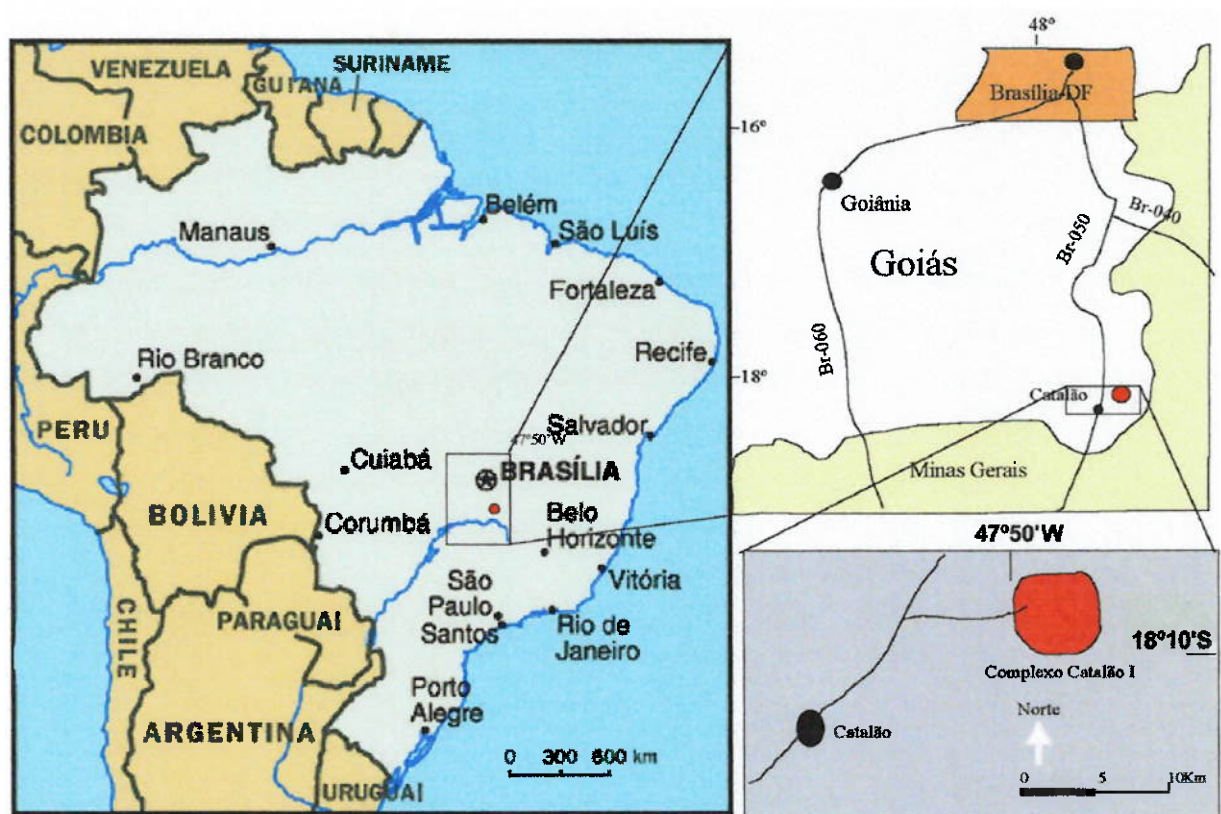


Figura 1 - Mapa de localização (Ribeiro, 1998a)

O maciço alcalino de Catalão I tem forma elíptica, com eixos NS de 6 km e EW de 5,5 km, e destaca-se na topografia como um proeminente platô, com altitude média de 900 m, que se eleva cerca de 100m em relação aos terrenos circundantes (Figura 2). É sustentado por rochas quartzíticas encaixantes que foram fenitizadas quando da intrusão do maciço. Está totalmente coberto por um manto de intemperismo, que pode atingir mais de 200 m (Carvalho, 1974a e 1974b).

Hoje, os trabalhos de exploração da jazida de fosfato expuseram uma grande quantidade de perfis ao longo de todo o maciço, o que contribuiu para uma melhor visualização do comportamento estrutural das mineralizações presentes, e modificaram, sobremaneira, os padrões de relevo e de drenagem originais.



Figura 2 - Imagem de satélite do complexo alcalino de Catalão

3.10.2 Geologia do complexo alcalino de Catalão I

O complexo de Catalão I tem idade cretácica superior (calculada em sienito por Amaral et al., 1967 em $85,0 \pm 0,9$ Ma e recalculada pelo método K/Ar em sienito por Sonoki e Garda, 1988, ou de $91,8 \pm 3,3$ Ma, obtida por Imbernon, 1993, em flogopitas) e pertence à província alcalino-carbonatítica do Alto Paranaíba.

É intrusivo em metamorfitos pré-cambrianos do Grupo Araxá, fenitizados ao longo do contato com o complexo alcalino, sendo composto por um núcleo de rochas ígneas de natureza sílico-carbonatítica, representado por ultramáficas, principalmente glimeritos e foscoritos (Perrault e Manker, 1984; Baecker, 1983; Carvalho, 1974b; Barbosa et al, 1970), com peridotitos e piroxenitos serpentinizados, cortados por veios e intrusões irregulares carbonatíticas (sovitos).

O complexo de Catalão I enquadra-se no tipo geométrico de complexos carbonatíticos anelares, apresentando uma sucessão de tipos petrográficos intrincados e confusos, resultantes de pelo menos cinco estágios de intrusões magmáticas carbonatíticas, alternados com processos de metassomatismo alcalino, em muito se assemelhando ao complexo carbonatítico de Sokli, na Finlândia (Perrault e Manker, 1984; Baecker, 1983; Carvalho, 1974b).

Carvalho (1974b) identificou quatro importantes processos de transformação a que foram submetidas as rochas deste complexo e que foram posteriormente confirmados por Lapido-Loureiro (1995). São eles:

- flogopitização;
- serpentinização;
- carbonatização e
- silicificação.

A flogopitização foi decorrência do intenso metassomatismo potássico a que foram submetidos os peridotitos e os piroxenitos originais, o que resultou em flogopita em substituição aos piroxênios e às olivinas iniciais (Lapido-Loureiro, 1995). Este processo estendeu-se por todo o corpo, com maior intensidade nas suas bordas e originou os glimeritos.

A serpentinização ocorreu de forma mais restrita, atuando sobre os piroxenitos e peridotitos.

A carbonatização foi muito intensa, o que é evidenciado não só pelos inúmeros veios de carbonatitos que cortam os glimeritos, os peridotitos e os piroxenitos serpentinizados, como também pela presença de carbonatos intersticiais nas rochas atravessadas por esses veios. Ela é mais intensa na parte central da estrutura, com a formação de um plug central, cujo teto encontra-se totalmente silicificado. O conjunto de veios com as rochas ultramáficas por eles cortadas é denominado silicocarbonatito.

Os silicocarbonatitos são compostos predominantemente por flogopita e subordinadamente por serpentina, que pode ganhar importância local.

Nos veios calcílicos (sovitos), correspondentes a duas ou mais gerações, observa-se também a presença de apatita e de flogopita.

Os silexitos estão distribuídos irregularmente por todo o complexo, evidenciado a intensa participação dos processos de silicificação; são muito abundantes na porção central da intrusão. Em profundidade aparecem por todo o complexo, havendo furos de sonda que atravessaram mais de 100m de silexito puro sem ter encontrado o carbonatito (Carvalho e Araújo, 1974; Carvalho, 1974b; Jager e Feitosa, 1978).

Além de quartzo e calcedônia, os silexitos contêm também magnetita, pirita, barita, apatita e minerais portadores de terras raras.

A partir do Terciário, todo o Planalto Central Brasileiro foi submetido a intensos processos de lateritização, o que para o Complexo de Catalão levou ao aparecimento de crostas limoníticas e solos lateríticos muito espessos (Neumann, 1999).

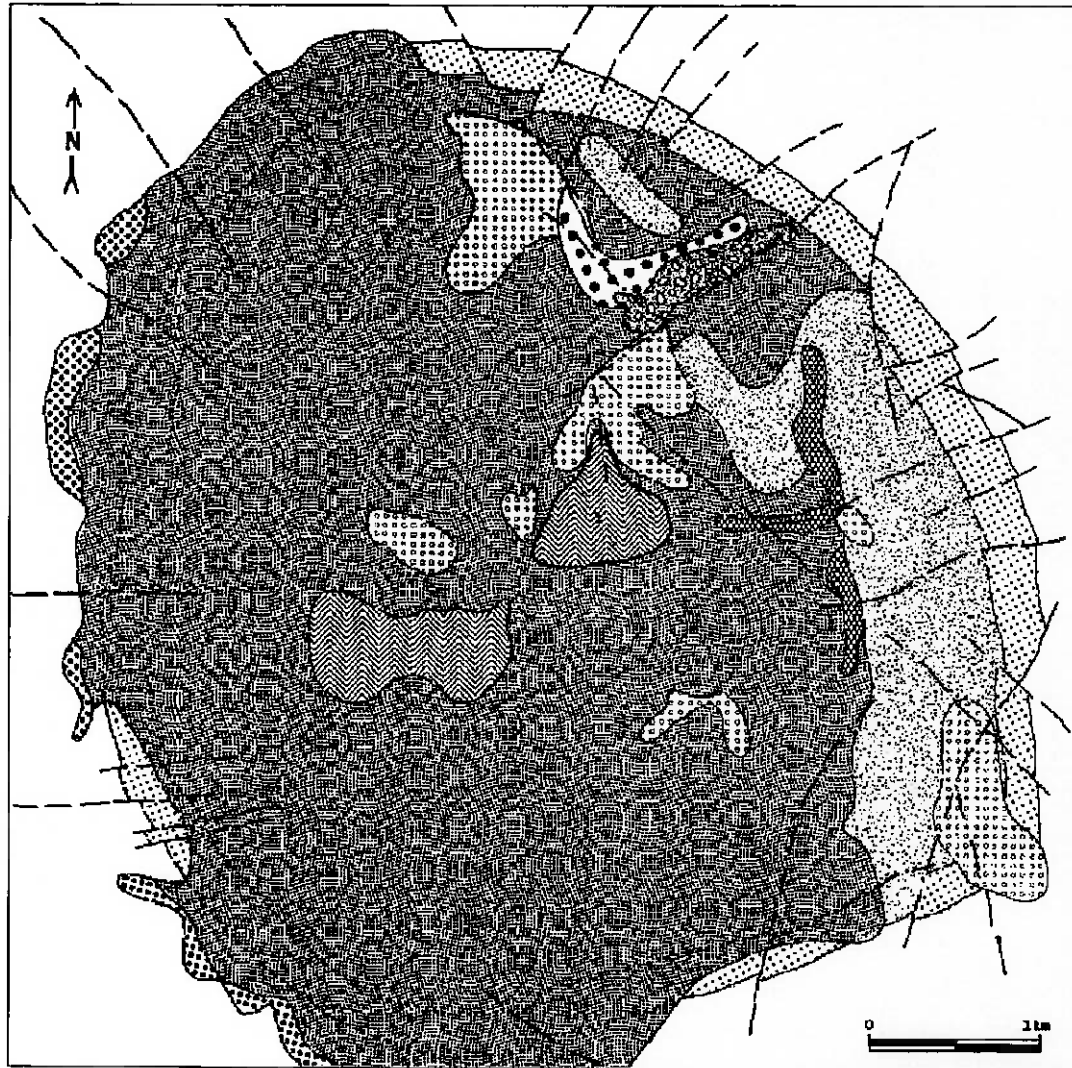
O domo foi preservado por um anel de quartzitos que circunda as rochas ígneas o qual foi truncado por uma superfície de aplainamento.

O manto de intemperismo que cobre o depósito, tem caráter laterítico e localmente atinge de 15 até 250 m de espessura, com as maiores espessuras ocorrendo principalmente na porção oeste da estrutura.

Segundo Sant'Agostino (1996), o mapa "geológico" do complexo (Figura 3) trata-se, em realidade, de um mapa pedológico, como consequência da escassez de informações sobre a rocha subjacente, devido ao espesso manto de alteração.

Manchas esparsas de crosta ferruginosa, caracterizadas pela presença de magnetita, são descritas em toda a área da intrusão. As cangas ricas em magnetita têm espessura inferior a 15 m, ocorrendo em aglomerados de grandes matacões, isolados, restos de extenso manto de lateritização que já cobriu a região.

A canga apresenta coloração escura, concrecionária, contendo magnetita em cristais centimétricos imersos em matriz microscópica de magnetita e outros óxidos de ferro; veios e cavidades preenchidas por quartzo submilimétrico são freqüentes (Baecker, 1983; Carvalho, 1974b).



LEGENDA
















	Sedimentos Recentes		Quartzito Fenitizado
	Solo Laterítico Rico em Magnetita		Contacto Detectado
	Solo Laterítico Rico em Vermiculita		Contacto Aproximado
	Laterita Nodular		Contacto Encoberto
	Canga Laterítica Rica em Magnetita		Falha Indiscriminada
	Conglomerado Limonítico		Falha Encoberta
	Sedimentos Argilosos da Lagoa Seca		
	Silxito		
	Metamorfitos		

Figura 3 - Mapa "geológico" (pedológico) do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, GO (adaptado de Carvalho, 1974a, e Baecker, 1983)

A maior expressão da canga rica em magnetita ocorre nas cercanias da Lagoa Seca, e, localmente cede lugar a uma canga contendo também nióbio, sempre cortada

por veios de quartzo submilimétrico (Baecker, 1983; Carvalho, 1974b; Jager e Feitosa, 1978; Carvalho e Araújo, 1974).

Como unidade de maior representatividade na intrusão, localizando-se na sua parte oeste, destaca-se um solo laterítico síltico-argiloso, amarelo a vermelho, contendo magnetita, ilmenita, martita, quartzo, barita e, eventualmente, apatita. Esta unidade caracteriza-se por apresentar elevada quantidade de magnetita e pouco quartzo. Forma horizontes de até 2 m de espessura, sendo provável produto da desagregação mecânica de crostas limoníticas; abaixo deles o solo mostra-se de coloração amarela, mais argiloso e friável, com menor porcentagem de magnetita. Esta unidade cobre cerca de dois terços da área total da intrusão (Baecker, 1983; Carvalho, 1974b; Jager e Feitosa, 1978; Carvalho e Araújo, 1974).

Ocorre, na borda leste da intrusão, um solo laterítico rico em vermiculita, pobre em magnetita, de coloração amarelada, argiloso, com seixos irregulares e concreções silicosas, além de ilmenita e anatásio. É produto de alteração dos glimeritos, ou seja, das rochas ricas em flogopita. Além do manto laterítico, ocorreu também a formação de pelo menos dois depósitos sedimentares argilosos associados ao preenchimento de paleolagos, sendo um deles denominado Lagoa Seca.

A mineralização associada ao manto de alteração é decorrente de enriquecimento supérgeno a partir do intemperismo químico das rochas intrusivas, tendo ocorrido também importante participação de processos hidrotermais de baixa temperatura com estágios de silicificação. Nesse manto foram delimitadas áreas contendo mineralizações de vermiculita, fosfato, titânio, nióbio e terras raras, como ilustrado na Figura 4 (Gierth, Leonards e Baecker, 1985; Baecker, 1983, Carvalho, 1974b).

Atualmente, no complexo alcalino de Catalão, estão sendo explorados minérios fosfáticos pela Ultrafertil (antiga Goiasfertil) e Copebras, além de nióbio pela Mineração Catalão de Goiás (minas 1 e 2). Reavaliação da mineralização de ETR do Córrego do Garimpo está sendo efetuada pela Ultrafertil.

Na depressão central da estrutura dômica, conhecida como Lagoa Seca, são encontrados sedimentos argilosos, de possível idade terciária, relativos a uma dolina de dissolução ou desmoronamento, localizada sobre o núcleo carbonatítico do Complexo, com preenchimento por material transportado das encostas vizinhas.

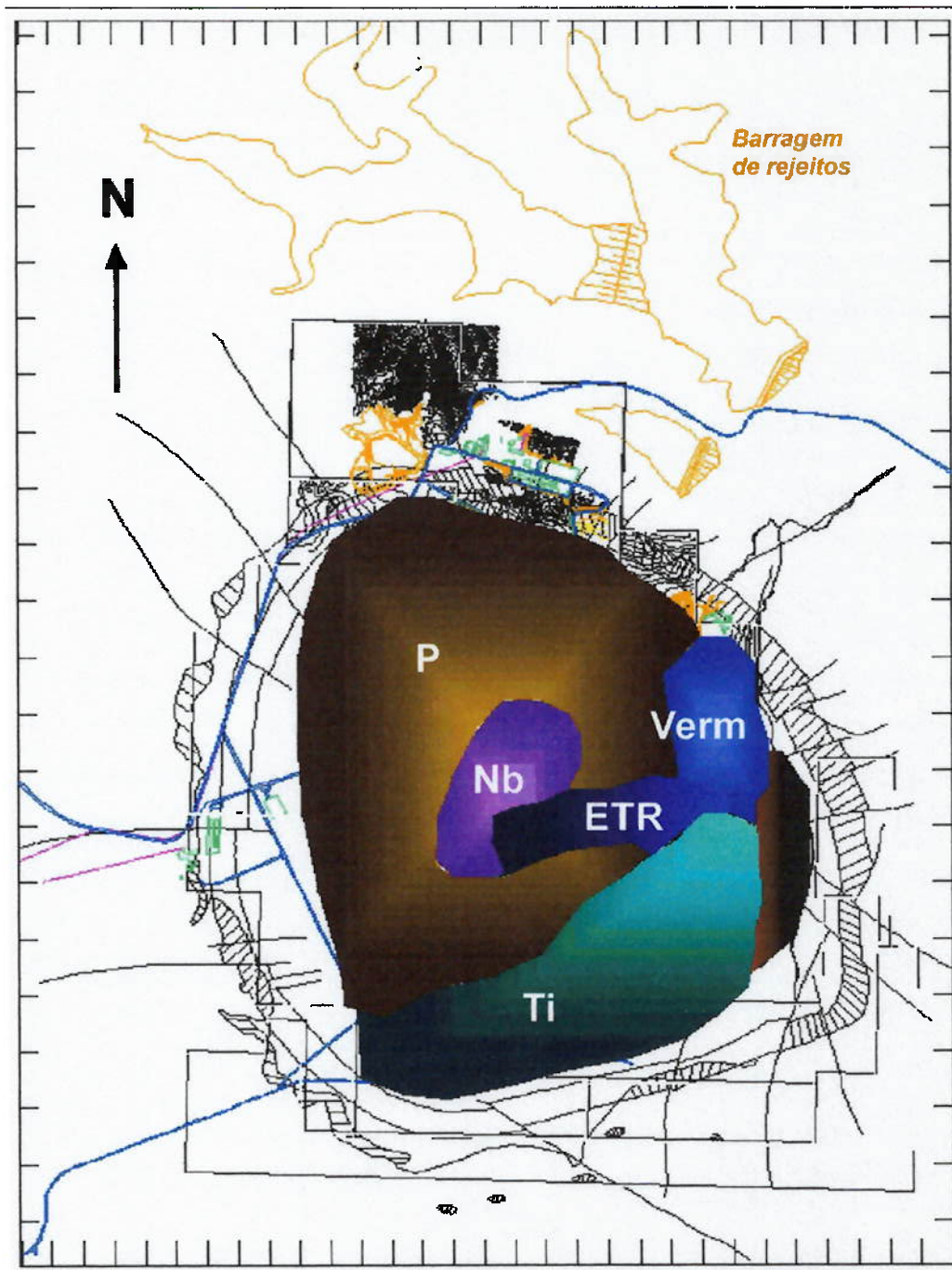


Figura 4 - Mineralizações observadas no complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I

Esse preenchimento apresenta espessura compreendida entre 30 e 150 m e é formado por argilas plásticas, caulínicas, de cor branca a cinza clara, contendo pequenos núcleos de matéria orgânica associada e eventuais cristais de vivianita. Nesse local também existe uma mineralização importante de terras raras, cujo potencial está ainda em fase de avaliação.

3.10.3 Estudos de caracterização mineralógica efetuados anteriormente

O primeiro estudo detalhado de mineralogia, efetuado em Catalão, é de Valarelli (1971), que determinou a composição mineral de diversas amostras coletadas em superfície e sub-superfície, nas quais observou minerais portadores de nióbio, titânio e terras raras, além de fosfatos.

Nesse trabalho, Valarelli (1971) identificou como minerais portadores de ferro e de titânio uma fase à qual chamou de titano-magnetita, que correspondia à magnetita com exsolução de ilmenita; maghemita (com tendência à recristalização para hematita), decorrente da transformação pseudomórfica da magnetita, através da oxidação de Fe^{2+} para Fe^{3+} e migração do titânio para as fissuras originadas pela contração do seu retículo cristalino; leucoxênio, mineral de aspecto terroso, com conteúdos variáveis de ferro e de titânio (podendo, pela saída total do ferro, dar origem ao anatásio), além de goethita, resultante da alteração da ilmenita por hidrólise do ferro, ou a partir da migração do titânio, como mencionado acima.

Dessa forma, a alteração dos óxidos de ferro ou de ferro + titânio promoveria a formação de hematita, goetita, limonita e anatásio.

Um outro mineral de titânio, a perovskita, $Ca(TiO_3)$, ocorre mais raramente, por vezes envolta por leucoxênio. Pseudomorfos de anatásio estão igualmente presentes e, possivelmente, são formados a partir da migração do cálcio presente na estrutura cristalina da perovskita. Do grupo da perovskita, Valarelli (1971) identificou a loparita, cuja fórmula é $(Ca, Na, Ce)[(Ti, Nb)O_3]$, atribuindo a ela os teores anômalos de terras raras e nióbio.

Ele identificou ainda pelo menos três espécies de pirocloro: um vítreo, de coloração amarela clara a castanha, designado na época por kopita (pirocloro normal); um semi-vítreo, citrino escuro, onde havia a substituição de nióbio por ferro e titânio e um de cor creme ou de carne, apresentando bário em sua estrutura (pandaíta). Esses pirocloros ocorrem normalmente associados, havendo uma substituição dos dois primeiros pela variedade mais rica em bário (troca do cálcio e do sódio por bário e estrôncio e do oxigênio por hidroxila)

Fosfatos secundários, da série da crandalita, intimamente associados à limonita e ao leucoxênio também foram descritos por Valarelli (1971); estes minerais, com aspecto terroso e argiloso, ocorrem na forma de concreções esféricas, agregados microcristalinos ou fibrosos ou como impregnações associadas a outros minerais. Segundo o autor, são originários da dissolução dos fosfatos primários (apatita e monazita). O principal fosfato secundário presente é a florencita, seguido pela gorceixita. Trabalhos mais recentes

(Imbernon, 1993; Oliveira e Imbernon, 1998) não encontraram florencita, tendo sido identificadas apenas a gorceixita, como fosfato secundário predominante e a goiazita - gorceixita ocorrendo subordinadamente.

Valarelli (1971) identificou também vivianita, svenbergita e rabdofanita, citando ainda hinsdalita, monetita, colofânio, osarizawaíta, lusungita e hidalgolita. Como fases comuns, esse autor descreveu apatita, quartzo e barita, além de argilominerais, tais como, biotita, vermiculita e flogopita (prováveis resíduos da rocha fresca), caolinita, clorita e serpentina; citou ainda, de forma não muito conclusiva, ancilita, zircão, badeleíta, tapiolita, parisita, ilmenorutilo, pirofanita e columbita.

Imbernon (1993) efetuou um estudo para determinar as tendências gerais do processo de alteração intempérica atuante sobre as rochas do complexo, determinando a composição química e mineralógica preliminar dos materiais encontrados no perfil de alteração.

Lenharo (1994) estudou as apatitas provenientes de sete depósitos de fosfato, associados a complexos alcalino-carbonatíficos, através de diversas técnicas, o que possibilitou a determinação das suas características morfológicas, cristalográficas, químicas e tecnológicas. Concluiu que, em Catalão, a apatita primária é uma hidróxi-fluorapatita rica em estrôncio e a secundária é uma carbonato-fluorapatita. A análise química para terras raras em alguns concentrados purificados de apatita indicaram valores compreendidos entre 2900 e 9900 ppm (média de 6600).

Neumann et al (1994) publicaram um trabalho de caracterização mineralógica desenvolvido sobre o material silexítico. A análise química dessa amostra indicava um teor de terras raras totais de 10,8%, com predominância de terras raras leves. Esses autores concluíram que o material silexítico é composto por quartzo, que representa cerca de 70% da amostra, monazita (18%), óxidos-hidróxidos de ferro (com predominância de goethita, hematita e magnetita, num total de 11%) e pirrotita e identificaram a monazita como o único mineral portador de terras raras. Esta, por sua vez, ocorre na forma de agregados esferoidais com diâmetro aproximado de 10 μm , disseminados numa matriz de quartzo fina. Em função do tamanho desses agregados, a liberação da monazita em relação à matriz quartzosa é extremamente baixa, o que permitiu, a esses autores, antever a inviabilidade da concentração física desse material (pela necessidade da utilização de uma moagem à granulação fina para a liberação monazita-quartzo).

Pereira (1995) identificou pelo menos três gerações distintas de apatita (uma associada aos foscoritos; associada ao carbonatito soviético e os veios apatíticos responsáveis pela mineralização em si), com teores de CeO_2 compreendidos entre 0 e

1,77% (com média de 0,37%) e de La_2O_3 entre 0 e 0,41% (média de 0,19%). Como fosfatos de terras raras, foram identificados minerais do grupo da crandalita (gorceixita identificada, por difração de raios X, em apenas algumas amostras denominadas, por esse autor, como silicito).

Sant'Agostino (1996), em seu trabalho de caracterização tecnológica voltado para o possível aproveitamento do material mineralizado a nióbio de Catalão (área Ultrafertil, antiga Goiásfertil), concluiu que os fosfatos portadores de terras raras predominantes são a gorceixita e a monazita.

Morteani e Preinfalk (1996) estudaram os diferentes horizontes do perfil de Catalão e de Araxá. Concluíram que, em Catalão, o conteúdo de terras raras no horizonte de solo varia entre 0,4 e 3,4%, com valor médio de 1,9%; no laterito variam entre 0,7 e 3,7% (média de 1,3%) e no saprolito entre 0,4 e 1,5% (média de 1,0%); nas rochas alcalinas, o conteúdo médio de terras raras é de 0,9% e nos silcretos entre 4,7 e 12,7% (média em torno de 10%).

Na rocha alcalina original, segundo esses autores, os minerais portadores de terras raras seriam a apatita e o carbonato (calcita). Durante os processos de lateritização, a calcita e posteriormente a apatita se dissolveriam, liberando as terras raras, possibilitando a sua incorporação por outras fases minerais. Na fase saprolítica da alteração, os principais carreadores de terras raras seriam a apatita primária residual e a apatita secundária e possivelmente os alumino-fosfatos, tais como a gorceixita, sendo que estes últimos minerais tornar-se-iam os principais portadores de terras raras na laterita (cobertura) e nos horizontes de solo. Entretanto, os hidróxidos de ferro também seriam fortes candidatos a absorver quantidades significativas de terras raras (o que foi observado no caso de Araxá).

No silicito, esses mesmos autores identificaram a monazita como o principal mineral portador de terras raras. Esta apresenta-se na forma de agregados concêntricos, com camadas externas de cerianita.

Ainda em 1996, Aquino e Albuquerque efetuaram, no material laterítico de Catalão, um trabalho de caracterização mineralógica-tecnológica, através de microscopia óptica. Esses autores encontraram, para o material em questão, um teor de terras raras de 9,9% e determinaram que a liberação da monazita (associada com os óxidos de ferro) variava entre 31% (para a fração acima de $34,8 \mu\text{m}$) e 79% (para a fração $-25,8+17,7 \mu\text{m}$).

Viera et al (1998) determinaram a composição mineralógica de um material com teor de 6,8% de OTR, tendo encontrado, como único mineral de terras raras, a monazita;

segundo esses autores, esta pode estar liberada ou finamente intercrescida com óxidos e hidróxidos de ferro, quartzo, apatita e ilmenita.

Neumann (1999) efetuou uma caracterização tecnológica dos “potenciais tipos de minério” de terras raras de Catalão, com o objetivo de fornecer subsídios para o desenvolvimento de rotas de beneficiamento (por métodos físicos ou metalurgia extrativa). Ele estudou amostras correspondentes ao material silicítico, ao laterítico e ao carbonatítico. Para as três amostras, esse autor identificou a monazita como sendo o principal mineral portador de terras raras, tendo identificado, ainda, a presença de cerianita em pequenas proporções. Efetuou estudos exaustivos de liberação da monazita por análise de imagem (com correção estereológica), em produtos que foram inicialmente submetidos a separações minerais por fração granulométrica. Em todas as amostras, a monazita apresenta baixíssima liberação, ocorrendo intimamente associada com os óxidos-hidróxidos de ferro, apatita e fosfatos secundários.

Toledo (1999) efetuou um estudo de caracterização, visando obter informações do ponto de vista mineralógico, micromorfológico, geoquímico e cristalquímico dos principais minerais portadores de fósforo (apatita, monazita e alumino- fosfatos) presentes em Catalão, evidenciando a variabilidade de sua composição ou de geração, em função de sua evolução no perfil laterítico.

Tassinari e Kahn (1998a, 1998b) e Tassinari et al (1998, 1999, 2000, 2001 e prelo) desenvolveram estudos de caracterização mineralógica / tecnológica em várias amostras provenientes do depósito do Córrego do Garimpo, visando, ainda, avaliar as possibilidades de concentração dos minerais portadores de terras raras, através da utilização de uma rota de processamento físico. Esses estudos culminaram com a definição de um ensaio padrão, que foi executado para diferentes tipos de materiais do depósito, gerando produtos que foram posteriormente submetidos a ensaios de abertura química da monazita. Todos esses estudos estão detalhados na seqüência desta tese.

4. Áreas estudadas

Foram estudadas duas áreas mineralizadas a terras raras, que ocorrem associadas ao domo alcalino - carbonatítico de Catalão I, área Ultrafertil:

- a primeira, correspondente à mineralização no vale do Córrego do Garimpo;
- a segunda, à mineralização localizada na área da Lagoa Seca.

Estas duas áreas estão descritas na seqüência.

4.1. O depósito de terras raras do Córrego do Garimpo

4.1.1 Histórico

No decorrer da pesquisa de fosfato, realizada pela Metago (Metais de Goiás) durante a década de 70, verificou-se, no vale do Córrego do Garimpo, a presença de afloramentos de sillexito associado a minerais pulverulentos, de coloração verde clara e granulação muito fina, que foram identificados, na época, como monazita hidratada (rabdofanita).

Posteriormente, com a execução da malha de sondagem para a definição do depósito de fosfato, observaram-se teores elevados de óxidos de terras raras (OTR), a profundidades compreendidas entre 0 e 50m. Os teores de óxidos de terras raras (principalmente cério e lantânio), localmente, ultrapassavam 15%. Este depósito recebeu, então, o nome de Córrego do Garimpo.

Após esta descoberta, a Metago realizou 23 furos de sondagem, numa malha de 200 X 200 m, em concordância com a já estabelecida, totalizando cerca de 1220 m perfurados, que vieram a confirmar a potencialidade da área para terras raras. À época, a empresa privilegiou a execução de furos com profundidade média de 50 m, por tratar-se de uma fase preliminar de pesquisa do depósito para fosfato e pela urgência da obtenção de dados visando a elaboração e encaminhamento dos relatórios ao DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral).

As análises dos testemunhos obtidos revelaram teores altamente promissores de OTR, compreendidos entre 2% e 29%, o que motivou a abertura de uma galeria de pesquisa, com o objetivo de verificar o comportamento lateral da mineralização, bem como obter volume expressivo de material para testes de concentração. Entretanto, devido à inconsistência do terreno e à presença de grandes blocos de sillexito, esta galeria foi abandonada após 5 m de avanço.

Nessa época, efetuaram-se estudos sobre esse material, com objetivo principal de promover a identificação mineralógica dos portadores de terras raras e avaliar a dimensão desses minerais. Esses trabalhos revelaram, de forma geral, trataram-se de minerais de granulação extremamente fina (inferior a 1 μm ; Valarelli, 1971; Mariano, 1975; Ribeiro, 1998), embora também estivessem presentes partículas da ordem de 20 μm .

No início dos anos 90, através de um convênio firmado entre o CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) e organismos da comunidade europeia, passou-se a estudar as ocorrências e depósitos de terras raras brasileiros, com o intuito de se garantir outras alternativas de fornecimento além da China.

Esse projeto fez com que a Metago retomasse os estudos sobre essa área, com autorização da Goiasfértil, e elaborasse um relatório técnico com todas as informações disponíveis até aquela data, vislumbrando importantes recursos de minerais de terras raras, a despeito do caráter preliminar dos estudos existentes.

Os recursos minerais referentes à mineralização de ETR, em toda a área de interesse da Metago (atual Ultrafértil), são apresentados no quadro da Tabela 4, sendo que, aqueles referentes à área do Córrego do Garimpo são os que apresentam teores superiores a 4% de $\text{CeO}_2 + \text{La}_2\text{O}_3$ (Carvalho, 1974a).

Tabela 4 - Quadro das reservas do material mineralizado à terras raras - Córrego do Garimpo

$\text{CeO}_2 + \text{La}_2\text{O}_3$ (%)	Medida (t)	Indicada (t)	Inferida (t)	Medida + indicada (t)
> 2	22.504.860	45.301.356	10.858.000	67.806.216
> 4	4.626.529	10.511.719	-	15.136.248
> 6	1.079.890	6.967.080	5.019.600	8.046.970
> 8	676.400	2.989.332	5.019.600	3.665.732
> 10	534.000	2.634.400	5.019.600	3.168.400
> 12	391.600	2.064.800	-	2.456.400

Como resultado dos trabalhos efetuados, definiu-se que a principal zona mineralizada a terras raras localiza-se no vale do Córrego do Garimpo, formando um corpo estreito que se alonga no sentido E-W. Esta faixa ocorre associada a silixitos (carbonatitos silicificados) e produtos de alteração (saprolitos), com teores aumentando sensivelmente com a profundidade. Os elementos de terras raras predominantes são o cério e o lantânio, embora estejam presentes também o európio, praseodímio, neodímio e samário, dentre outros.

A cobertura vegetal nativa presente na área do Córrego do Garimpo, pode ser observada na Foto 1.



Foto 1 - Aspecto geral da mata nativa que cobre a área do depósito do Córrego do Garimpo

Após a privatização da empresa detentora da área em questão (Goiasfertil), foram efetuados, em 1996, três furos de sondagem profundos, com o objetivo de verificar as informações pré-existent sobre o depósito, uma vez que os testemunhos originais, obtidos pela Metago, não mais existiam e também na tentativa de identificar as possíveis rochas responsáveis pela mineralização. Essas sondagens, que totalizaram cerca de 750 m e cortaram todo o corpo mineralizado, confirmaram os altos teores de terras raras encontrados anteriormente e sugeriam como fonte da mineralização um carbonatito magnesiano rico em monazita, e não o silexito como se supunha originalmente.

A partir dessas sondagens, foi possível estabelecer três fatos importantes:

- verificou-se que a mineralização de terras raras está associada basicamente a três tipos litológicos distintos, a saber:

⇒ silexitos;

- ⇒ saprolitos, ou carbonatito decomposto por processos intempéricos, constituído por material de aspecto terroso, argiloso, com manchas esverdeadas de monazita fina disseminada;
- ⇒ carbonatito, rico em cálcio e magnésio, além de ferro, apresentando indícios de silicificação. Está situado abaixo dos saprolitos e acima da zona de rochas frescas, gradando, abaixo de 200m, para um carbonatito praticamente isento de cálcio e muito rico em magnésio (na forma de magnesita).
- a mineralização se estende em profundidade por todo o perfil estudado, aumentando a espessura, inicialmente avaliada pela Metago, de 50 m para cerca de 150 m, elevando substancialmente o potencial das reservas geológicas;
- os silexitos, que anteriormente representam praticamente a totalidade da mineralização conhecida à época da Metago, correspondem a cerca de 40%.

Face ao potencial detectado na área do Córrego do Garimpo, em 1997, a Ultrafertil (detentora da área após a privatização) firmou um convênio com a INB – Indústrias Nucleares Brasileiras (empresa sucedânea da Nuclemon – Minerio Química Ltda) para o tratamento químico da monazita aí contida, obtendo produtos industriais de terras raras para consumo interno e, eventualmente, exportação (Barros e Rosenthal, 1999).

Essa associação foi resultado da constatação de que a potencialidade do depósito de terras raras de Catalão fazia necessária a busca de um parceiro com tradição no setor de processamento químico de terras raras e com penetração nos mercados nacional e internacional.

Esse convênio tinha como objetivo a execução dos serviços que se fizessem necessários para a definição das reservas minerais de terras raras, os estudos de processo de concentração física e de abertura química dos concentrados, a caracterização dos produtos obtidos e o estudo de viabilidade técnico-econômico e financeiro para a implantação de um empreendimento mineiro-químico, visando a exploração do depósito mineral em pauta. Nesse convênio, a Ultrafertil ficou responsável pela execução dos estudos físicos, cabendo à INB o desenvolvimento dos processos químicos e, para ambos, a realização dos estudos econômicos.

Dessa forma, tornou-se imperativa a continuidade dos trabalhos e, ainda em 1997, iniciou-se uma nova campanha de sondagem, com cerca de 1500 m programados, distribuídos em 23 furos, para a definição das características do depósito.

Efetuararam-se sondagens rotativas (diâmetros Nw e Bw), com amostragem por embuchamento, uma vez que esse trabalho concentrou-se na parte do depósito intemperizado ou saprolitizado. A decisão de investigação para bloqueio de reserva apenas da porção alterada ocorreu em função de:

- teores mais elevados nessa região, evidenciados nos trabalhos anteriores,
- características do material a ser perfurado (mais mole do que o silexito),
- processo físico que estava sendo vislumbrado para o aproveitamento desse material e pela sua posição de lavra, nos níveis mais superiores próximos à superfície e muitas vezes aflorante.

As atividades de sondagem são ilustradas na Foto 2 e os testemunhos de sondagem com os principais tipos litológicos na Foto 3.

A malha de sondagem empregada não foi regular, pois levou em consideração os resultados das sondagens antigas (seleção de sítios mais interessantes) e as dificuldades relacionadas à perfuração nas áreas mais silexíticas.

A Figura 5 mostra em planta, a locação dos furos. Os furos assinalados entre aspas referem-se à campanha realizada pela Metago, na década de 70, cujos testemunhos não existem mais.

Os testemunhos foram descritos e amostrados por litologia, fixando-se o intervalo máximo de amostragem em 2 m. Cada um dos intervalos de 2 m foi submetido, na Ultrafertil, à secagem e redução granulométrica (entre 1 e 2 mm), para possibilitar a retirada de alíquotas representativas (com massas ao redor de 500 g), que foram então encaminhadas para análises químicas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP (LCT).

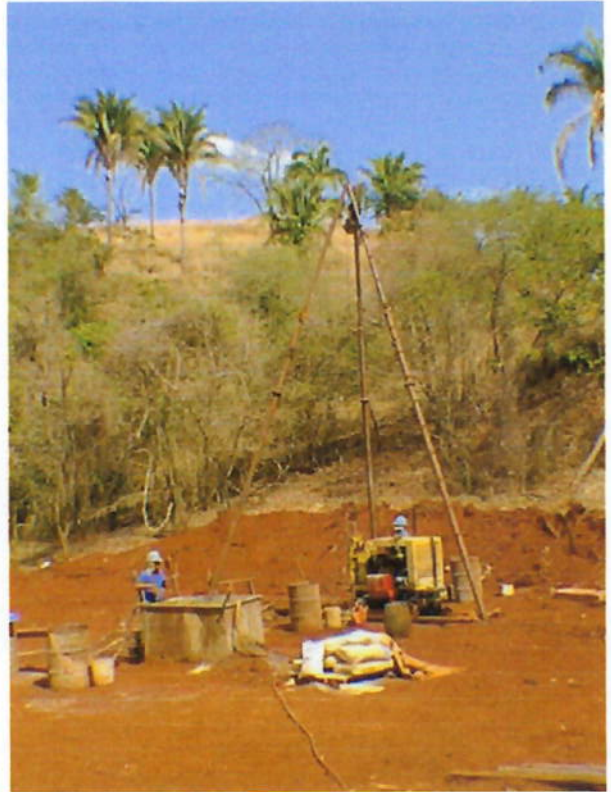


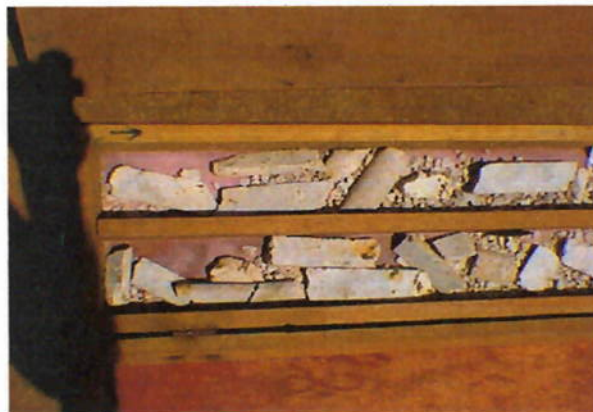
Foto 2 - Trabalhos de sondagem na área do Córrego do Garimpo



Material tipo silexito



Material tipo silexito ferruginoso



Material tipo carbonatito



Material tipo carbonatito alterado

Foto 3 - Testemunhos de sondagem da área do Córrego do Garimpo

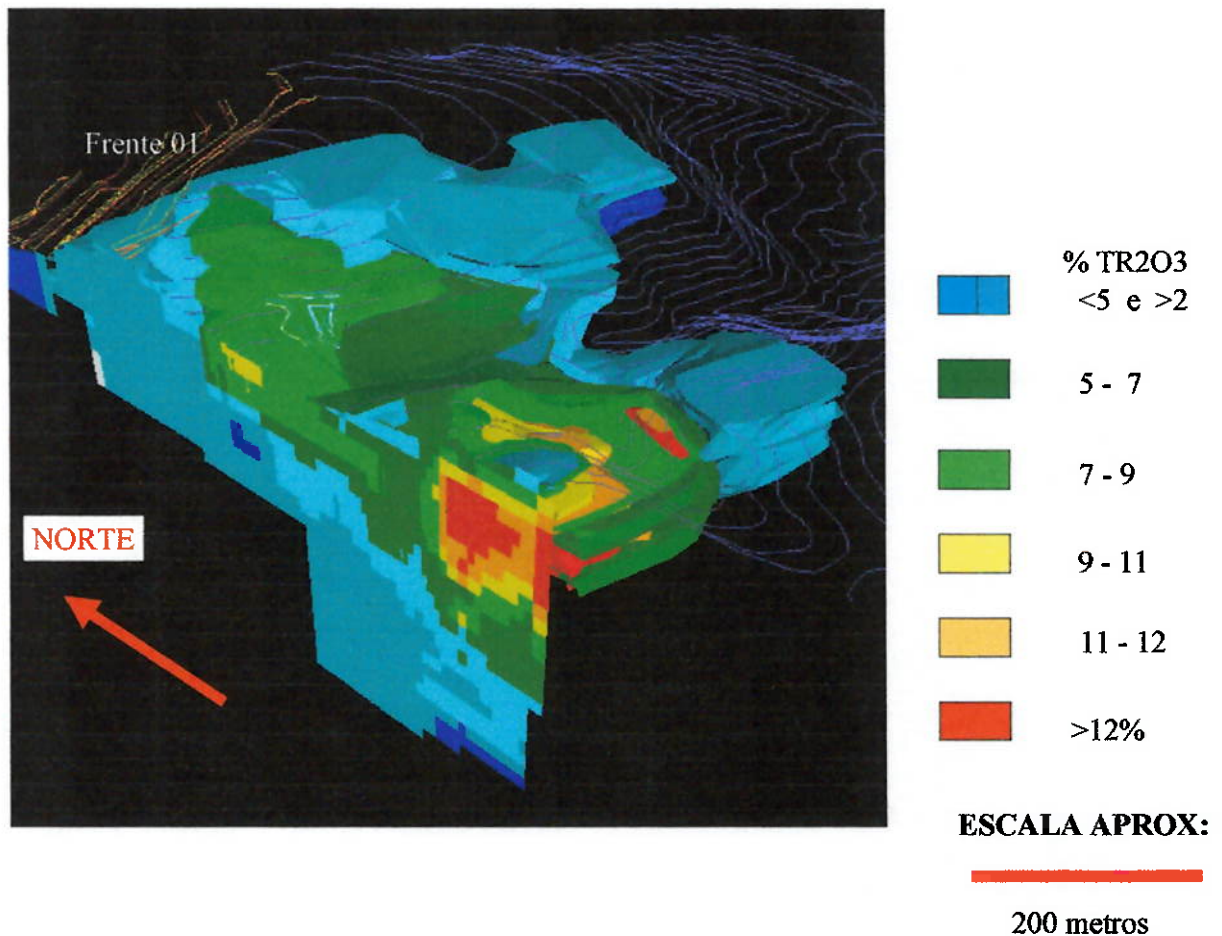


Figura 6 - Modelo de blocos com teores de OTR - Córrego do Garimpo

A partir do modelamento efetuado, decidiu-se, ainda, pela abertura de uma trincheira, com o objetivo não só de visualizar melhor as relações de contato entre as diversas litologias, mas também fornecer amostras de grande volume para a realização dos testes de processo.

Efetuuou-se, nessa trincheira, uma amostragem volumétrica (cerca de 3 t de material), onde foram reconhecidos 2 tipos distintos de material e que foram caracterizados na seqüência dos trabalhos.

A Foto 4 ilustra a trincheira que foi aberta; a porção a esquerda é constituída essencialmente por silexito e a da direita, por saprolito mais terroso e de mais fácil desagregação.

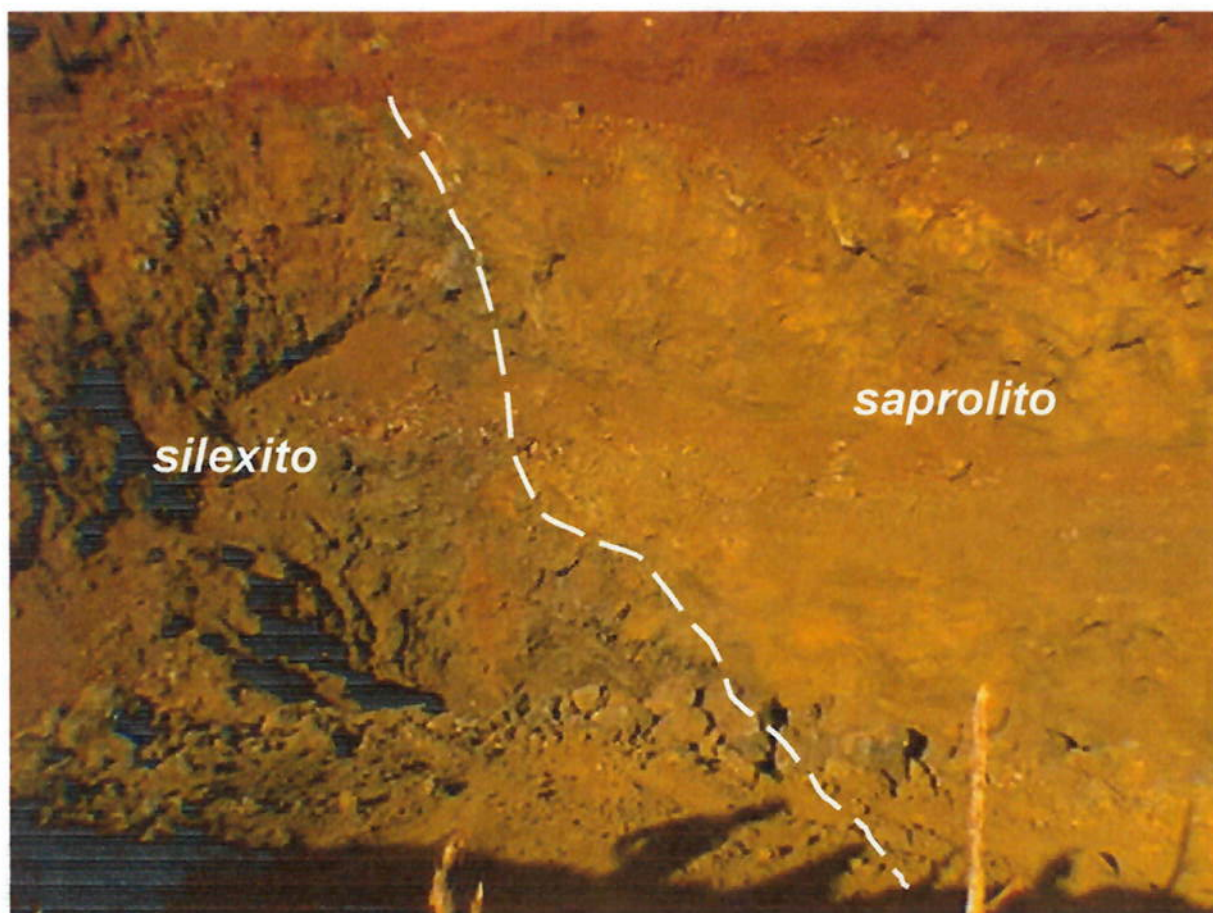


Foto 4 - Trincheira aberta no depósito do Córrego do Garimpo

4.1.2 A monazita de Catalão I

Na área do Córrego do Garimpo, a monazita ocorre associada aos carbonatitos, aos silexitos e aos materiais lateríticos deles provenientes.

Segundo Toledo (1999), as monazitas presentes em Catalão I possuem características morfológicas, geoquímicas e cristaloquímicas próprias que as diferenciam das demais monazitas. Para o estudo desse mineral, essa autora utilizou várias técnicas analíticas para a definição de suas características cristaloquímicas. Dessa forma, efetuou "análises por difração de raios X, análise térmica diferencial e termogravimétrica e espectroscopia de absorção no infra - vermelho sobre pó de concentrados monazíticos obtidos por separação manual ou com broca, à lupa ou a olho nu. Microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura com sistema de análise por EDS (MEV-EDS), microssonda eletrônica (ME) e microespectroscopia Raman (MR) foram aplicadas sobre lâminas delgadas e polidas (também fragmentos de amostras naturais para MEV-EDS)".

Para Toledo (1999), a monazita associada aos carbonatitos representa uma fase nitidamente posterior à etapa magmática primária, substituindo ou impregnando os

materiais pré-existentes. Macroscopicamente, ela tem coloração esverdeada e ocorre em agregados milimétricos friáveis ou não, finamente granulados e descontínuos. Nas porções mais profundas dos furos de sondagem, a monazita coexiste com carbonatos, o que não ocorre nas porções mais superficiais. Microscopicamente, a monazita forma agregados arredondados, fibrosos, incolores e com birrefringência baixa; ocorre também formando pequenos volumes relativamente difusos ou bem delimitados, substituindo, por vezes, partes da rocha; pode apresentar-se, ainda, melhor cristalizada ou com hábitos lamelares. Todos esses tipos são muito porosos e apresentam cristalização fina.

As análises químicas efetuadas na monazita indicaram a presença de pequenos conteúdos de Ca e de Sr e traços de Ba. Intimamente associadas à monazita, Toledo (1999) identificou fases de terras raras isentas de fósforo, relativas provavelmente a óxidos (cerianita), compostos estes que são referidos por outros autores (Valarelli, 1971; Neumann, 1999).

A monazita contida nos silexitos possui aspecto fibroso e coloração verde amarelada; ocorre como massas aparentemente individualizadas ou intimamente associadas ao quartzo. Apresenta-se ainda com coloração cinza azulada, em aglomerados mais irregulares, não existindo praticamente a forma individualizada. Constituem fases posteriores à silicificação, embora, em algumas amostras, haja evidências de uma silicificação posterior à formação da monazita. Esta monazita também ocorre muito fina e porosa, a exemplo da associada aos carbonatitos.

Para Neumann (1999), no silexito, a monazita ocorre em diferentes formas, sendo a mais comum como esferóides concêntricos dispersos na matriz geralmente quartzosa, mas também de minerais de ferro. Apresenta-se, também, como provável substituição pseudomórfica de outros minerais, como massas e como agulhas. Nas análises efetuadas em MEV, este autor observou grande variação nos coeficientes de elétrons retroespalhados da monazita (variações estas que refletem mudanças no número atômico médio do mineral); as regiões mais escuras (portanto, de número atômico médio menor), contêm um elevado teor de sílica, que foi recalculado como quartzo, evidenciando um intercrescimento muito fino entre monazita e esse mineral.

A monazita associada ao manto laterítico ocorre igualmente na forma porosa, com coloração castanha esverdeada, associada ao manto laterítico rico em apatita e em minerais ferruginosos. Apresenta-se como inclusões nas apatitas, em anatásio. Toledo (1999) observou também outros fosfatos de terras raras (possivelmente rabdofanita, conforme descrito por Valarelli, 1971).

De modo geral, Toledo (1999) concluiu que a monazita é predominantemente criptocristalina, ocorrendo em aglomerados de formas externas variadas, sendo raríssima a presença de cristais individualizados; apresenta-se altamente porosa. Essa autora atribuiu a essa porosidade e a sua cristalinidade os valores de fechamento químico baixos (inferiores a 100%) encontrados nas análises pontuais obtidas em MEV-EDS, ou à existência de ânions não analisados, tais como OH^- e CO_3^{2-} .

Os estudos por microsonda eletrônica (Toledo, 1999), visando a determinação da composição química das monazitas de Catalão I, confirmaram a ausência de ítrio, urânio e enxofre e detectaram, em algumas amostras, a presença de tório (que numa delas atingiu valores entre 0,15 e 3,67% em peso). Indicaram também pequenos conteúdos de Sr e de Ca e traços de Ba. As análises evidenciaram ainda que a ordem de abundância das terras raras é Ce (mais abundante) - La - Nd - Pr - Sm (menos abundante), embora em algumas monazitas associadas aos carbonatitos, haja uma inversão na posição relativa do Nd e do La.

As monazitas presentes nos carbonatitos têm conteúdos mais elevados de terras raras e menores de alcalinos terrosos; as associadas ao silexito apresentam maiores teores de La do que as demais.

4.1.3 Estudos de caracterização e de desenvolvimento de processos realizados

Estudos iniciais de caracterização, visando a concentração dos ETR, foram desenvolvidos a partir da década de 70 e encontram-se sumariados na seqüência. Esses trabalhos foram efetuados em amostras de silexito (rocha dura, compacta ou cavernosa), litologia esta que contém parcela menos expressiva da reserva, porém com teores mais elevados de ETR. No silexito compacto, os estudos não conduziram a bons resultados, mas sugeriam que uma rota que envolvesse beneficiamento físico, em intervalos granulométricos definidos, visando a redução do conteúdo de minerais portadores de ferro, seguida por extração química (em pilha ou em coluna), mostrava-se promissora (Lapido Loureiro, 1994).

Valarelli (1971), utilizando lavagem, peneiramento, separações densitária e magnética, solubilizações com ácido clorídrico e elutriação das frações finas, obteve um concentrado de fosfato de terras raras, constituído basicamente por florencita.

No minério laterítico, a Union Carbide, em 1976, realizou alguns ensaios de concentração em amostra com 11% de OTR. Esses ensaios envolveram separações magnéticas, eletrostáticas e flotação. Na amostra estudada, 44% dos óxidos de terras raras estavam contidos na fração passante em 0,037 mm (400 malhas Tyler), dos quais

21% situavam-se abaixo de 0,005 mm. A granulação extremamente fina dos minerais de terras raras (monazita, principalmente), aliada a sua associação com os óxidos-hidróxidos de ferro, foram os fatores decisivos para o insucesso da metodologia de concentração aplicada.

O Centro de Pesquisa de Aubervilliers (Rhône Poulenc Industries) também executou, em 1977, ensaios no silexito, visando a sua concentração física, utilizando ensaios de separações minerais (líquidos densos e magnéticas, em escala de bancada), além de flotação (aniônica e catiônica) e cominuição seletiva, não obtendo, no entanto, resultados satisfatórios, devido “à natureza dos constituintes mineralógicos, os quais ocorrem muito finamente imbricados” (apud Ribeiro, 1998).

Lapido Loureiro executou, em 1987, ensaios qualitativos preliminares de extração ácida, utilizando como reagentes o ácido sulfúrico e o ácido clorídrico, em amostras representativas do minério alterado, obtendo resultados promissores para uma rota envolvendo processo hidrometalúrgico.

Benedetto et al (1998) desenvolveram estudos de caracterização e desenvolvimento de processo para o material silexítico e para “um material friável, de granulação fina encontrado junto ao silexito e misturado com o solo”. Esse trabalho envolveu a execução de testes físicos de concentração (flotação e separação magnética), que não conduziram a bons resultados. Face às dificuldades encontradas, esses autores executaram testes exploratórios de abertura química, chegando a resultados tecnicamente promissores.

Segundo relatórios internos da empresa detentora do depósito de Catalão (antiga Goiasfertil), inúmeros trabalhos de concentração por rotas físicas foram efetuados pelo Cetem - Centro de Tecnologia Mineral, no início da década de 90, tanto em seus laboratórios no Rio de Janeiro, como por seus pesquisadores em instituições internacionais (em convênio com esse órgão), porém todas as tentativas de utilização de procedimentos convencionais de enriquecimento das terras raras não obtiveram bons resultados, uma vez que os minerais presentes encontravam-se intimamente relacionados e possuíam granulação fina. Para o silexito, os estudos envolvendo separação magnética foram efetuados nas empresas Boxmag, Carpcoc e Eriez e, aqueles baseados em flotação, na American Cyanamid e nas universidades de Trento, na Itália, e de Munchen (Alemanha).

Rocha e Trindade (1993) efetuaram ensaios de extração hidrometalúrgica das terras raras, em amostras de material silexítico. Esses estudos visavam a abertura do material em questão, de modo a decompor a monazita, formando um hidróxido de terras

raras insolúvel e um silicato de sódio, solúvel e com valor comercial. Para tal, esses autores empregaram uma solução de NaOH, com relação reagente/amostra variável entre 1 e 2,2, efetuando os testes de abertura em autoclaves, a temperaturas compreendidas entre 150 e 200^o C, em ensaios com duração entre 1 e 3 horas.

Esses autores obtiveram, a partir de 170^o C, uma dissolução da sílica superior a 90%, independentemente da concentração da soda e do tempo de reação. A dissolução da monazita, no entanto, é dependente de todas as variáveis, atingindo valor máximo da ordem de 84%, à temperatura de 200^o C, em ensaio com 2 h de reação, utilizando relação soda/amostra de 2,2.

Neumann et al (1994), em trabalho desenvolvido sobre o material silexítico, concluíram que, em razão do tamanho dos agregados de monazita presentes (da ordem de 10 µm), haveria a necessidade do emprego de moagem visando a sua liberação em relação à matriz quartzosa, o que acarretaria num alto consumo de energia (por se tratar de material com elevada dureza), tornando inviável economicamente a concentração física desse material.

Barbosa et al (1995) desenvolveram um trabalho no sentido de otimizar a dissolução da sílica sem, no entanto, decompor os minerais de terras raras (monazita); essa decomposição era então controlada pelo teor de P₂O₅ (proveniente da monazita) obtido na solução. Dessa forma foi possível uma extração da sílica superior a 96%, acompanhada por uma extração de P₂O₅ inferior a 1%.

Borges et al (1995) efetuaram ensaios em escala de bancada a partir do material silexítico. Os testes incluíram moagem em moinho de barras do material natural ou após aquecimento a 900^o C, seguido de resfriamento brusco em água, visando, com este choque térmico, fraturar a matriz quartzosa e facilitar a sua moagem. Executam ainda ensaios de flotação e de separação magnética (a úmido e a seco). Esses autores concluíram ser inviável a obtenção de um concentrado apenas por métodos físicos, devendo-se fazer uso de técnicas de metalurgia extrativa.

A partir de meados da década de 90, começaram a ser desenvolvidos estudos de caracterização tecnológica em uma amostra de material saprolítico coletada na frente de lavra do minério de fosfato, em zona de interferência com a mineralização de ETR, visando avaliar as possibilidades de sua concentração.

Os estudos de caracterização e tratamento de minérios nessa amostra, realizados por Aquino e Albuquerque (1996), mostraram tratar-se de um material argiloso, correspondendo a solo com presença de minerais secundários. O seu processamento físico através de flotação e separação magnética foi objeto de estudos e novamente (a

exemplo do silixito) os resultados obtidos não foram satisfatórios, não havendo resposta positiva aos processos empregados.

Esse processamento envolvia uma etapa prévia de britagem, moagem e deslamagem, o que ocasionava uma perda de cerca de 13% dos OTR nas lamas. Efetuaram ensaios de separação magnética a seco e a úmido, com o objetivo de reduzir o conteúdo de minerais magnéticos (principalmente os óxidos de hidróxidos de ferro) para minimizar o consumo de ácido na etapa subsequente de lixiviação; executaram, ainda, alternativas envolvendo flotação (em células mecânicas e em coluna), nas quais foram testados diversos coletores e depressores, em várias faixas de concentração. Após a análise de todos os resultados obtidos, esses autores concluíram não ser recomendada a aplicação de métodos físicos de concentração para esse tipo de material.

Benedetto e Moraes (1997) realizaram um estudo sobre essa mesma amostra, visando o tratamento químico do material "in natura", sem beneficiamento físico prévio. O trabalho desenvolvido abrangeu seis etapas básicas de processo (remoção das impurezas com ácido clorídrico; lixiviação sulfúrica da monazita; precipitação seletiva das terras raras; extração por solventes dos elementos de terras raras; separação do cério; fracionamento dos demais elementos em dois grupos - o das terras raras leves e o das pesadas).

Este trabalho baseava-se no fato de que a monazita é bastante refratária ao ataque clorídrico; este ataque, então, deveria atuar sobre os contaminantes presentes (principalmente sobre os minerais de ferro), reduzindo assim o seu teor junto ao resíduo obtido (que seria constituído, portanto, por grande quantidade de monazita). O que se observou, no entanto, foi um comportamento completamente atípico da monazita, que mostrou uma solubilização bastante alta durante essa lixiviação, provavelmente devida à sua elevada área de superfície específica.

Em função da impossibilidade de se promover uma limpeza química prévia dos contaminantes através do HCl (que acabava solubilizando a monazita), o estudo foi redirecionado de modo a se obter a abertura direta da monazita, a partir de um ataque sulfúrico, minimizando a solubilização das outras impurezas. Dessa forma, atingiram-se rendimentos superiores a 92% com baixa lixiviação do ferro (ao redor de 13%), em condições relativamente amenas de lixiviação e solubilização. Constatou-se, no entanto, que a recirculação do ácido sulfúrico reduz significativamente o rendimento da solubilização da monazita, sendo necessários novos estudos visando a redução dos íons presentes nesse licor para que o mesmo possa ser recirculado, tornando-se de fundamental importância que haja uma elevação nos teores de ETR no produto correspondente à alimentação do processo químico.

Amostras similares à estudada por Aquino e Albuquerque (1996) foram submetidas à caracterização mineralógica e desenvolvimento de processos por Viera et al (1998) e por Tassinari et al (1998), porém com abordagens completamente distintas. Os estudos realizados por Viera et al (1998) envolveram flotação primária (com e sem etapas de atrição), concentração gravítica e separação magnética, enquanto que os desenvolvidos por Tassinari et al (1998) basearam-se em etapas de preparação dirigidas, conforme descrito a seguir.

Nos estudos efetuados por Viera et al (1998), os ensaios de flotação efetuados sem atrição prévia do material, geraram concentrados com teores de OTR da mesma ordem de grandeza que a alimentação (ao redor de 6,8%) e com baixa recuperação; os ensaios de flotação que envolveram atrição (efetuada com ácido sulfúrico, em pH 1, a partir de material cominuído a 80% passante em 0,149 mm e deslamado em 0,037 mm) também não se mostraram promissores, resultando em produtos com teores baixos de OTR. Dessa forma, os autores concluíram que um procedimento envolvendo flotação não é viável.

Os ensaios de concentração densitária em “Mozley Mineral Separation” (modelo C900), efetuados por Viera et al (1998) no material previamente deslamado em 0,037 mm e moído a 80% passante em 0,149 mm, resultaram num concentrado pesado que foi posteriormente submetido a separação magnética a úmido (HGMS Boxmag Rapid) em diversas intensidades de campo.

Assim, esses autores obtiveram dois produtos: um correspondente aos finos da deslamagem (<0,037 mm), com teor de 15% e recuperação de 70% de OTR e o outro, correspondente ao concentrado obtido após a separação gravítica e magnética, com teor de 18% e recuperação de 5% dos OTR.

À luz dos conhecimentos existentes até a época, sobre as características intrínsecas da monazita presente no material saprolítico de Catalão, Tassinari e Kahn (1998a e b), em estudos preliminares de caracterização mineralógica, verificaram que o processamento deste material requer a utilização de técnicas não usuais de concentração, uma vez que todas as tentativas até então realizadas (meados dos anos 90), visando o seu aproveitamento (tais como separações minerais por métodos densitários ou magnéticos ou mesmo por flotação), mostraram-se infrutíferas, permanecendo, portanto, um desafio tecnológico para o aproveitamento do material mineralizado em questão.

Baseados nos trabalhos de Merker et al (1993), esses autores vislumbraram condições de pré-concentrar os minerais portadores desses elementos, atuando-se numa preparação dirigida, indicando portanto que ainda não se encontravam esgotadas as

possibilidades de alguma concentração física dos minerais de ETR presentes. A idéia básica foi promover ciclos de atrição / desagregação e deslamagem, procurando-se intensificar a concentração dos ETR nos ultrafinos, na tentativa de se obter um rejeito grosso, um pré-concentrado de ultrafinos quase acabado (teores da ordem de 20% de óxidos de ETR e recuperação aproximada de 60% dos ETR totais) e um produto de finos com teores da ordem de 10% de óxidos de ETR a ser, eventualmente, concentrado por processos físicos. Toda a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos estão descritos detalhadamente nos próximos capítulos.

4.2. Depósito da Lagoa Seca

No decorrer deste estudo, na região da Lagoa Seca, foi identificado outro depósito de elementos de terras raras, também constituído por monazita, o qual se estende até a área da Mina 1 da Mineração Catalão.

O material mineralizado, com características visuais completamente distintas das observadas no Córrego do Garimpo, apresenta como principal característica a abundância de minerais inertes ao processamento químico da monazita (quartzo, caulinita, anatásio, ilmenita, etc.) e praticamente ausência de minerais deletérios, tais como óxidos de ferro (goethita).

Este novo depósito encontra-se ainda em fase de pesquisa geológica. Os trabalhos de caracterização tecnológica efetuados tiveram apenas caráter exploratório e visavam avaliar a possibilidade de aplicação do procedimento desenvolvido para o material saprolítico também para esta mineralização. As teorias mais recentes sobre a gênese do depósito da Lagoa Seca incluem processos hidrotermais mais intensos, aliados a um certo transporte e sedimentação (*deposição de sedimentos na base de uma chaminé ou duto hidrotermal*, Foto 5, cedida por Ribeiro).

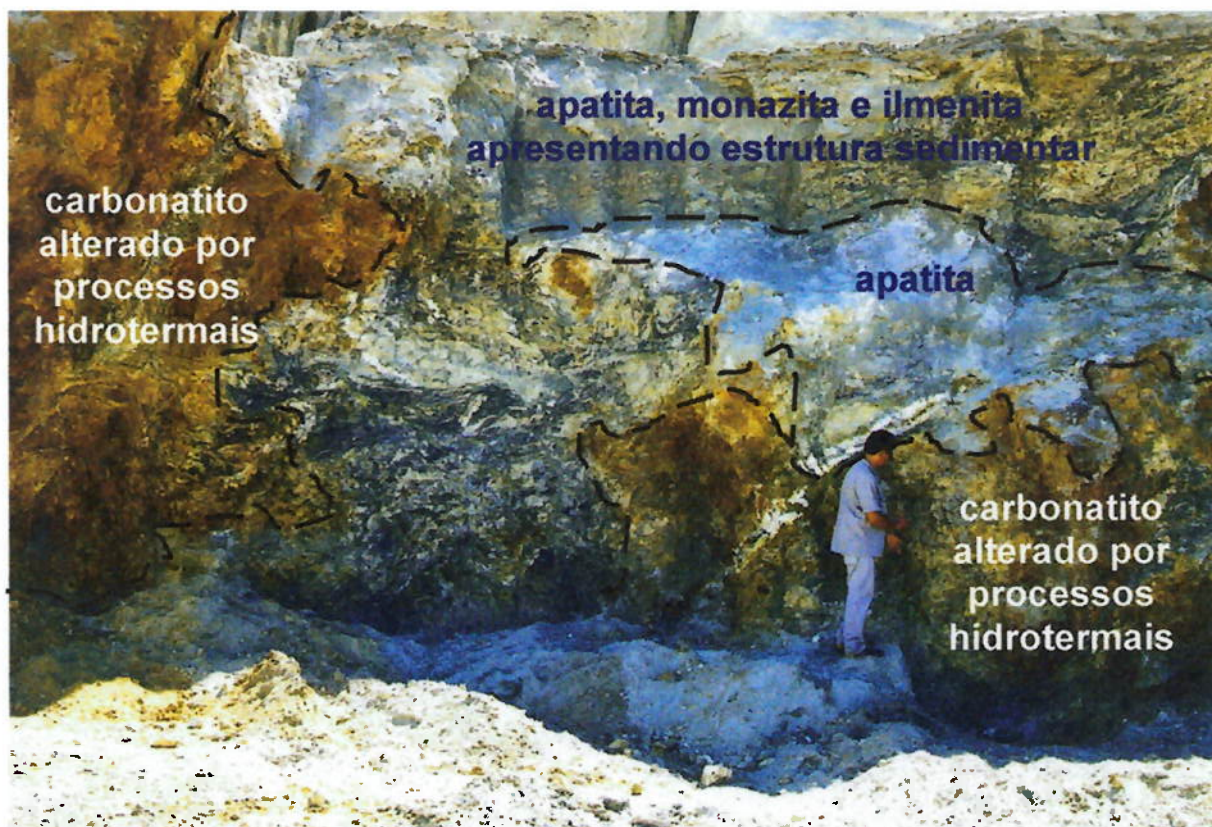


Foto 5 - Deposição de sedimentos constituídos essencialmente por apatita, monazita e ilmenita na base de uma chaminé ou duto hidrotermal sobre rochas carbonatíficas

5. Metodologia de trabalho e etapas desenvolvidas

5.1. *Córrego do Garimpo*

Os trabalhos realizados contemplaram duas linhas básicas de investigação, dirigidas para a mesma meta, porém com focos diferentes:

- a primeira, tendo como enfoques a caracterização tecnológica e o desenvolvimento de processo de beneficiamento para materiais de granulometria fina / ultrafina;
- a segunda, voltada para o conhecimento do depósito mineral.

A primeira linha focou a caracterização e desenvolvimento de processo de beneficiamento físico, visando uma pré-concentração dos minerais portadores de terras raras. A meta foi verificar as possibilidades e condições de obter-se, por concentração física, um produto com teores mais elevados de ETR para a alimentação do processamento químico da monazita.

Esta linha de investigação foi toda apoiada em amostras volumétricas, tomadas em frentes de lavra do minério de fosfato, em áreas com sobreposição de mineralização de ETR do Córrego do Garimpo, sobre as quais efetuou-se o desenvolvimento básico do processo.

A outra linha compreendeu a caracterização do depósito como um todo, apoiando-se em amostras de testemunhos de sondagem. O objetivo desse estudo foi verificar as implicações nos processos de beneficiamento / extração dos ETR decorrentes da variabilidade das propriedades inerentes aos minerais de minério e de ganga (tais como estado de alteração, presença de películas superficiais de recobrimento, grau de associação dos minerais, composições mineralógicas e químicas das espécies presentes, dentre outras), ao longo do corpo mineralizado, não só pela influência da alteração imposta, tanto lateral como verticalmente, como da litologia original.

5.1.1 *Primeira etapa de trabalhos - Caracterização e desenvolvimento de processo*

Inicialmente, executaram-se estudos de caracterização em uma amostra mineralizada a ETR, correspondente ao material laterítico (saprolito), que foi coletada na frente de lavra do minério de fosfato.

Para a realização desses estudos, foram estudadas duas alíquotas desse material, que foram geradas numa mesma campanha de amostragem, pela equipe técnica da Ultrafertil.

A primeira alíquota foi empregada para os estudos de caracterização propriamente ditos (determinação da composição mineralógica e ensaios de separações minerais em escala de bancada) e a segunda alíquota especificamente para a condução dos ensaios de desenvolvimento de processos.

Os estudos efetuados nestas alíquotas visaram obter uma estimativa da composição mineralógica e avaliar as possibilidades de concentração, por processos físicos, dos minerais de terras raras, gerando pré-concentrados para posterior tratamento por rotas químicas.

A Figura 7 mostra o esquema geral de procedimento experimental adotado nesta etapa de estudos.

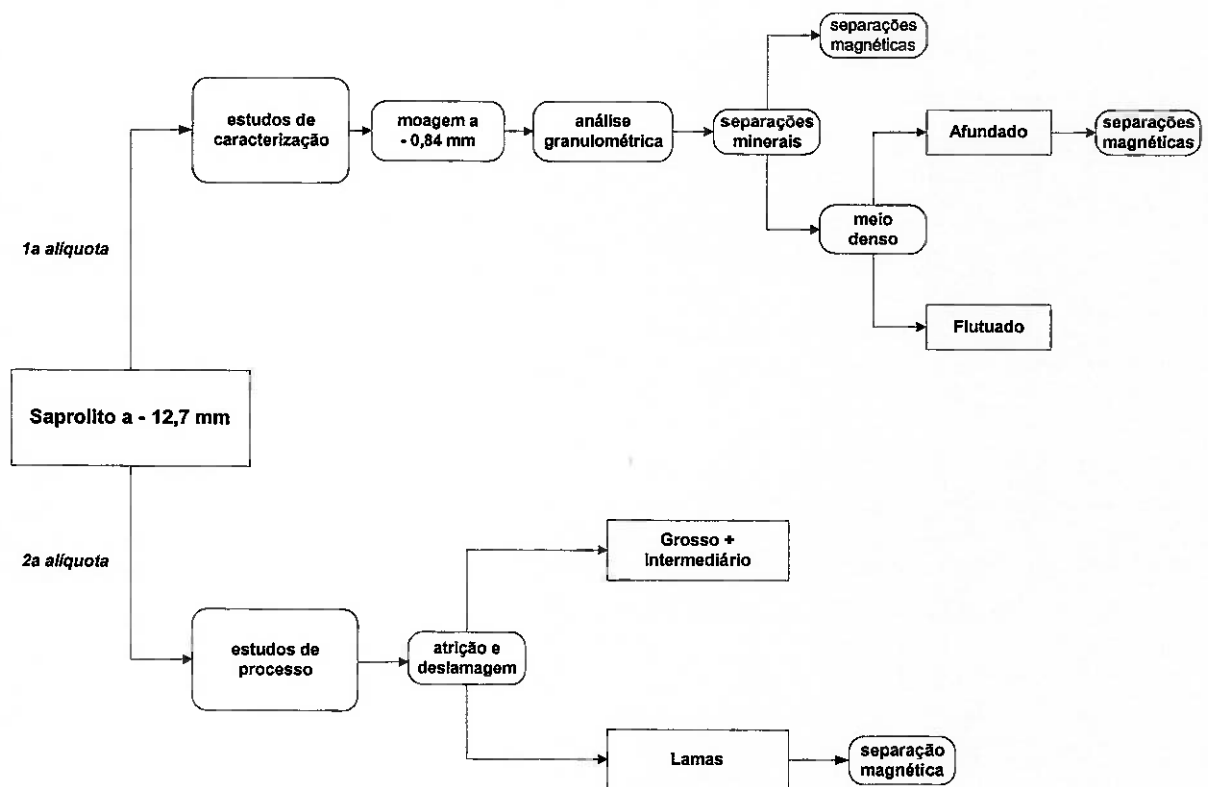


Figura 7 - Esquema geral do procedimento experimental adotado - Amostra saprolito

Posteriormente, esses mesmos estudos foram estendidos para outras amostras volumétricas, que foram coletadas na frente de lavra de fosfato (amostra TR 02), na trincheira aberta na área do Córrego do Garimpo (denominadas “*silexito*” e “*argila ferruginosa*”) e na área da Lagoa Seca (amostra TR 01).

5.1.1.1 Procedimento experimental na etapa de caracterização

Visando os estudos de caracterização, a amostra *saprolito* foi submetida, inicialmente, a uma preparação prévia que constou das seguintes atividades:

- homogeneização e retirada de alíquotas representativas para a execução de análises químicas e continuação dos estudos;
- moagem da alíquota a ser caracterizada até 100% em peso passante em 0,84 mm (20 malhas Tyler), em circuito fechado com peneira, para evitar a geração de finos;
- análise granulométrica do produto moído, por peneiramento a úmido, utilizando-se as peneiras 0,595 mm (28 malhas), 0,297 mm (48 malhas), 0,210 mm (65 malhas), 0,149 mm (100 malhas), 0,105 mm (150 malhas), 0,074 mm (200 malhas) e 0,037 mm (400 malhas), todas da série Tyler e na peneira 0,020 mm (635 malhas);
- todos os produtos obtidos foram submetidos a análises químicas com determinações de OTR, P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO, SrO, BaO e F.

As análises químicas foram efetuadas pela técnica de fluorescência de raios X, empregando-se um espectrometro por WDS, modelo PW 2400, Philips.

O material assim preparado, foi submetido a dois procedimentos distintos de caracterização. No primeiro, as frações geradas, com granulação superior a 0,037 mm (400 malhas), foram submetidas apenas a ensaios de separação magnética em separador Frantz, modelo de barreiras.

No segundo procedimento, executaram-se, nessas mesmas frações, ensaios de separação mineral por meio de líquidos densos, em escala de bancada, com posterior separação magnética do produto afundado, também em separador Frantz.

O esquema de procedimento experimental adotado na caracterização está detalhado na Figura 8.

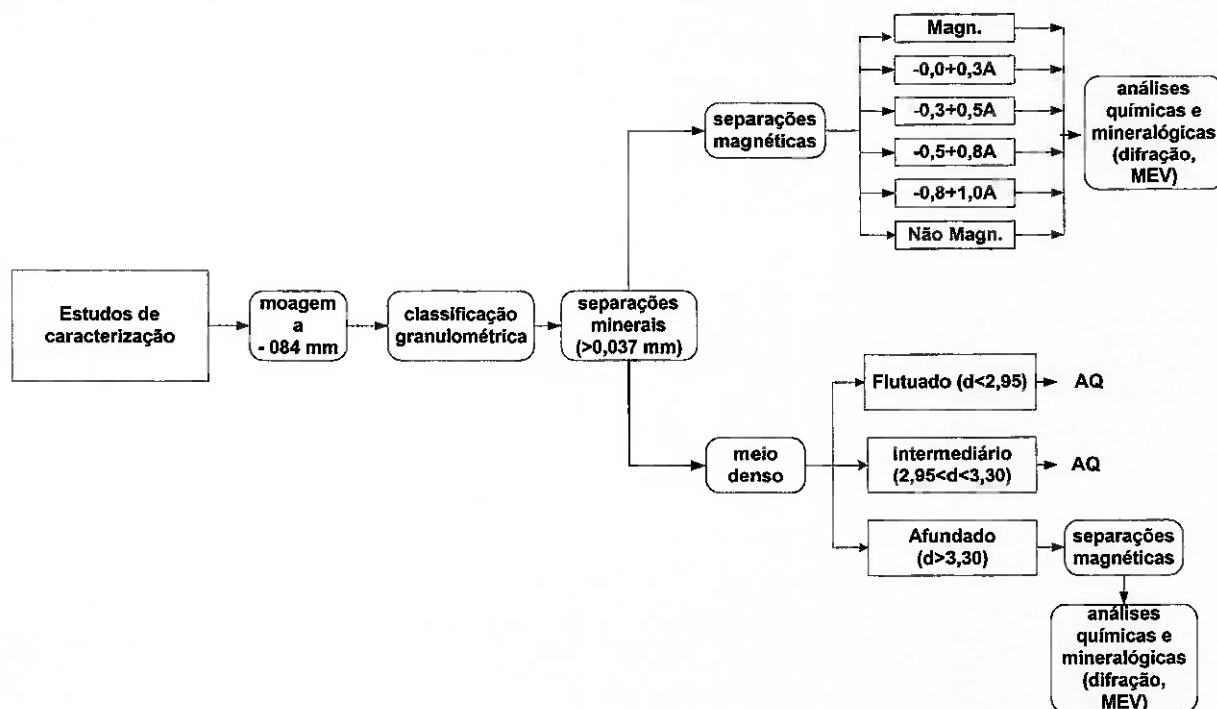


Figura 8 - Esquema do procedimento experimental adotado na caracterização - Amostra saprolito

5.1.1.1.1 Separações magnéticas em separador Frantz

Efetuaram-se as seguintes atividades:

- separação magnética a seco nas frações acima de 0,037 mm (obtidas conforme item 6.1.1), utilizando-se separador Frantz (modelo de barreiras);
- todos os produtos obtidos foram submetidos a análises químicas, com determinações de OTR, P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO, SrO, BaO e F e análises mineralógicas, com o emprego de difrações de raios X e análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada a espectrômetro de raios X por energia dispersiva (EDS), visando auxiliar na identificação de algumas espécies minerais presentes e avaliar as associações da monazita com os minerais de ganga.

5.1.1.1.2 Separações em líquidos densos e separador Frantz

- separação densitária nas várias frações granulométricas (até 0,020 mm), utilizando-se líquidos orgânicos densos nas densidades $2,95 \text{ g/cm}^3$ (tetra-bromo-etano) e $3,30 \text{ g/cm}^3$ (di-iodeto de metileno), obtendo-se os produtos

flutuado em 2,95; afundado em 2,95 flutuado em 3,30 (aqui denominado de intermediário) e afundado em 3,30;

- separação magnética a seco nos produtos afundados para as frações acima de 0,037 mm, utilizando-se separador Frantz (modelo de barreiras);
- todos os produtos obtidos foram submetidos às mesmas análises já citadas.

5.1.1.2 *Desenvolvimento de processo no material saprolítico*

5.1.1.2.1 Considerações Gerais

Com base nas características apresentadas pela monazita (agregados extremamente friáveis, com tendência natural a concentrar-se junto às lamas ou ultrafinos, a ser detalhado mais adiante), vislumbrou-se a possibilidade de um processo de separação física baseado justamente nesse comportamento. A alternativa de processo visualizada considerou uma desagregação seletiva do material, através de ciclos sucessivos de atrição/desagregação e deslamagem, de forma a propiciar que a maior parcela possível de ETR ficasse contida junto às lamas.

A idéia básica desse processamento consistiu, portanto, em gerar um rejeito grosso a ser descartado, um pré-concentrado de ultrafinos praticamente acabado, e um produto de finos a ser eventualmente concentrado por processos físicos ou, em função do seu teor, ser igualmente descartado. Uma etapa posterior de separação magnética a úmido das lamas foi pesquisada, de forma a se elevar os teores de OTR e, paralelamente, minimizar o conteúdo de Fe_2O_3 associado.

5.1.1.2.2 Preparação inicial da amostra

Inicialmente foi efetuado um estudo para avaliar as melhores condições para a desagregação do material, considerando-se três formas de procedimento: atrição, moagem branda seguida de atrição, moagem a granulação mais fina. Estes estudos compreenderam então as seguintes alternativas, conforme exposto na Figura 9.

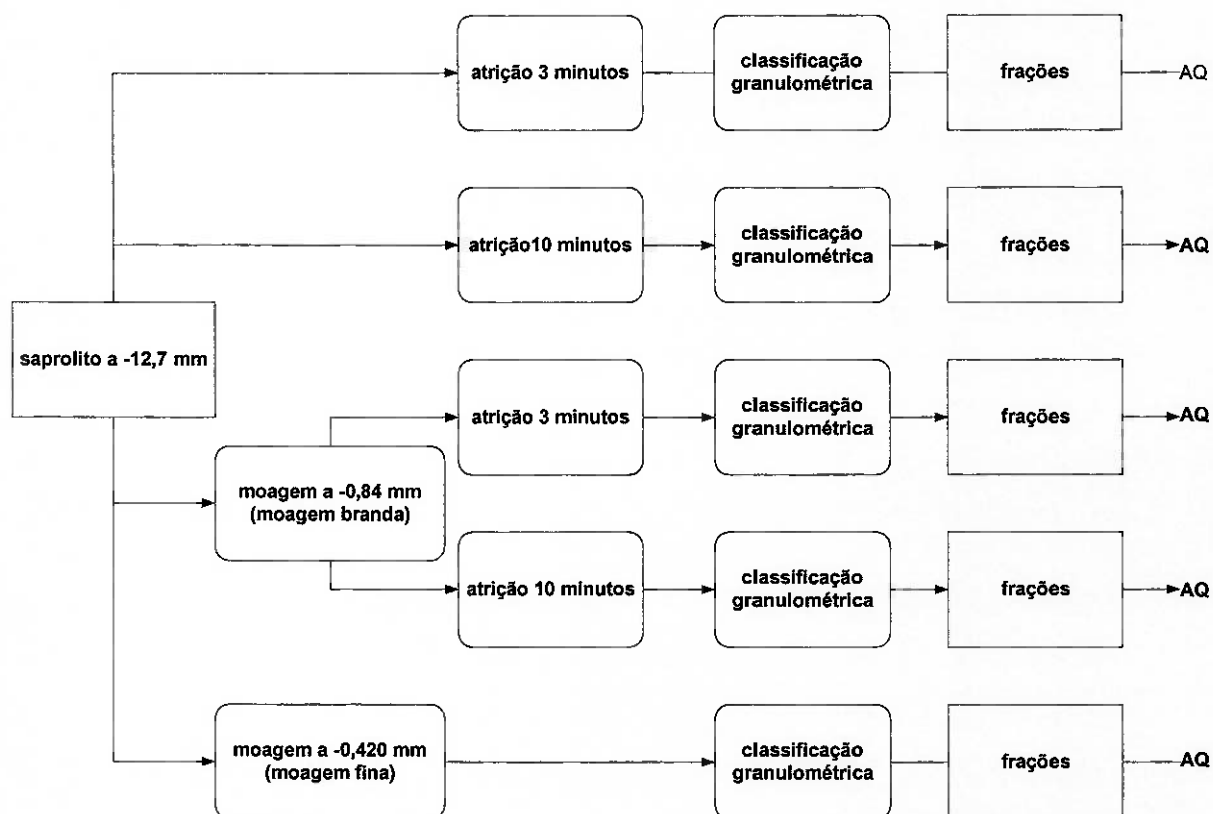


Figura 9 - Esquema de preparação da amostra saprolito

- *1ª alternativa:* atrição da amostra britada a -12,7mm, em ensaios com duração de 3 e de 10 minutos;
- *2ª alternativa:* moagem da amostra a 100% passante em 0,84 mm (moagem branda), sendo o produto moído submetido a ensaios de atrição (com durações de 3 e de 10 minutos);
- *3ª alternativa:* moagem da amostra a 100% passante em 0,420 mm (moagem mais fina);
- todos os produtos obtidos foram submetidos a classificações granulométricas, sendo as frações resultantes analisadas quimicamente.

A moagem branda foi realizada em de moinho de rolos, em circuito fechado com peneira e, a moagem em granulação mais fina, por operação em moinho de jarros, com carga de barras, em escala de laboratório. Os ensaios de atrição foram realizados em máquina de flotação Denver, modelo D-12, com hélice específica para atrição. Os testes foram executados a 2.000 rpm e em pH 8,7, controlado através da adição de NaOH.

5.1.1.2.3 Ensaios de processo

A partir da definição da etapa inicial de preparação da amostra, adotou-se o esquema de procedimento experimental exposto na Figura 10 e detalhado a seguir:

- escalpe em 0,297 mm, obtendo-se as frações +0,297 mm e -0,297 mm (visando adequação da granulação do material às condições operacionais dos ciclones utilizados);
- remoção dos finos naturais por meio de deslamagem em dois estágios da fração -0,297 mm, obtendo-se três produtos com granulações distintas, a saber:
 - ⇒ um produto grosso (correspondente ao "underflow" do 1º estágio de deslamagem), aqui designado por produto INTERMEDIÁRIO 1;
 - ⇒ um produto fino (correspondente ao "underflow" do 2º estágio de deslamagem), aqui designado por produto UF1;
 - ⇒ um produto ultrafino (correspondente ao "overflow" do 2º estágio de deslamagem), aqui designado por produto OF1;
- atrição em meio básico (pH 8,7) da fração +0,297 mm composta com o produto INTERMEDIÁRIO 1 obtido acima (1ª atrição);
- classificação granulométrica em 0,297 mm do produto atricionado, obtendo-se novamente as frações +0,297 mm e -0,297 mm;
- deslamagem em dois estágios da fração -0,297 mm, obtendo-se três produtos com granulações distintas:
 - ⇒ um produto grosso (correspondente ao "underflow" do 1º estágio de deslamagem), aqui designado por produto INTERMEDIÁRIO 2;

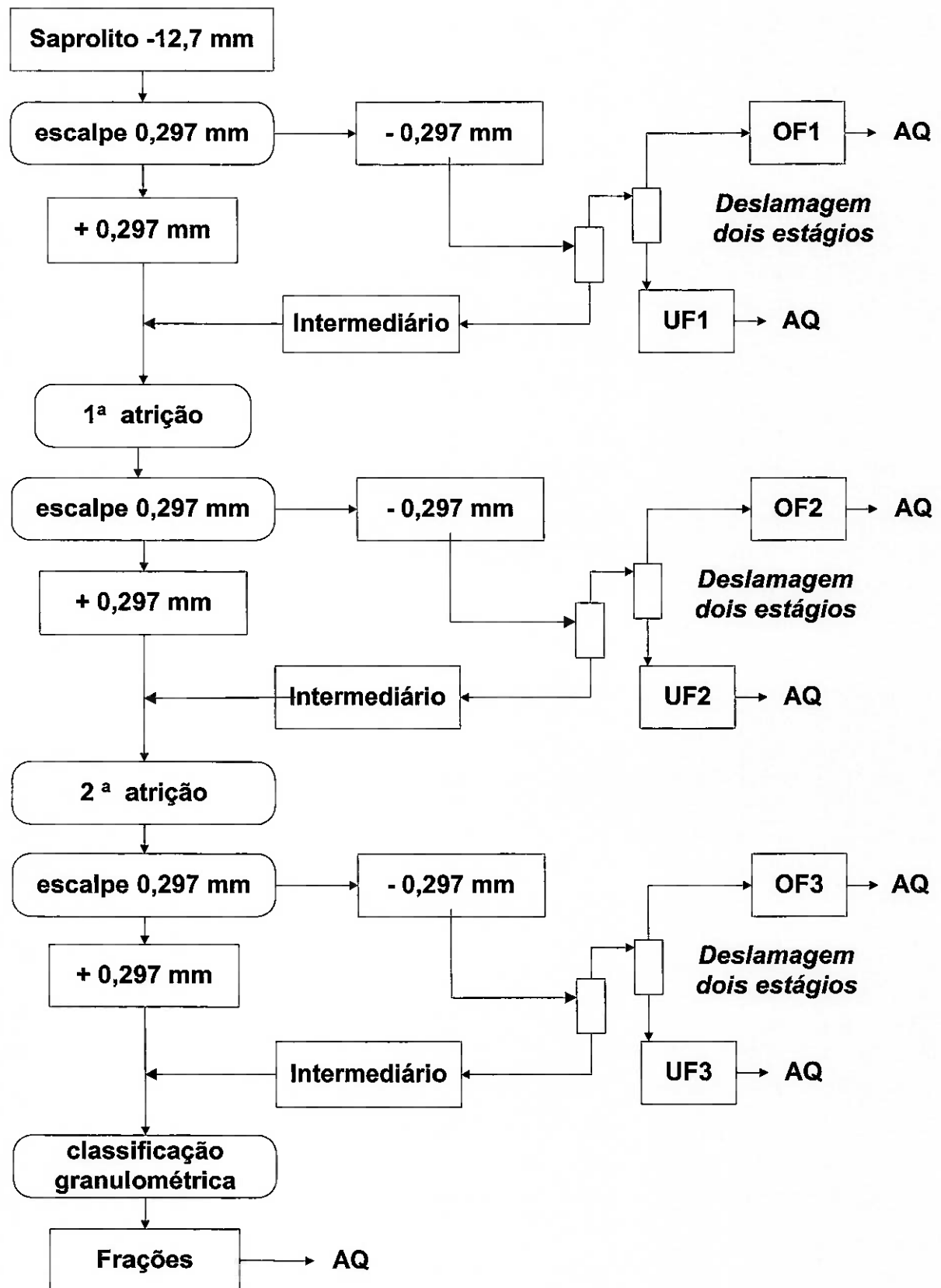


Figura 10 - Esquema do procedimento experimental para a amostra saprolito

- ⇒ um produto fino (correspondente ao "underflow" do 2º estágio de deslamagem), aqui designado por produto UF2;
- ⇒ um produto ultrafino (correspondente ao "overflow" do 2º estágio de deslamagem), aqui designado por produto OF2;
- atrição em meio básico (pH 8,7) da fração +0,297 mm composta com o produto INTERMEDIÁRIO 2 obtido acima (2ª atrição);
- classificação granulométrica em 0,297 mm do produto atricionado, obtendo-se novamente as frações +0,297 mm e -0,297 mm;
- deslamagem em dois estágios da fração -0,297 mm, obtendo-se três produtos com granulações distintas:
 - ⇒ um produto grosso (correspondente ao "underflow" do 1º estágio de deslamagem), aqui designado por produto INTERMEDIÁRIO 3;
 - ⇒ um produto fino (correspondente ao "underflow" do 2º estágio de deslamagem), aqui designado por produto UF3;
 - ⇒ um produto ultrafino (correspondente ao "overflow" do 2º estágio de deslamagem), aqui designado por produto OF3;
- análise granulométrica da fração +0,297 mm composta com o produto INTERMEDIÁRIO 3.

A classificação em 0,297 mm, anterior à execução das ciclonagens, consistiu essencialmente de uma etapa auxiliar para proporcionar uma operação mais adequada e eficiente dos ensaios de ciclonagem, face às características dos ciclones empregados (Krebs, 25mm de diâmetro, em material cerâmico).

A ciclonagem foi efetuada em dois estágios. No primeiro empregou-se pressão de 25 psi e no segundo, 60 psi, de tal forma que cada estágio apresenta corte granulométrico distinto, em razão das características de sua alimentação, como também das condições de operação.

Todos os produtos finais obtidos foram submetidos a análises químicas com determinações de OTR, P₂O₅, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MgO, SrO, BaO e F.

5.1.2 Segunda etapa - Caracterização do depósito do Córrego do Garimpo

Após o desenvolvimento satisfatório de uma alternativa de beneficiamento para a amostra *saprolito*, fez-se necessário avaliar se este procedimento poderia ser aplicado ao depósito mineralizado como um todo.

Ao término da campanha de sondagens para a reavaliação do potencial do depósito, foi efetuado um estudo visando a definição de tipos preliminares de materiais existentes. A definição dos tipos tomou por base as descrições dos testemunhos de sondagem e suas respectivas composições químicas.

5.1.2.1 Amostragem dos testemunhos de sondagem

Os estudos da caracterização tipológica do depósito de terras raras de Catalão I iniciaram-se com uma etapa de descrições macroscópicas e amostragem, seguida de análises químicas dos testemunhos obtidos durante a campanha de sondagem.

A descrição macroscópica efetuada visou determinar as características litológicas de cada intervalo analisado, procurando identificar os níveis portadores de minerais de terras raras.

A maior parcela dos testemunhos obtidos mostrava-se naturalmente desagregada, na forma de solo, com alguns fragmentos consolidados, logo após a sua coleta.

A preparação das amostras, visando a execução de análises químicas, constou das seguintes atividades:

- secagem em estufa, à temperatura inferior a 100^o C;
- britagem do material, com redução granulométrica abaixo de 3,36 mm (6 malhas Tyler), em moinho de rolos, em circuito fechado com peneira (peneiramento manual a seco);
- retirada de alíquotas representativas do produto britado, através de operações sucessivas de divisão das amostras em amostrador tipo Jones, com retirada de massas proporcionais a cada intervalo preparado;
- composição e homogeneização das alíquotas assim obtidas, resultando em amostras compostas correspondentes a cada 2 m relativos aos furos de sonda;
- amostragem de cada uma dessas, com retirada de duas alíquotas, sendo uma com massa aproximada de 500 g para análises químicas e a outra para a execução dos ensaios de caracterização.

Para a campanha de análises químicas, obtiveram-se cerca de 950 amostras, a partir dos 23 furos executados, que foram submetidas a determinação de CeO_2 , La_2O_3 , OTR (óxidos de terras raras totais), P_2O_5 , CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , SrO_2 , BaO (por fluorescência de raios X) e PF.

De posse dos resultados das análises químicas, construíram-se logs de sondagem associando o furo executado com a profundidade, litologia e respectivos teores, o que constituiu a base para a construção do banco de dados.

5.1.2.2 *Definição preliminar dos tipos de material - Córrego do Garimpo*

Os testemunhos de sondagens foram classificados e agrupados em tipos distintos, considerando os dados de análises químicas e as descrições litológicas disponíveis, descartando-se os intervalos com teores de OTR inferiores a 4% (independentemente de sua extensão, tendo sido mantidos, no entanto, os intervalos intercalados com outros de teores superiores a esse valor, por questões de lavra), conforme orientação da equipe técnica da Ultraféttil, que definiu esse valor de teor como "cut off" da zona mineralizada.

Correlações entre esses teores foram efetuadas, o que permitiu verificar a existência de grupos de amostras com características químicas bastante diversas.

Os principais critérios distintivos prenderam-se aos teores de SiO_2 , Fe_2O_3 e CaO .

5.1.2.3 *Execução do ensaio padrão*

Após a definição desses tipos, compuseram-se 28 amostras a partir dos testemunhos de sondagem, que foram posteriormente submetidas ao processo desenvolvido para a amostra *saprolito*, processo este todo apoiado no fato da monazita ocorrer em granulação extremamente fina e ser muito friável; este processamento considerou etapas sucessivas de atrição e deslamagem a partir de material com granulação de 12,7 mm ou superior.

O objetivo desta linha de investigação foi o de avaliar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida, para a concentração das terras raras, nos diversos tipos litológicos existentes no depósito, bem como gerar material para os testes químicos individuais para cada amostra.

5.1.2.4 *Ensaio de lixiviação*

Após a execução do ensaio padrão nas amostras compostas, os produtos obtidos foram encaminhados para a INB, para a realização dos ensaios de lixiviação.

5.1.2.5 *Tratamento dos dados*

A partir da conjugação dos resultados obtidos na execução do ensaio padrão nas 28 amostras com os gerados nos ensaios de lixiviação, procedeu-se à definição de tipos tecnológicos propriamente ditos, ou seja, materiais com comportamentos diversos tanto no processo de beneficiamento físico como químico.

5.1.3 *Estudos complementares*

Efetuaram-se, ainda, estudos de caracterização em outras três amostras volumétricas complementares, provenientes do Córrego do Garimpo.

Essas amostras foram coletadas na área de interface com o minério de fosfato (amostra TR 02, frente de lavra de fosfato) e na trincheira aberta na porção central do depósito (amostras *silexito* e *argila ferruginosa*).

Todas as amostras acima referidas foram amostradas através de canais na frente de lavra ou na trincheira. Os produtos dos vários canais, referentes a cada um dos locais selecionados, foram inicialmente compostos e homogeneizados, retirando-se, então, alíquotas para os estudos de caracterização / processo.

Estes estudos tiveram por finalidade obter estimativa da composição mineralógica de cada amostra e avaliar as possibilidades de concentração dos minerais portadores de ETR. Os procedimentos experimentais empregados foram diversos para cada uma delas, em função das diferenças de granulação, de teores e da fase de pesquisa.

Neste contexto, as amostras TR 02 (Córrego do Garimpo) e TR 01 (Lagoa Seca) foram estudadas em maior detalhe, após a amostra inicial de saprolito, ao passo que as demais foram avaliadas concomitantemente à caracterização do depósito, sendo que o estudo destas se restringiu à realização do ensaio padrão de processamento mineral.

Os estudos de mineralogia foram desenvolvidos com o apoio de ensaios de separação mineral, análises por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura, análises por difração de raios X e análises químicas, com determinações de OTR, P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , BaO e ZrO_2 por espectrometria de fluorescência de raios X.

5.1.3.1 *Procedimento experimental*

Para a amostra TR 02 (Córrego do Garimpo), o procedimento experimental constou das seguintes atividades (Figura 11):

- homogeneização e quarteramento da amostra com retirada de alíquotas representativas para a execução de análises químicas e caracterização tecnológica;
- classificação granulométrica por peneiramento a úmido, utilizando-se as peneiras 0,84 mm (20 malhas), 0,595 mm (28 malhas), 0,297 mm (48 malhas), 0,149 mm (100 malhas), 0,074 mm (200 malhas), 0,037 mm (400 malhas) da série Tyler e 0,020 mm (635 malhas);
- tomada de nova alíquota seguida de moagem da fração retida em 0,42 mm (35 malhas Tyler), através de moinho de rolos, em circuito fechado com peneira, até 100% em peso passante em 0,42 mm;
- composição do produto moído com os finos naturais, seguida de ensaios de atrição, nas mesmas condições já referidas para a amostra *saprolito* (2000 rpm, com duração de 10 minutos e em pH 8,7);
- classificação granulométrica por peneiramento a úmido, utilizando-se as peneiras 0,420 mm (35 malhas), 0,210 mm (65 malhas), 0,149 mm (100 malhas), 0,074 mm (200 malhas), 0,037 mm (400 malhas) e 0,020 mm (635 malhas);
- separações magnéticas em separador de alta intensidade via úmida (WHIMS), com o emprego de matriz fina, foram efetuadas na fração $-0,020\text{ mm}$ natural, com o intuito de se elevar a relação $\text{OTR}/\text{Fe}_2\text{O}_3$;

Todos os produtos obtidos foram submetidos a análises químicas (citadas acima) e mineralógicas, tendo sido realizadas ainda difrações de raios X, visando auxiliar na identificação das espécies minerais presentes.

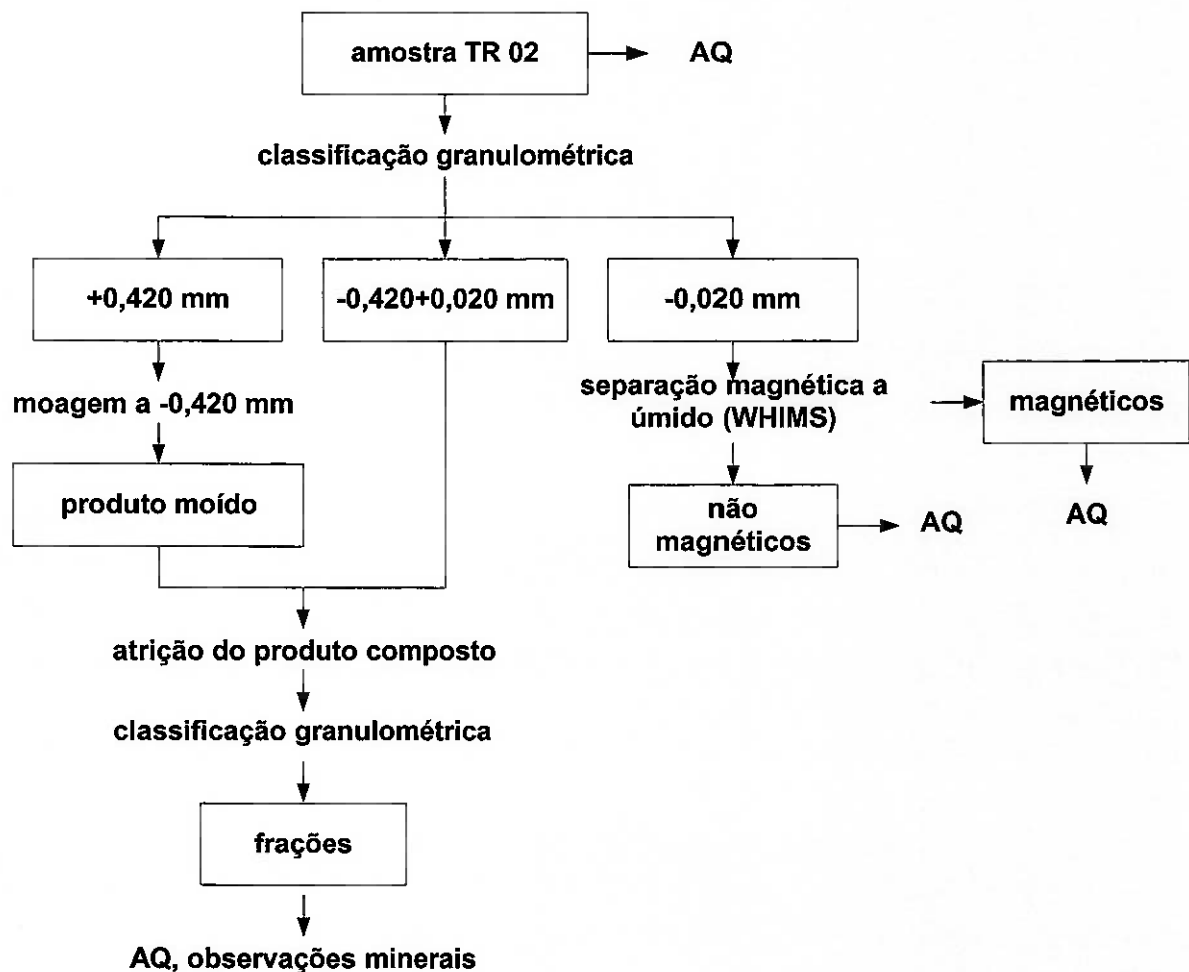


Figura 11 - Esquema do procedimento experimental adotado para a amostra TR 02 - Córrego do Garimpo

Para as amostras correspondentes à trincheira (silexito e argila ferruginosa), efetuou-se apenas o ensaio padrão.

5.2. Estudos preliminares em amostras do depósito da Lagoa Seca

Na região da Lagoa Seca, foi identificado, durante os trabalhos para avaliação do depósito do Córrego do Garimpo, um outro depósito de elementos de terras raras, também constituído por monazita, o qual se estende até a área da Mina 1 da Mineração Catalão, como mencionado anteriormente.

Efetuuou-se, então, um estudo de caracterização mais detalhado em uma amostra proveniente dessa região, denominada TR 01, com a finalidade de se obter uma estimativa da sua composição mineralógica e avaliar as possibilidades de concentração dos minerais portadores de ETR, através da utilização de ensaios de concentração física.

Posteriormente, coletaram-se, ainda, amostras volumétricas correspondentes a diferentes níveis da mineralização (*nível inferior, nível superior, rico em monazita, rico em apatita*). A amostragem foi efetuada por canaleta em uma das frentes mineralizadas (Foto 6).



Foto 6 - Localização das amostras correspondentes aos diferentes níveis da mineralização, coletadas na área da Lagoa Seca

5.2.1 Procedimento experimental

O processamento utilizado, para a amostra TR 01 (material amarelo esverdeado da área da Lagoa Seca), considerou etapas sucessivas de atrição e deslamagem a partir de material com granulação inferior a 12,7 mm. O mesmo constou das seguintes atividades (Figura 12):

- homogeneização e quarteamento da amostra com retirada de alíquotas representativas para a execução de análises químicas e estudos de caracterização;
- classificação granulométrica por peneiramento a úmido, utilizando-se as peneiras 0,595 mm (28 malhas), 0,420 mm (35 malhas), 0,149 mm (100

malhas), 0,074 mm (200 malhas), 0,037 mm (400 malhas) e 0,020 mm (635 malhas);

- moagem da fração retida em 0,420 mm (35 malhas), através de moinho de rolos, em circuito fechado com peneira, até 100% em peso passante em 0,420 mm;
- composição do produto moído com os finos naturais, seguida de ensaios de atrição (mesmo procedimento já mencionado);
- análise granulométrica por peneiramento a úmido, utilizando-se as peneiras 0,210 mm (65 malhas), 0,149 mm (100 malhas), 0,074 mm (200 malhas), 0,037 mm (400 malhas) e 0,020 mm (635 malhas);
- todas as frações obtidas (à exceção do passante em 0,020 mm) foram submetidas à separação mineral por líquidos densos, na densidade 2,95 g/cm³; as separações em líquidos densos lograram obter no produto flutuado os minerais leves liberados, tais como quartzo. Nos produtos afundados concentraram-se os demais minerais presentes (tais como, anatásio, ilmenita e fosfatos secundários);
- separação magnética a seco nos produtos afundados, utilizando-se separador Frantz (modelo de barreiras);
- todos os produtos obtidos foram submetidos a análises químicas, com determinações de OTR, Fe₂O₃, TiO₂, SiO₂, P₂O₅, CaO, Al₂O₃, BaO, SO₃ e ZrO₂ e análises mineralógicas, tendo sido realizadas ainda difrações de raios X, visando auxiliar na identificação das espécies minerais presentes.

As demais amostras (Nível inferior, Nível superior, rico em monazita, rico em apatita) foram apenas objeto do ensaio-padrão de beneficiamento físico. A amostra rica em monazita foi ainda submetida a separações minerais, visando a obtenção de um produto de monazita pura, com a finalidade de determinar a composição química deste mineral.

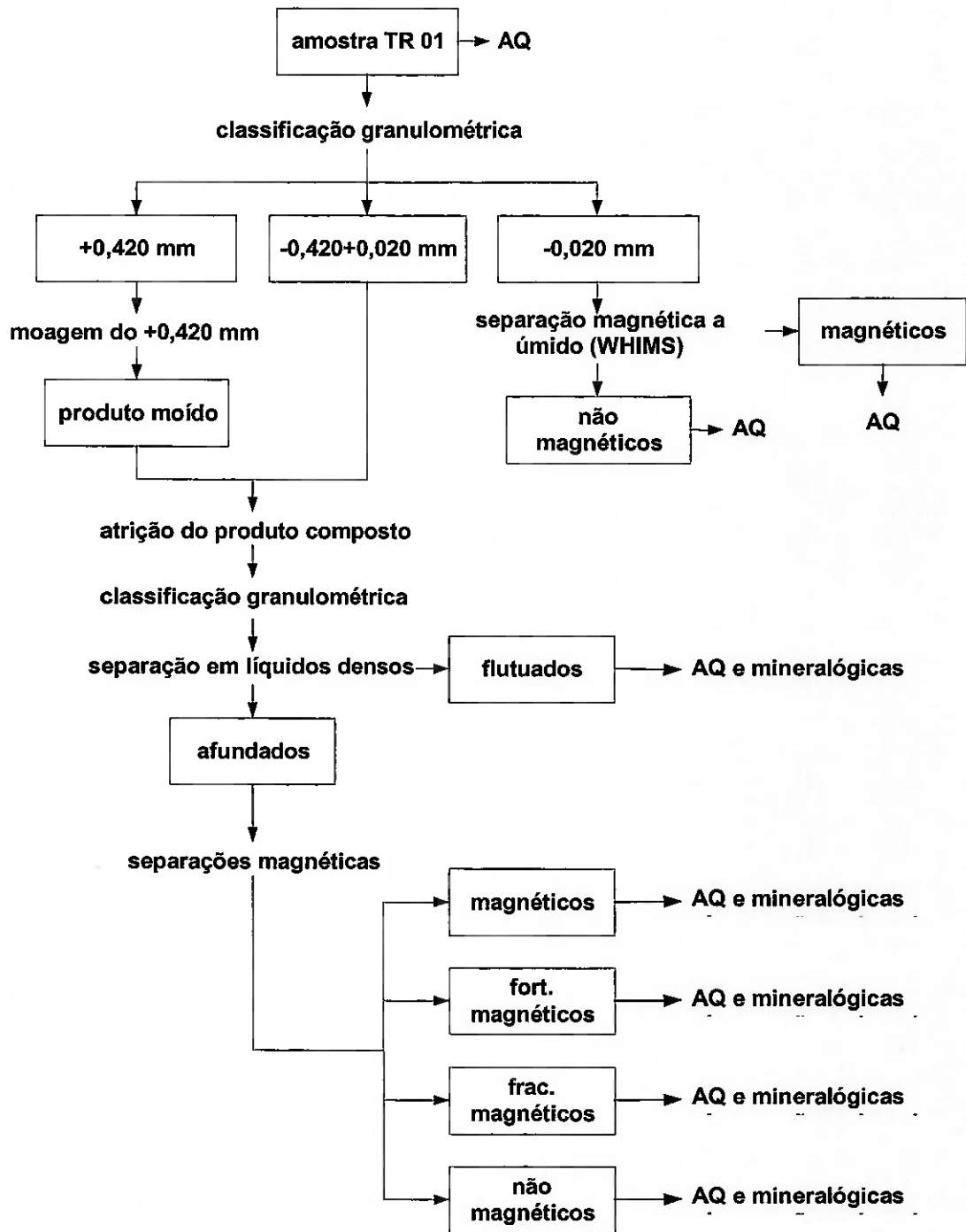


Figura 12 - Esquema do procedimento experimental para amostra TR 01 - Lagoa Seca

6. Resultados obtidos para o depósito do Córrego do Garimpo

6.1. Caracterização da amostra de saprolito - Córrego do Garimpo

6.1.1 Composição química das alíquotas estudadas

A composição química das duas alíquotas estudadas está exposta na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química das amostras estudadas

Óxidos (%)	alíquota 1 (caracterização)	alíquota 2 (desenvolv. de processo)	média
OTR	8,60	8,78	8,69
P ₂ O ₅	12,3	11,3	11,8
CaO	10,0	7,90	8,95
Fe ₂ O ₃	28,0	29,0	28,5
TiO ₂	9,05	8,54	8,80
SiO ₂	17,4	24,4	20,9
Al ₂ O ₃	3,88	2,58	3,23
MgO	4,37	2,04	3,21
SrO	0,84	0,70	0,77
BaO	1,82	1,85	1,84

As duas alíquotas estudadas mostram diferenças significativas principalmente quanto aos teores de SiO₂ (mais elevado na alíquota 2) e MgO (mais elevado na alíquota 1); verificam-se também diferenças em relação aos teores de CaO (mais elevado na alíquota 1), Al₂O₃ (mais elevado na alíquota 1) e P₂O₅ (mais elevado na alíquota 1).

Os resultados apresentados a seguir referem-se aos estudos de caracterização efetuados a partir da alíquota 1.

6.1.2 Análise granulométrica

A distribuição de teores por faixa granulométrica para a amostra saprolito está exposta na Tabela 7.

A análise granulométrica indica que cerca de 23% em peso constituem material passante em 0,020 mm. Para o intervalo granulométrico compreendido entre 0,297mm e 0,020 mm, a proporção em peso de cada fração varia entre 5,5 e 9,6% com tendência à diminuição para os finos até 0,074 mm.

Tabela 7 - Distribuição de teores por fração granulométrica - Amostra saprolito

Fração mm	% Peso		Teores (%)												CaO/ P ₂ O ₅
	retido	acum	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SrO	BaO	F	P ₂ O ₅	
-0,84+0,595	0,9	0,9	1,43	8,91	8,16	31,2	7,67	37,7	1,10	0,94	0,42	0,44	0,54	0,92	
-0,595+0,297	25,4	26,3	3,05	14,5	14,3	25,3	10,8	23,3	1,99	1,98	0,75	1,08	0,87	0,98	
-0,297+0,210	9,6	35,9	4,53	13,6	13,2	24,5	12,3	19,6	3,07	3,73	0,82	1,33	0,79	0,97	
-0,210+0,149	8,1	44,0	4,56	12,4	12,2	25,8	12,6	18,9	3,35	4,28	0,81	1,45	0,88	0,98	
-0,149+0,105	8,2	52,2	5,63	11,5	10,4	26,2	12,2	17,6	4,33	5,70	0,81	1,86	0,66	0,91	
-0,105+0,074	5,5	57,7	5,78	12,5	10,8	26,3	11,7	16,2	4,55	5,23	0,88	2,33	0,68	0,87	
-0,074+0,037	9,6	67,3	7,79	11,3	8,65	25,9	9,66	16,1	5,93	7,33	0,93	3,00	0,53	0,76	
-0,037+0,020	9,4	76,7	10,0	9,70	6,80	25,2	5,30	18,5	7,90	9,60	0,86	2,72	0,33	0,70	
-0,020	23,3	100,0	19,5	11,0	4,90	36,0	4,08	9,00	3,78	3,41	0,91	2,03	0,28	0,45	
Total calc.	100,0		8,60	12,3	10,0	28,0	9,05	17,4	3,88	4,37	0,84	1,82	0,61	0,82	

Fração mm	% Peso		Distribuição (%)											
	retido	acum	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SrO	BaO	F	
-0,84+0,595	0,9	0,9	0,1	0,6	0,7	1,0	0,7	1,9	0,2	0,2	0,4	0,2	0,8	
-0,595+0,297	25,4	26,3	9,0	30,1	36,2	23,0	30,5	34,1	13,0	11,5	22,9	15,1	36,1	
-0,297+0,210	9,6	35,9	5,1	10,6	12,6	8,4	13,0	10,8	7,6	8,2	9,4	7,0	12,5	
-0,210+0,149	8,1	44,0	4,3	8,2	9,8	7,4	11,2	8,7	7,0	7,9	7,8	6,4	11,6	
-0,149+0,105	8,2	52,2	5,4	7,7	8,5	7,7	11,1	8,3	9,2	10,7	8,0	8,4	8,9	
-0,105+0,074	5,5	57,7	3,7	5,6	6,0	5,2	7,1	5,2	6,5	6,6	5,9	7,1	6,2	
-0,074+0,037	9,6	67,3	8,7	8,9	8,3	8,9	10,2	8,9	14,7	16,1	10,7	15,8	8,3	
-0,037+0,020	9,4	76,7	11,0	7,5	6,4	8,5	5,5	10,0	19,2	20,7	9,7	14,1	5,1	
-0,020	23,3	100,0	52,7	20,8	11,4	29,9	10,5	12,1	22,7	18,1	25,3	25,9	10,7	
Total	100,0		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Os teores de OTR variam entre 1,4% (fração +0,595 mm) e 19,5% (fração -0,020 mm), com tendência a aumento para os finos. A fração -0,020 mm é responsável por cerca de 53% do total de OTR contidos na amostra.

Os teores de P₂O₅ variam entre 8,9% (na fração -0,84+0,595 mm) e 14,5% (na fração -0,595+0,297 mm), mostrando, abaixo de 0,595 mm, tendência geral a decréscimo para os finos (até a fração -0,037+0,020 mm); os teores de CaO variam entre 4,9% (fração -0,020 mm) e 14,3% (-0,595+0,297 mm), com o mesmo comportamento apresentado pelo P₂O₅.

Os teores de Fe₂O₃ variam pouco para o intervalo -0,595+0,020 mm, estando compreendidos entre 24,5 e 26,3%; nas frações extremas atinge valores superiores a 31%. A fração -0,020 mm é responsável por cerca de 30% do Fe₂O₃ contido na amostra. Os teores de TiO₂ variam entre 4% (fração -0,020 mm) e 12,6% (-0,210+0,149 mm); estes

teores aumentam até a fração $-0,210+0,149$ mm, decrescendo posteriormente abaixo dela para os finos.

Os teores de SiO_2 estão compreendidos entre 9% ($-0,020$ mm) e 37,7% (fração $-0,84+0,595$ mm), com tendência a decréscimo para os finos; teores de Al_2O_3 (variando entre 1,1 e 7,9%), MgO (entre 0,9 e 9,6%) e BaO (0,4 a 3%) apresentam tendência geral à elevação em direção aos finos.

A distribuição de teores na granulometria do saprolito cominuído em 0,84 mm, mostra claramente a nítida tendência dos óxidos de terras raras concentrarem-se nos finos, abaixo de 0,020 mm, como exposto no gráfico da Figura 13.

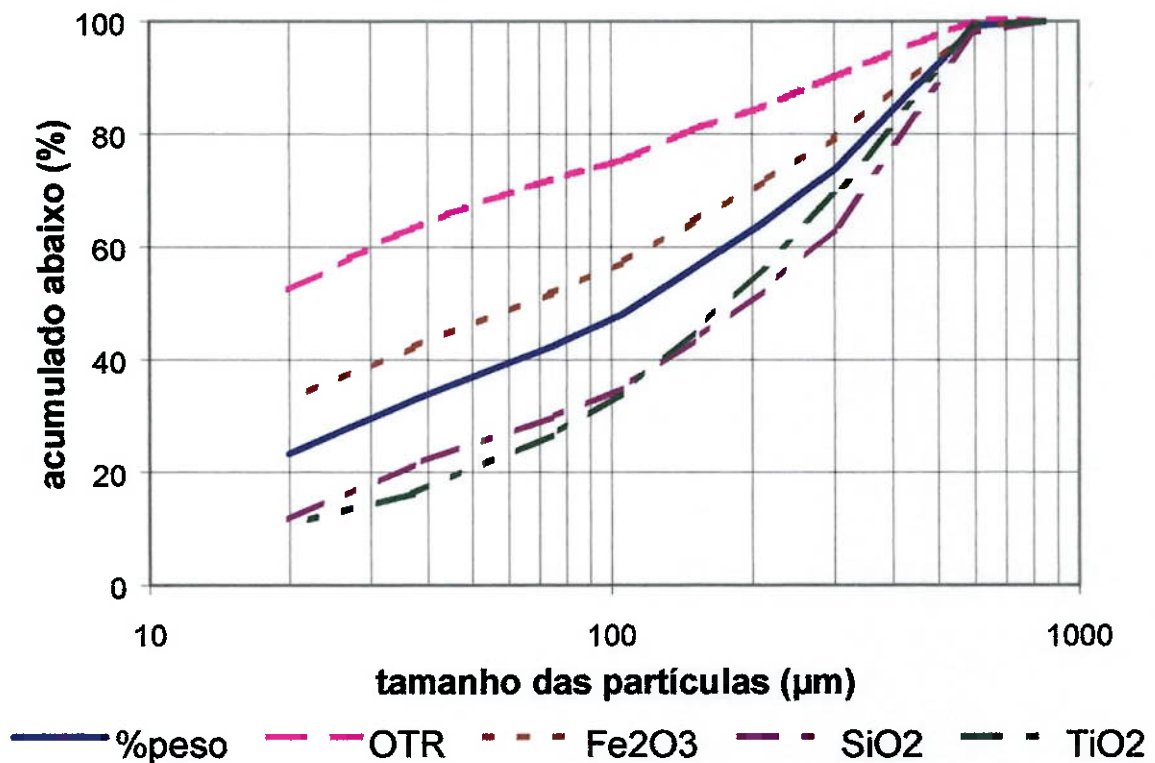


Figura 13 - Distribuição em massa e dos principais óxidos na granulometria (%) - Amostra saprolito

6.1.3 Separações magnéticas em separador Frantz

Os resultados dos ensaios de separação magnética, efetuados até a fração 0,037 mm estão expostos na Figura 14 (fração total +0,037 mm) e Tabela 8.

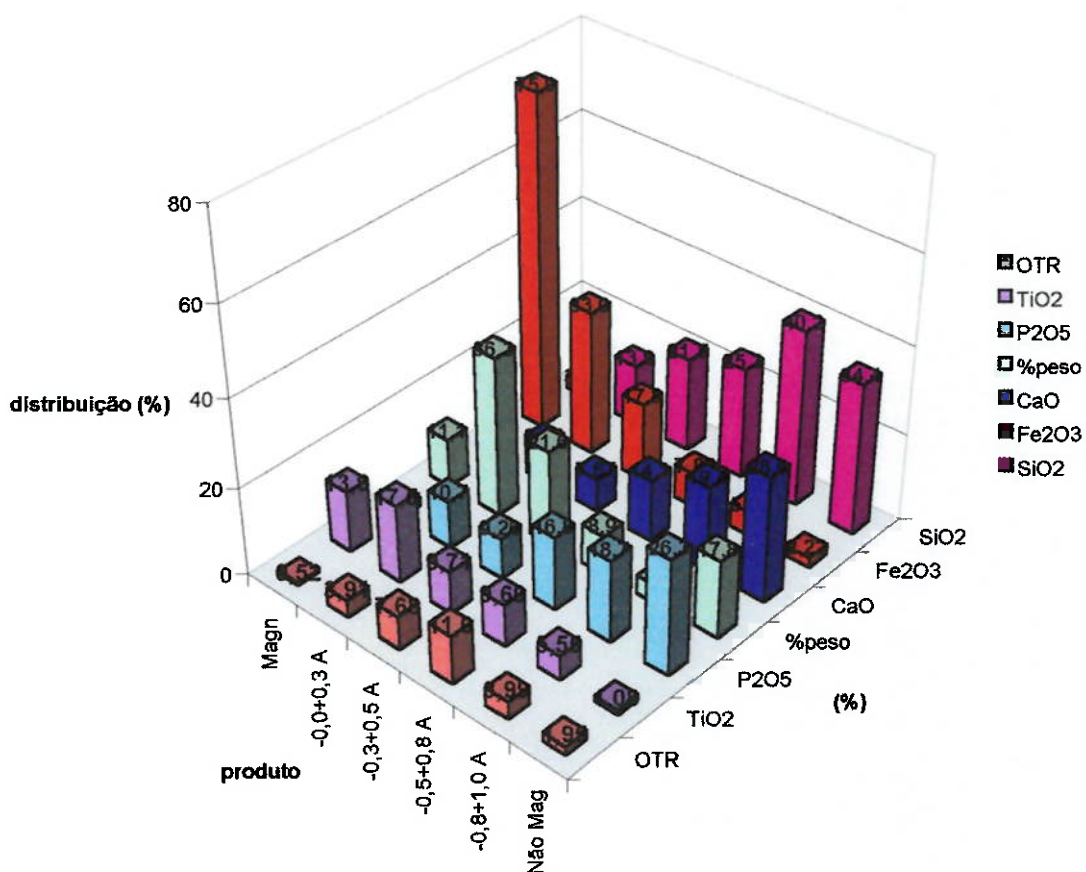


Figura 14 - Proporção em massa e teores nos produtos obtidos na separação magnética (fração total +0,037 mm) - Amostra saprolito

O produto magnético total +0,037 mm corresponde a cerca de 11% em peso de material (7,5% em relação à amostra total), com tendência a decréscimo acentuado para os finos; apresenta um teor de OTR de 0,52%, o que corresponde a 1,2% do total de OTR contido no ensaio (0,5% em relação ao total da amostra). Junto a esse produto, os teores de OTR variam entre 0,44% (fração -0,595+0,297 mm) e 1,10% (fração -0,595+0,037 mm), estando os teores mais elevados preferencialmente associados às frações mais finas.

Tabela 8 - Distribuição de teores nos produtos de separação magnética - Amostra saprolito

Fração mm	Produto	% Peso		Teores (%)							CaO/P ₂ O ₅	Distribuição no ensalo (%)							Distribuição na amostra (%)						
		fração	amost.	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃		OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
-0,84+0,696	Magn	27,6	0,24	0,49	1,68	1,31	75,3	13,4	5,00	0,24	0,78	9,5	5,2	4,4	66,5	48,1	3,7	6,0	0,01	0,03	0,03	0,64	0,35	0,07	0,01
	-0,0+0,3 A	25,1	0,22	1,60	9,50	7,80	31,6	11,6	33,1	1,27	0,92	28,2	24,0	24,0	25,5	39,0	22,1	29,0	0,04	0,15	0,2	0,25	0,28	0,42	0,07
	-0,3+0,5 A	5,7	0,06	2,00	10,5	8,70	13,8	4,14	43,4	6,60	0,83	8,0	6,7	6,1	2,5	3,1	6,6	34,1	0,01	0,04	0,04	0,02	0,02	0,12	0,08
	-0,5+0,8 A	9,2	0,08	2,60	11,2	8,20	8,30	4,18	57,9	2,90	0,73	16,8	11,6	9,3	2,5	6,0	14,2	24,3	0,02	0,07	0,07	0,02	0,04	0,27	0,06
	-0,8+1,0 A	6,7	0,06	2,60	9,90	8,20	6,30	3,46	67,3	0,63	0,92	12,3	6,7	6,8	1,4	3,0	12,0	3,9	0,02	0,04	0,05	0,01	0,02	0,23	0,01
	Não Mag	25,7	0,22	1,40	15,9	15,7	2,14	0,83	60,9	0,12	0,99	25,2	45,8	49,5	1,8	2,8	41,5	2,7	0,04	0,29	0,4	0,02	0,02	0,78	0,01
	Total	100,0	0,87	1,43	8,91	8,16	31,2	7,67	37,7	1,10	0,92	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,14	0,63	0,7	0,97	0,74	1,89	0,25
-0,595+0,297	Magn	16,2	3,86	0,44	1,89	1,39	75,3	14,6	3,09	0,42	0,74	2,2	2,0	1,5	45,2	20,4	2,0	3,2	0,2	0,6	0,5	10,4	6,2	0,7	0,4
	-0,0+0,3 A	30,7	7,81	2,20	12,2	11,6	30,8	16,7	19,0	1,92	0,95	22,1	25,8	25,0	37,4	47,3	25,1	29,6	2,0	7,8	9,0	8,6	14,4	8,5	3,9
	-0,3+0,5 A	14,7	3,73	5,30	9,80	8,70	19,4	11,9	21,8	6,50	0,89	25,5	9,9	9,0	11,3	16,1	13,8	48,0	2,3	3,0	3,2	2,6	4,9	4,7	6,3
	-0,5+0,8 A	9,7	2,47	8,90	17,0	14,0	7,80	11,2	29,3	2,86	0,82	28,3	11,4	9,5	3,0	10,0	12,2	14,0	2,6	3,4	3,5	0,7	3,1	4,2	1,8
	-0,8+1,0 A	6,0	1,52	4,00	16,7	16,4	5,70	6,90	44,3	0,85	0,98	7,8	6,9	6,9	1,3	3,8	11,4	2,6	0,7	2,1	2,5	0,3	1,2	3,9	0,3
	Não Mag	23,8	6,05	1,80	27,0	28,9	1,94	1,11	34,8	0,22	1,07	14,0	44,2	48,2	1,8	2,4	35,6	2,6	1,3	13,3	17,5	0,4	0,7	12,1	0,3
	Total	100,0	26,44	3,05	14,6	14,3	25,3	10,8	23,3	1,99	0,98	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	9,0	30,1	36,2	23,0	30,5	34,1	13,0
-0,297+0,210	Magn	11,8	1,13	0,52	1,94	1,35	74,5	15,1	2,82	0,57	0,70	1,4	1,7	1,2	35,9	14,5	1,7	2,2	0,1	0,2	0,2	3,0	1,9	0,2	0,2
	-0,0+0,3 A	30,0	2,88	2,60	11,1	10,2	34,0	21,1	12,4	2,39	0,92	17,2	24,5	23,2	41,7	61,4	19,0	23,4	0,9	2,6	2,9	3,5	6,7	2,1	1,8
	-0,3+0,5 A	21,1	2,02	6,60	7,20	5,90	18,4	11,4	22,8	7,90	0,82	30,7	11,2	9,4	15,8	19,5	24,6	54,3	1,6	1,2	1,2	1,3	2,5	2,7	4,1
	-0,5+0,8 A	12,3	1,18	14,2	16,2	12,4	8,10	11,2	20,9	4,23	0,77	38,6	14,7	11,6	4,1	11,2	13,2	17,0	2,0	1,6	1,5	0,3	1,5	1,4	1,3
	-0,8+1,0 A	4,8	0,46	3,90	19,6	21,1	5,20	5,60	38,0	0,85	1,08	4,2	7,0	7,7	1,0	2,2	9,4	1,3	0,2	0,7	1,0	0,1	0,3	1,0	0,1
	Não Mag	19,9	1,91	1,80	27,9	31,0	1,85	0,77	31,5	0,27	1,11	7,9	40,9	46,8	1,5	1,2	32,1	1,8	0,4	4,3	5,9	0,1	0,2	3,5	0,1
	Total	100,0	9,59	4,53	13,6	13,2	24,5	12,3	19,6	3,07	0,97	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,1	10,6	12,6	8,4	13,0	10,8	7,6
-0,210+0,149	Magn	11,7	0,94	0,57	1,81	1,16	75,8	13,9	2,90	0,63	0,64	1,6	1,7	1,1	34,4	12,9	1,8	2,2	0,1	0,1	0,1	2,6	1,4	0,2	0,2
	-0,0+0,3 A	29,4	2,37	2,40	9,30	8,50	37,0	23,3	9,70	2,56	0,91	15,5	22,0	20,6	42,2	54,2	16,1	22,5	0,7	1,8	2,0	3,1	6,1	1,3	1,6
	-0,3+0,5 A	23,8	1,92	7,00	6,40	5,20	19,1	11,6	22,0	7,90	0,81	36,5	12,3	10,2	17,6	21,9	27,8	56,1	1,5	1,0	1,0	1,3	2,5	2,4	3,9
	-0,5+0,8 A	12,1	0,98	13,5	16,3	13,8	7,80	9,50	20,8	4,80	0,85	36,1	15,9	13,8	3,7	9,1	13,4	16,6	1,5	1,3	1,3	0,3	1,0	1,2	1,2
	-0,8+1,0 A	4,3	0,35	3,70	21,8	23,8	4,70	3,63	35,2	0,84	1,09	3,5	7,5	8,4	0,8	1,2	8,0	1,1	0,1	0,6	0,8	0,1	0,1	0,7	0,1
	Não Mag	18,7	1,51	1,70	27,0	29,9	1,69	0,45	34,2	0,27	1,11	7,0	40,6	45,0	1,2	0,7	33,9	1,5	0,3	3,3	4,5	0,1	0,1	3,0	0,1
	Total	100,0	8,06	4,56	12,4	12,2	25,8	12,5	18,9	3,35	0,98	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,3	8,2	9,8	7,4	11,2	8,7	7,0
-0,149+0,105	Magn	9,4	0,69	0,62	1,56	0,89	78,2	12,3	2,69	0,60	0,57	0,9	1,1	0,7	25,1	8,5	1,3	1,2	0,05	0,1	0,06	1,9	0,9	0,1	0,1
	-0,0+0,3 A	30,0	2,47	2,80	9,20	6,30	40,9	24,2	7,10	2,97	0,77	14,9	21,5	19,2	45,8	59,4	12,1	20,6	0,8	1,5	1,6	3,6	6,6	1,0	1,9
	-0,3+0,5 A	28,8	2,37	9,20	7,70	5,10	19,0	9,40	20,4	8,00	0,66	47,1	19,4	14,1	20,9	22,2	33,4	53,3	2,5	1,5	1,2	1,6	2,5	2,8	4,9
	-0,5+0,8 A	12,4	1,02	11,7	16,5	15,2	7,90	6,00	22,4	5,40	0,92	25,8	17,8	18,1	3,7	6,1	15,8	15,5	1,4	1,4	1,5	0,3	0,7	1,3	1,4
	-0,8+1,0 A	3,2	0,26	3,80	23,5	26,3	4,50	2,58	30,8	1,07	1,11	2,2	6,6	8,1	0,5	0,7	5,6	0,8	0,1	0,5	0,7	0,04	0,1	0,5	0,1
	Não Mag	17,1	1,41	3,00	22,5	24,8	4,43	2,29	32,8	2,20	1,10	9,1	33,6	40,8	2,9	3,2	31,9	8,7	0,5	2,6	3,5	0,2	0,4	2,7	0,8
	Total	100,0	8,22	5,63	11,5	10,4	25,2	12,2	17,5	4,33	0,91	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,4	7,7	8,5	7,7	11,1	8,3	9,2
-0,105+0,074	Magn	6,3	0,35	0,70	1,39	0,70	81,2	10,0	2,37	0,80	0,50	0,8	0,7	0,4	19,3	5,4	0,9	0,8	0,03	0,04	0,02	1,0	0,4	0,05	0,05
	-0,0+0,3 A	39,4	2,18	4,10	9,10	5,60	35,3	19,0	10,4	5,00	0,69	28,0	25,6	20,4	54,3	64,0	25,3	43,3	1,0	1,4	1,2	2,8	4,5	1,3	2,8
	-0,3+0,5 A	34,8	1,93	9,60	12,4	9,80	17,8	9,20	17,7	6,40	0,79	57,9	34,6	31,5	23,5	27,4	38,0	48,9	2,1	1,9	1,9	1,2	2,0	2,0	3,2
	-0,5+0,8 A	2,5	0,14	10,5	20,5	18,5	8,30	6,00	20,3	4,36	0,90	4,6	4,1	4,3	0,8	1,3	3,1	2,4	0,2	0,2	0,3	0,04	0,09	0,2	0,2
	-0,8+1,0 A	3,2	0,18	5,60	22,9	24,6	5,60	3,54	25,8	2,39	1,07	3,1	6,0	7,4	0,7	1,0	5,2	1,7	0,1	0,3	0,4	0,04	0,07	0,3	0,1
	Não Mag	13,7	0,76	2,40	25,3	28,4	2,63	0,87	32,4	0,95	1,08	5,7	29,0	35,0	1,4	1,0	27,5	2,9	0,2	1,5	2,2	0,07	0,07	1,4	0,2
	Total	100,0	5,53	5,78	12,5	10,8	25,3	11,7	16,2	4,55	0,87	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,7	5,6	6,0	5,2	7,1	5,2	6,5
-0,074+0,037	Magn	2,6	0,25	1,10	2,44	1,30	79,9	8,00	3,09	0,96	0,53	0,4	0,5	0,4	7,9	2,1	0,5	0,4	0,03	0,05	0,03	0,7	0,2	0,04	0,06
	-0,0+0,3 A	68,2	6,54	7,50	11,2	7,60	29,8	12,1	12,9	5,50	0,68	65,6	67,3	59,9	78,5	85,3	54,8	63,2	5,7	6,0	5,0	7,0	9,7	4,9	9,3
	-0,3+0,5 A	26,4	2,53	9,80	11,3	10,2	13,0	4,50	23,2	8,00	0,90	33,2	25,3	31,1	13,3	12,3	38,1	35,6	2,9	2,3	2,5	1,2	1,3	3,4	5,2
	-0,5+0,8 A	1,5	0,14	2,90	22,0	25,5	3,88	1,49	30,9	3,15	1,16	0,5	2,8	4,3	0,2	0,2	2,8	0,8	0,05	0,2	0,4	0,02	0,02	0,2	0,1
	-0,8+1,0 A	0,2	0,02	2,20	24,5	29,3	2,33	0,71	34,8	0,51	1,19	0,1	0,4	0,7	0,0	0									

O teor médio de Fe_2O_3 é da ordem de 75,9% (32,9% do total contido no ensaio; 20,2% em relação à amostra inicial) e o teor médio de TiO_2 é 13,9% (13,6% do total contido no ensaio; 11,4% em relação à amostra inicial).

O produto $-0,0+0,3A$ total $+0,037$ mm corresponde a cerca de 36,3% em peso de material (24,5% em relação a amostra total); para o intervalo $-0,595+0,149$ mm a proporção em peso desse produto permanece praticamente constante e da ordem de 30%, atingindo 68,2% na fração $-0,074+0,037$ mm; mostra teor de OTR de 3,91%, o que corresponde a 30,6% do total de OTR contido no ensaio (11,1% em relação ao total da amostra). Junto a esse produto, os teores de OTR mais elevados estão preferencialmente associados às frações mais finas. O teor médio de Fe_2O_3 desse produto é da ordem de 33,0% (46,9% do total contido no ensaio; 28,9% em relação à amostra inicial) e o teor médio de TiO_2 é 17,5% (56,4% do total contido no ensaio; 47,4% em relação à amostra inicial).

O produto $-0,3+0,5A$ total $+0,037$ mm corresponde a 21,6% em peso de material (14,6% em relação a amostra total); sua proporção em peso aumenta em direção às frações finas até 0,074 mm. Apresenta teor de OTR de 7,68%, o que corresponde a 35,8% do total de OTR contido no ensaio (13,0% em relação ao total da amostra). Junto a esse produto, os teores de OTR variam entre 2,00% (fração $-0,84+0,595$ mm) e 9,80% (para a fração $-0,074+0,037$ mm), estando os teores mais elevados preferencialmente associados às frações mais finas. Mantêm-se associados a esse produto, teores médios de Fe_2O_3 de 17,8%, de TiO_2 de 9,71%, de SiO_2 de 21,5% e de CaO de 7,67%.

O produto $-0,5+0,8A$ total $+0,037$ mm corresponde a 8,9% em peso de material (6,0% em relação a amostra total); a proporção em peso desse produto aumenta em direção às frações finas até 0,105 mm. Este produto tem teor de OTR de 11,0%, o que corresponde a 21,2% do total de OTR contido no ensaio (7,7% em relação ao total da amostra). Junto a esse produto, os teores de OTR variam entre 2,60% (fração $-0,84+0,595$ mm) e 14,2% (fração $-0,297 +0,210$ mm). Esse produto tem teores médios de CaO de 14,1%, SiO_2 de 25,3%, Fe_2O_3 de 7,80% e de TiO_2 de 9,60%.

O produto $-0,8+1,0A$ total $+0,037$ mm corresponde a 4,2% em peso de material (2,9% em relação à amostra total); sua proporção em peso diminui em direção às frações finas. Este produto tem teor de OTR de 3,99, o que corresponde a 3,6% do total de OTR contido no ensaio (1,3% em relação ao total da amostra). Junto a esse produto, os teores de OTR variam entre 2,20% (fração $-0,074+0,037$ mm) e 4,00% (fração $-0,595+0,297$ mm). Teores médios de CaO de 19,4%, SiO_2 de 40,2%, Fe_2O_3 de 5,38%, e de TiO_2 de 5,55% mantêm-se associados a esse produto.

O produto *Não Magnético total +0,037 mm* corresponde a cerca de 17,8% em peso de material (12,0% em relação a amostra total); sua proporção diminui em direção às frações finas. Este produto tem teor de OTR de 1,95%, o que corresponde a 7,5% do total de OTR contido no ensaio (2,7% em relação ao total da amostra). Junto a esse produto, os teores de OTR variam entre 1,12% (fração -0,074+0,037 mm) e 3,00% (-0,149+0,105 mm). Esse produto apresenta teores médios de CaO de 28,6%, SiO₂ de 34,4%, Fe₂O₃ de 2,22%, e TiO₂ de 1,08%.

6.1.4 Separações minerais em líquidos densos e em separador Frantz

Os resultados dos ensaios de separação mineral em líquidos densos efetuados até a fração 0,020 mm estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Distribuição de teores nos produtos de separação por líquidos densos - Amostra saprolito

Fração mm	Produto	% Peso		Teores (%)							CaO/P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)						
		ensaio	amost.	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃		OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
-0,84+0,297	flutuado	27,5	7,24	1,70	3,16	2,31	9,80	2,31	86,3	2,90	0,73	14,7	7,1	5,1	9,7	5,9	83,4	40,7	1,5	2,0	1,8	2,4	1,9	30,5	6,0
	intermed.	21,9	5,76	2,00	31,9	37,8	4,23	1,37	8,50	1,78	1,18	13,8	57,3	65,9	3,4	2,8	8,5	19,9	1,4	16,0	23,9	0,9	0,9	3,1	2,9
	afundado	50,8	13,31	4,49	8,57	7,19	46,9	19,4	3,51	1,53	0,84	71,5	35,6	29,0	86,9	91,3	8,1	39,5	7,1	9,8	10,5	22,0	28,6	3,0	5,8
	Total	100,0	26,31	3,18	12,2	12,5	27,3	10,7	21,9	1,98	1,03	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	9,9	27,9	35,3	25,3	31,4	36,5	14,7
-0,297+0,210	flutuado	25,1	2,41	0,91	1,84	1,42	8,20	0,93	82,2	4,80	0,73	5,9	4,1	3,1	7,9	1,9	83,3	45,6	0,3	0,4	0,4	0,7	0,2	9,5	3,3
	intermed.	16,9	1,62	1,80	30,3	35,3	4,05	0,97	9,40	1,96	1,17	7,8	42,8	52,4	2,6	1,4	8,5	12,5	0,3	4,3	6,3	0,2	0,2	1,0	0,9
	afundado	58,0	5,56	5,78	11,0	8,72	40,2	20,0	2,84	1,90	0,80	89,3	53,2	44,5	89,5	98,7	8,2	41,8	3,8	5,3	5,3	7,9	12,4	0,9	3,0
	Total	100,0	9,59	3,88	12,0	11,4	26,1	12,0	18,7	2,64	0,95	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,4	10,0	12,0	8,8	12,8	11,4	7,2
-0,210+0,149	flutuado	26,1	2,10	0,91	4,13	4,23	7,40	0,86	54,0	6,10	1,02	4,8	9,2	10,4	7,5	2,1	83,1	49,2	0,2	0,8	1,0	0,5	0,2	7,2	3,6
	intermed.	11,9	0,96	1,90	27,9	32,3	4,80	0,93	13,0	3,07	1,16	4,6	28,3	36,2	2,2	0,9	9,1	11,3	0,2	2,3	3,4	0,2	0,1	0,8	0,8
	afundado	62,0	5,00	7,23	11,8	9,15	37,6	18,9	2,13	2,08	0,77	90,6	62,5	53,4	90,3	97,0	7,8	39,5	4,3	5,2	5,0	6,6	10,5	0,7	2,9
	Total	100,0	8,06	4,95	11,7	10,6	25,8	12,1	17,0	3,24	0,90	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,7	8,2	9,4	7,3	10,8	8,7	7,4
-0,149+0,105	flutuado	27,7	2,28	1,80	2,61	2,09	10,2	2,52	47,1	7,50	0,80	7,9	6,5	6,2	11,4	6,0	83,4	49,7	0,4	0,5	0,5	0,8	0,8	6,8	4,8
	intermed.	11,5	0,95	2,30	27,5	30,5	6,20	0,91	10,8	4,08	1,11	4,7	28,5	37,6	2,9	0,9	8,0	11,3	0,3	2,3	3,2	0,2	0,1	0,6	1,1
	afundado	60,8	5,00	8,07	11,9	8,85	34,9	17,9	2,22	2,88	0,73	87,4	65,0	56,2	85,7	93,1	8,6	39,0	4,8	5,2	4,8	8,1	9,9	0,7	3,8
	Total	100,0	8,22	5,61	11,1	9,35	24,7	11,7	15,6	4,18	0,84	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,5	8,0	8,5	7,2	10,7	8,2	9,7
-0,105+0,074	flutuado	25,2	1,40	0,98	3,50	3,49	7,80	0,88	47,7	8,20	1,00	4,4	8,5	10,6	7,4	2,1	77,0	46,3	0,2	0,4	0,5	0,4	0,1	4,2	3,2
	intermed.	8,4	0,46	1,70	15,1	15,6	6,80	0,79	28,0	7,10	1,03	2,5	12,1	15,7	2,1	0,6	13,9	13,3	0,1	0,6	0,8	0,1	0,0	0,8	0,9
	afundado	66,4	3,67	7,95	12,5	9,25	36,2	15,5	2,14	2,72	0,74	93,1	79,5	73,8	80,5	97,3	9,1	40,4	3,5	4,0	3,7	4,7	6,3	0,5	2,8
	Total	100,0	5,53	5,67	10,4	8,33	26,6	10,6	15,6	4,47	0,80	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,7	5,0	5,1	5,2	6,5	5,5	7,0
-0,074+0,037	flutuado	24,2	2,32	1,20	1,43	1,34	7,80	0,89	50,2	8,80	0,84	4,5	3,9	3,8	7,1	1,7	87,3	42,8	0,3	0,3	0,3	0,6	0,2	7,4	5,8
	intermed.	6,3	0,60	4,00	20,2	16,6	13,7	3,78	8,70	7,50	0,82	3,9	11,1	12,4	3,3	2,5	3,9	9,4	0,3	1,1	1,1	0,3	0,3	0,3	1,3
	afundado	69,5	6,67	8,43	14,1	10,2	33,5	13,3	1,76	3,45	0,72	91,5	85,8	83,8	89,6	95,8	8,8	48,0	6,7	8,2	7,5	7,9	9,9	0,7	6,5
	Total	100,0	9,60	6,40	11,4	8,44	26,0	8,84	13,9	5,00	0,74	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7,3	9,5	8,9	8,8	10,3	8,5	13,6
-0,037+0,020	flutuado	21,9	2,07	2,40	2,38	1,87	10,2	1,35	41,1	10,5	0,79	5,5	4,8	5,8	8,2	4,4	67,7	39,9	0,6	0,4	0,4	0,7	0,3	5,4	6,2
	intermed.	12,9	1,22	3,30	9,90	8,30	12,0	1,78	22,4	11,4	0,84	4,4	11,7	15,2	6,4	3,4	21,8	25,6	0,5	1,1	1,1	0,5	0,2	1,7	3,9
	afundado	65,1	6,14	13,3	14,1	8,59	31,6	9,47	2,15	3,08	0,61	80,1	83,6	79,0	84,4	92,1	10,5	34,5	9,7	7,5	5,8	6,8	6,5	0,8	5,3
	Total	100,0	9,43	9,64	11,0	7,08	24,4	6,69	13,3	5,77	0,64	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	10,8	9,0	7,3	8,1	7,0	8,0	15,4
Total +0,020	flutuado	25,8	19,81	1,47	2,79	2,30	8,87	1,63	56,5	5,88	0,83	7,5	6,2	5,7	8,9	4,0	81,9	43,9	3,5	4,8	5,0	6,2	3,6	71,0	32,9
	intermed.	15,1	11,57	2,22	27,4	31,3	5,83	1,39	11,4	3,83	1,14	6,5	35,5	45,5	3,4	2,0	9,6	15,9	3,0	27,6	39,8	2,4	1,8	8,3	11,9
	afundado	59,1	45,36	7,40	11,5	8,55	38,8	18,7	2,56	2,35	0,75	86,0	58,3	48,8	87,8	94,0	8,5	40,3	39,8	45,3	42,6	61,9	84,1	7,4	30,2
	Total	100,0	76,74	5,09	11,6	10,4	26,1	10,5	17,8	3,45	0,89	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	46,3	77,7	87,5	70,5	89,5	86,7	75,0

A proporção em peso do produto *flutuado total +0,020 mm* é de 25,8% (19,8% da amostra total); ao longo do intervalo granulométrico considerado varia entre 21,9% (na fração -0,037+0,020 mm) e 27,7% (na fração -0,149+0,105 mm), com tendência geral à

diminuição para os finos. No produto flutuado total +0,020 mm, o teor médio de OTR é de 1,47% (variando entre 0,91 e 2,40%, sem tendência definida), o que corresponde a aproximadamente 7,5% do total de OTR contidas no ensaio (3,5% do total da amostra), enquanto que o teor de SiO₂ é de 56,5% (variando entre 41,1 e 66,3%, com tendência à diminuição para os finos); o teor médio de Fe₂O₃ é de 8,97%.

A proporção em peso do produto *intermediário total +0,020 mm* é de 15,1% (11,6% em relação a amostra inicial); ao longo do intervalo granulométrico considerado varia entre 6,3% (fração -0,074+0,037 mm) e 21,9% (fração -0,84+0,297 mm), com tendência geral à diminuição para os finos. No produto intermediário total +0,020 mm, o teor médio de OTR é de 2,22% (variando entre 1,70 e 4,00%, sem tendência definida), o que corresponde a aproximadamente 6,6% do total de OTR contidas no ensaio (3,0% do total da amostra), enquanto que o teor de SiO₂ é de 11,4% (variando entre 8,50 e 26,0%, sem tendência muito definida); o teor médio de P₂O₅ é de 27,4% (35,5% do total contido no ensaio; 27,6% do total da amostra), variando ao longo do intervalo granulométrico considerado entre 9,90% (fração -0,037+0,020 mm) e 31,9% (fração -0,84+0,297 mm); o teor médio de CaO é de 31,3% (45,5% em relação ao total contido no ensaio; 39,8% do total contido na amostra).

A proporção em peso do produto *afundado total +0,020 mm* é de 59,1% (45,4% em relação a amostra inicial); ao longo do intervalo granulométrico considerado varia entre 50,6% (fração -0,84+0,297 mm) e 69,5% (fração -0,074+0,037 mm), com tendência geral à elevação para os finos.

Nesse produto, o teor médio de OTR é de 7,40%, o que corresponde a 86,0% do total de OTR contidas no ensaio (39,8% do total da amostra); ao longo do intervalo granulométrico varia entre 4,49% (fração -0,84+0,297 mm) e 13,3% (fração -0,037+0,020 mm), com tendência à elevação para os finos.

O teor médio de Fe₂O₃ é de 38,8%, variando entre 31,6% (fração -0,037+0,020 mm) e 46,9% (fração -0,84+0,297 mm), diminuindo para os finos; o teor médio de P₂O₅ é de 11,5% (58,3% do total contido no ensaio; 45,3% do total da amostra); o teor médio de CaO é de 8,55% (48,8% em relação ao total contido no ensaio; 42,6% do total contido na amostra).

A Tabela 10 mostra um sumário das separações por líquidos densos para a fração total +0,020mm. As terras raras concentram-se essencialmente no produto afundado, que contém no total 86% dos OTR do material retido em 0,020 mm, mas fica com teores extremamente elevados de ferro.

Tabela 10 - Sumário dos resultados de separação em líquidos densos (+ 0,020 mm) - Amostra saprolito

Produto	% Peso		Teores (%)									Distribuição OTR (%)	
	ensaio	amostra	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	ensaio	amostra
Flutuado	25,8	19,8	1,47	2,79	2,30	8,97	1,63	56,5	5,86	8,93	0,61	7,5	3,5
Intermediário	15,1	11,6	2,22	27,4	31,3	5,83	1,39	11,36	3,63	2,53	2,12	6,6	3,0
Afundado	59,1	45,4	7,40	11,5	8,55	38,8	16,7	2,56	2,35	0,60	2,31	86,0	40,0
Total	100,0	76,7	5,09	11,6	10,4	26,1	10,5	17,8	3,45	3,04	1,84	100,0	46,5

Os resultados dos ensaios de separação magnética, efetuados para o produto afundado até 0,037 mm, estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Distribuição de teores nos produtos de separação magnética efetuada nos produtos afundados - Amostra saprolito

Fração mm	Produto	% Peso		Teores (%)								CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)						Distribuição na amostra (%)						
		fração	amostra	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	OTR		P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
-0,84+0,297	Magn	57,3	7,83	0,82	4,70	4,41	62,7	17,7	3,76	0,97	0,94	10,5	31,4	35,1	76,6	52,4	61,4	36,3	0,7	3,1	3,7	16,8	15,0	1,8	2,1
	Fort. Magn.	12,7	1,89	2,10	6,30	4,80	42,5	28,2	4,33	2,63	0,73	5,9	9,3	8,1	11,5	18,4	15,6	21,7	0,4	0,9	0,9	2,5	5,3	0,5	1,3
	Não Mag	30,0	4,00	12,5	16,9	13,6	18,7	18,8	2,69	2,14	0,80	83,6	59,2	58,8	12,0	28,2	23,0	42,0	5,9	5,9	6,0	2,6	3,4	0,7	2,4
	Total	100,0	13,31	4,49	8,57	7,19	46,9	19,4	3,51	1,53	0,84	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7,1	9,9	10,5	22,0	28,6	3,0	5,8
-0,297+0,210	Magn	48,2	2,88	1,40	6,00	4,50	59,4	19,2	3,02	1,53	0,75	11,7	26,4	24,9	71,2	46,3	55,1	38,8	0,4	1,4	1,3	5,6	5,7	0,5	1,2
	Fort. Magn.	16,7	0,93	2,20	6,30	4,37	40,7	31,5	2,51	2,22	0,69	6,4	9,6	8,4	16,9	26,3	15,9	19,5	0,2	0,5	0,4	1,3	3,3	0,1	0,6
	Não Mag	35,1	1,95	13,5	20,0	16,6	13,6	15,6	2,18	2,26	0,85	82,0	64,0	66,8	11,9	27,4	29,0	41,7	3,1	3,4	3,6	0,9	3,4	0,3	1,3
	Total	100,0	5,56	5,78	11,0	8,72	40,2	20,0	2,64	1,80	0,80	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,8	5,3	5,3	7,9	12,4	0,9	3,0
-0,210+0,149	Magn	43,1	2,15	2,30	6,20	4,23	57,2	19,7	2,30	1,88	0,88	13,7	22,6	19,9	65,6	44,8	46,8	35,1	0,6	1,2	1,0	4,3	4,7	0,3	1,0
	Fort. Magn.	18,4	0,92	2,70	6,10	3,81	41,8	30,2	2,12	2,35	0,62	6,9	9,5	7,6	20,4	29,3	18,3	20,9	0,3	0,5	0,4	1,3	3,1	0,1	0,6
	Não Mag	38,5	1,93	14,9	20,9	17,2	13,6	12,7	1,94	2,35	0,82	79,4	68,0	72,4	14,0	25,9	35,1	43,9	3,4	3,5	3,6	0,9	2,7	0,2	1,3
	Total	100,0	5,00	7,23	11,8	9,15	37,6	18,9	2,13	2,06	0,77	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,3	5,2	5,0	6,6	10,5	0,7	2,8
-0,149+0,105	Magn	40,7	2,03	4,30	7,00	4,08	46,6	23,3	2,38	2,76	0,58	21,7	23,9	19,1	54,3	53,0	43,6	41,9	1,0	1,2	0,9	3,3	5,3	0,3	1,6
	Fort. Magn.	20,6	1,03	2,10	5,10	3,13	52,7	21,2	1,92	1,77	0,81	5,4	8,8	7,4	31,1	24,4	17,8	13,6	0,3	0,5	0,4	1,9	2,4	0,1	0,5
	Não Mag	38,8	1,94	15,2	20,7	16,4	13,1	10,4	2,21	3,08	0,79	73,0	67,3	73,5	14,6	22,6	38,6	44,5	3,5	3,5	3,5	0,9	2,2	0,3	1,7
	Total	100,0	5,00	8,07	11,9	8,85	34,9	17,9	2,22	2,68	0,73	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,8	5,2	4,8	6,1	9,9	0,7	3,8
-0,105+0,074	Magn	35,1	1,29	2,80	5,70	3,40	56,7	21,2	1,61	1,72	0,80	12,4	16,0	12,9	54,9	47,9	26,4	22,2	0,4	0,6	0,5	2,6	3,0	0,1	0,6
	Fort. Magn.	23,7	0,87	4,00	6,40	3,40	45,8	19,9	2,51	2,87	0,53	11,9	12,1	8,7	29,9	30,3	27,8	25,0	0,4	0,5	0,3	1,4	1,9	0,1	0,7
	Não Mag	41,2	1,51	14,6	21,8	17,6	13,3	8,20	2,38	3,49	0,81	75,7	71,9	78,4	15,1	21,8	45,8	52,9	2,6	2,9	2,9	0,7	1,4	0,2	1,5
	Total	100,0	3,67	7,95	12,5	9,3	36,2	15,5	2,14	2,72	0,74	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,5	4,0	3,7	4,7	6,3	0,5	2,8
-0,074+0,037	Magn	34,5	2,30	4,50	8,40	5,00	49,3	20,1	1,73	2,54	0,80	18,4	20,6	16,9	50,8	52,2	34,0	25,4	1,2	1,7	1,3	4,0	5,1	0,3	1,7
	Fort. Magn.	41,3	2,76	9,20	13,5	8,80	31,9	12,1	1,82	3,84	0,65	45,1	39,6	35,7	39,4	37,6	42,8	46,0	3,0	3,2	2,7	3,1	3,7	0,3	3,0
	Não Mag	24,2	1,61	12,7	23,2	19,9	13,6	5,60	1,98	4,09	0,86	36,5	39,8	47,3	9,8	10,2	23,2	28,7	2,4	3,3	3,5	0,8	1,0	0,2	1,9
	Total	100,0	6,67	8,43	14,1	10,2	33,5	13,3	1,76	3,45	0,72	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	6,7	8,2	7,5	7,9	9,9	0,7	6,5
Total +0,037	Magn	46,1	18,09	2,08	5,87	4,37	57,6	19,3	2,91	1,59	0,74	14,8	24,5	23,6	66,5	50,1	51,2	32,8	4,5	9,2	8,7	36,6	38,9	3,3	8,2
	Fort. Magn.	20,9	8,19	4,77	8,56	5,59	40,3	21,6	2,53	2,88	0,65	15,4	16,2	13,7	21,1	25,3	20,2	26,9	4,6	6,1	5,0	11,6	19,7	1,3	6,7
	Não Mag	33,0	12,94	13,7	19,9	16,3	15,1	13,3	2,27	2,73	0,82	69,8	59,3	62,8	12,4	24,6	28,6	40,3	21,0	22,4	23,1	6,9	19,1	1,9	10,0
	Total	100,0	39,22	6,47	11,1	8,55	40,0	17,8	2,82	2,24	0,77	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	30,1	37,8	36,8	55,1	77,6	6,5	24,9

O produto *afundado magnético total +0,037 mm* corresponde a cerca de 46,1% em peso no ensaio, o que significa 18,1% em peso em relação a amostra inicial. A proporção em peso deste produto diminui para os finos (variando entre 34,5 e 57,3% no ensaio). Este produto apresenta teor médio de 2,08% de OTR (o que corresponde a 14,8% do OTR do ensaio; 4,5% do total contido na amostra); no intervalo granulométrico, os teores de OTR variam entre 0,82% (fração -0,84+0,297 mm) e 4,50% (fração -0,074+0,037 mm), enquanto que os teores de Fe₂O₃ variam entre 46,6% (-0,149+0,105 mm) e 62,7% (fração

-0,84+0,297 mm), com valor médio de 57,6% e tendência a decréscimo para os finos; o teor médio de TiO_2 é de 19,3% (variando entre 17,7 e 23,3%), o que corresponde a 50,1% do total contido no ensaio (38,9% do total contido na amostra).

O produto *afundado fortemente magnético total +0,037 mm* corresponde a 20,9% em peso no ensaio (variando entre 12,7 e 41,3% no ensaio), o que significa 8,2% em peso em relação a amostra inicial. De modo geral, a proporção em peso deste produto aumenta para os finos. Este produto apresenta teor médio de 4,77% de OTR (o que corresponde a 15,4% do OTR do ensaio; 4,6% do total contido na amostra); até 0,149 mm, os teores de OTR variam pouco, situando-se entre 2,10% e 2,70%; abaixo dessa fração, esses teores elevam-se consideravelmente, atingindo 9,20% na fração -0,074+0,037 mm.

Os teores de Fe_2O_3 variam entre 31,9% (fração -0,074+0,037 mm) e 52,7% (fração -0,149+0,105 mm), com valor médio de 40,3%; o teor médio de TiO_2 é de 21,6% (variando entre 12,1% e 31,5%), o que corresponde a 25,3% do total contido no ensaio (19,7% do total contido na amostra).

O produto *afundado não magnético total +0,037 mm* corresponde a 33,0% em peso no ensaio (variando entre 24,2 e 41,2% no ensaio), o que significa 12,9% em peso em relação a amostra inicial. De modo geral, sua proporção em peso aumenta para os finos até 0,074 mm. Este produto apresenta teor médio de 13,7% de OTR (o que corresponde a 69,8% do OTR do ensaio; 21,0% do total contido na amostra).

No intervalo granulométrico considerado, os teores de OTR situam-se entre 12,5% e 15,2%; os teores de Fe_2O_3 (com valor médio de 15,1%) variam pouco para a fração -0,297+0,037 mm (situando-se entre 13,1 e 13,6%), atingindo 18,7% na fração -0,84+0,297 mm; o teor médio de TiO_2 é de 13,3% (variando entre 5,60% e 18,8%), o que corresponde a 24,6% do total contido no ensaio (19,1% do total contido na amostra).

Portanto, nas separações magnéticas efetuadas no produto afundado, os óxidos de terras raras concentram-se junto ao produto não magnético, com teores variando entre 12,5% e 15,2% de OTR (Tabela 12 e Figura 15). Além dos OTR, os principais elementos presentes neste produto referem-se a P_2O_5 , CaO , Fe_2O_3 e TiO_2 , sendo que TiO_2 e, secundariamente, Fe_2O_3 apresentam teores notadamente decrescentes para as granulações mais finas.

O produto afundado não magnético mostra teores de OTR bem superiores aos da amostra original, com empobrecimento de ferro e sílica, porém com titânio mais elevado. Este produto tem, inclusive, características químicas bem distintas dos finos (-0,020 mm), com metade do teor de óxido de ferro, e um terço da sílica, entretanto, é muito mais rico em óxido de titânio.

Tabela 12 - Sumário dos resultados de separação magnética efetuada no produto afundado (fração total + 0,037mm) - Amostra saprolito

Produto	% Peso		Teores (%)									Distribuição OTR (%)	
	ensaio	amostra	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	ensaio	amostra
Magnético	46,1	18,1	2,08	5,87	4,37	57,6	19,3	2,91	1,59	0,64	1,01	14,8	4,5
Fort. Magn.	20,9	8,2	4,77	8,56	5,59	40,3	21,6	2,53	2,88	0,64	2,55	15,4	4,6
Não Magn.	33,0	12,9	13,7	19,9	16,3	15,1	13,3	2,27	2,73	0,35	3,51	69,8	21,0
Total	100,0	39,2	6,47	11,1	8,55	40,0	17,8	2,62	2,24	0,54	2,16	100,0	30,1

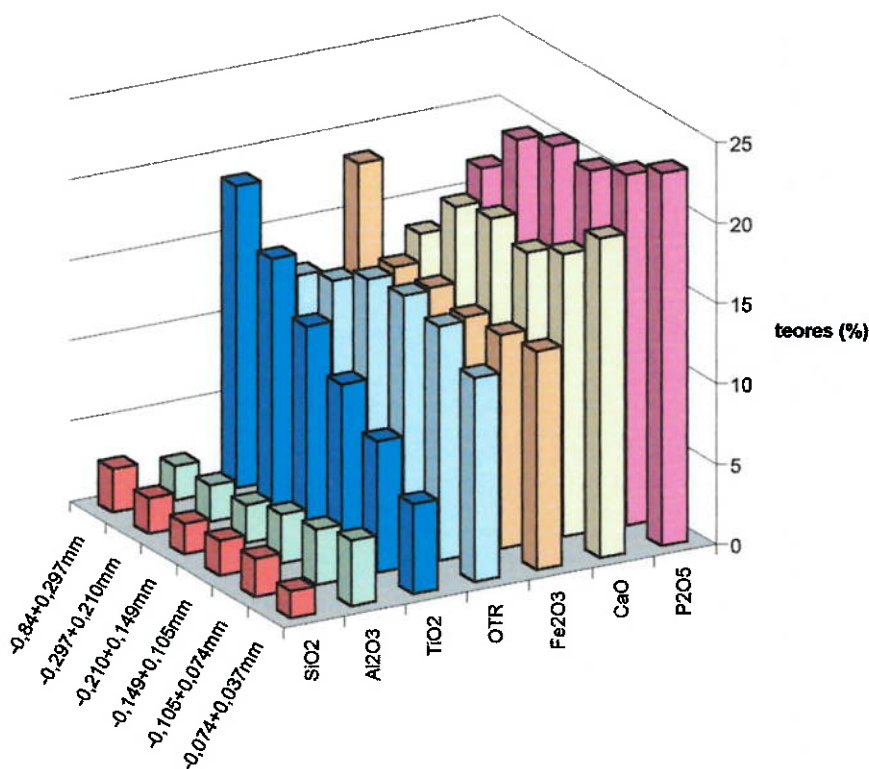


Figura 15 - Teores dos produtos afundados não magnéticos por fração granulométrica - Amostra saprolito

6.1.5 Composição mineralógica e características da monazita

O material estudado é constituído por óxidos-hidróxidos de ferro (predominantemente goethita, além de magnetita e hematita), argilominerais (clorita, vermiculita e hidrobiotita), apatita, monazita, quartzo e ilmenita, com quantidades menores de anatásio, alumino-fosfato (gorceixita), barita e zircão, como exposto na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição mineralógica estimada da amostra saprolito

Fração mm	% Peso retido	Minerais (% em peso)									
		monazita	apat.	alum. fosfat.	barita	ilmenita	anatásio	óx.ferro	quartzo	argilom	outros
-0,84+0,297	26,3	5	23	3	1	11	5	22	20	7	3
-0,297+0,210	9,6	6	21	4	1	11	6	20	15	10	4
-0,210+0,149	8,1	8	20	3	1	11	7	20	12	16	2
-0,149+0,105	8,2	9	17	3	2	12	5	18	9	22	1
-0,105+0,074	5,5	9	15	4	2	10	5	21	9	23	1
-0,074+0,037	9,6	10	16	5	3	10	5	21	7	23	tr
-0,037+0,020	9,4	15	13	3	3	4	5	22	5	30	tr
-0,020	23,3	30	3	Tr	3	2	3	34	tr	25	tr
Total calc	100,0	13	16	3	2	8	5	24	10	18	tr

tr < 1% em peso

Monazita é o principal portador de ETR, sendo raros outros minerais contendo esses elementos. Ocorre microcristalina, com cristalitos da ordem de poucos micra, sob a forma de agregados, por vezes coliformes, normalmente associada a óxidos-hidróxidos de ferro, apatita e quartzo. Como característica marcante apresenta-se bastante friável, o que lhe confere tendência natural à desagregação e conseqüente concentração junto às frações finas. A proporção em peso de monazita (total da ordem de 13%) aumenta para os finos; até a fração +0,037 mm sua proporção em peso varia entre 5 e 10%, passando para 15% na fração -0,037+0,020 mm e atingindo valores da ordem de 30% na fração -0,020 mm.

Óxidos-hidróxidos de ferro constituem aproximadamente 24% em peso da amostra. Ao longo da granulometria, sua proporção em peso varia entre 18 e 22% até a fração retida em 0,020 mm, atingindo 34% na fração -0,020 mm. O conteúdo de ilmenita (total da ordem de 8%) varia pouco acima de 0,037 mm, com valores compreendidos entre 10 e 12%, atingindo cerca de 2% em peso na fração -0,020 mm. A proporção em peso de apatita, até 0,020 mm, varia entre 13 e 23% com tendência a decréscimo para os finos; abaixo dessa fração esse valor atinge cerca de 3% em peso.

A proporção em peso de quartzo até 0,020 mm varia entre 5 e 20% em peso, com tendência à diminuição para os finos. Argilominerais mostram comportamento inverso ao do quartzo, com conteúdos variáveis entre 7 e 30% em peso.

Aspectos de associação da monazita com minerais de ganga são apresentados da Foto 7 até a Foto 17, obtidas em MEV (imagens de elétrons retro-espalhados).

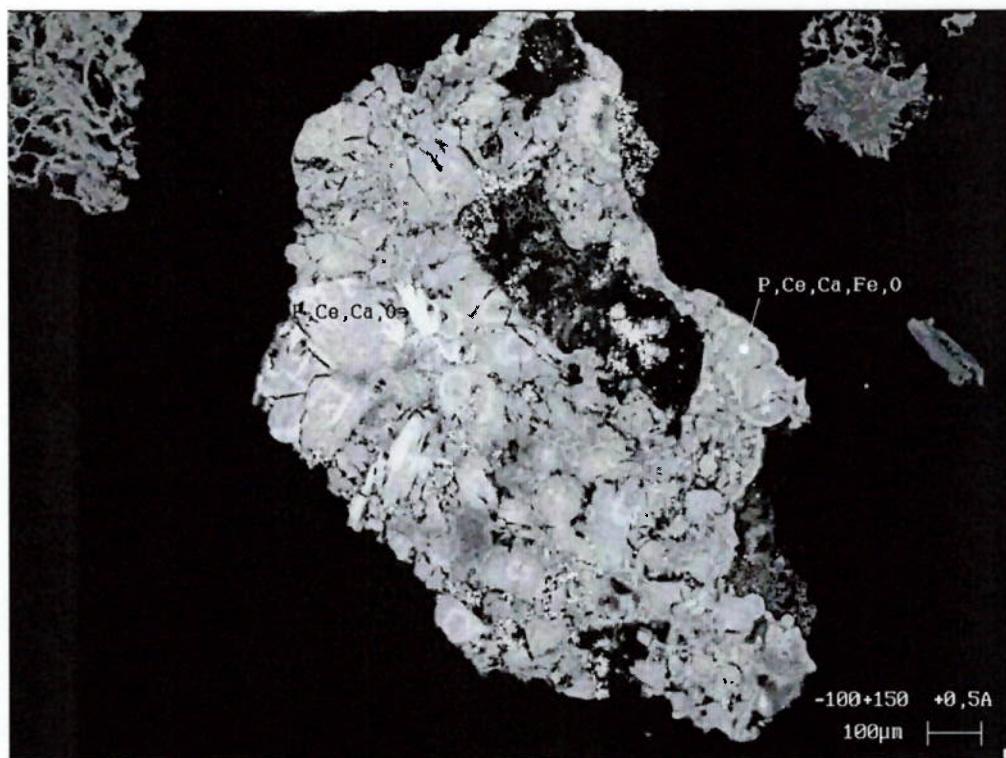


Foto 7 - Aspecto de um agregado de monazita. observa-se a textura coloforme da monazita (MEV, elétrons retroespalhados)

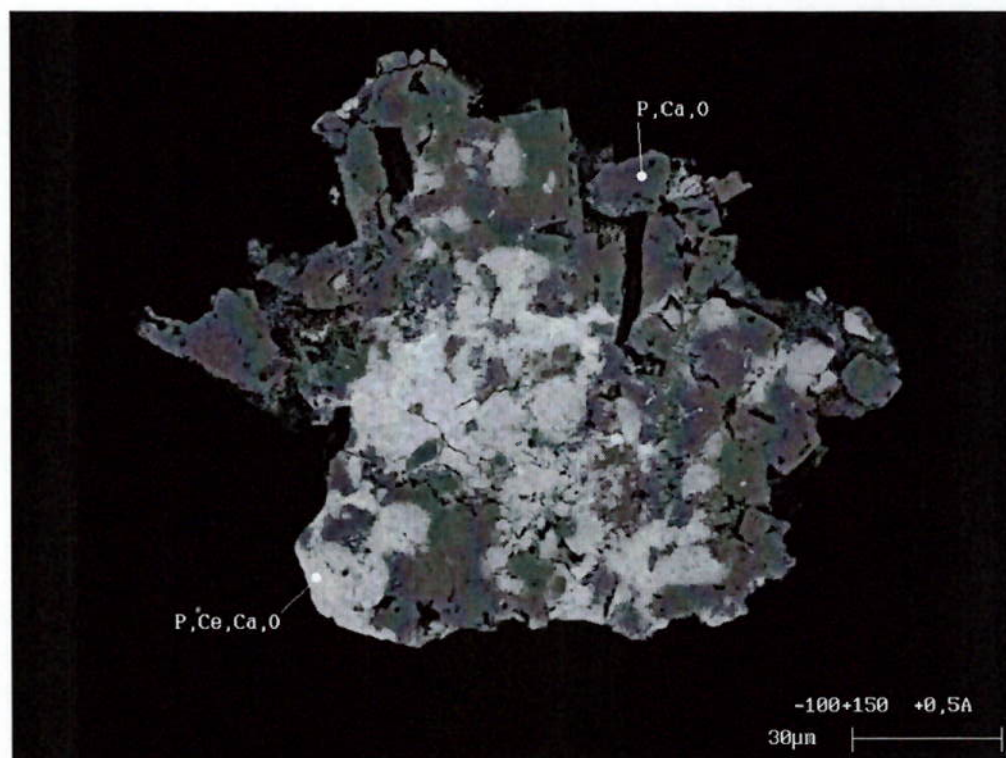


Foto 8 - Partícula mista de monazita com apatita (MEV, elétrons retroespalhados)

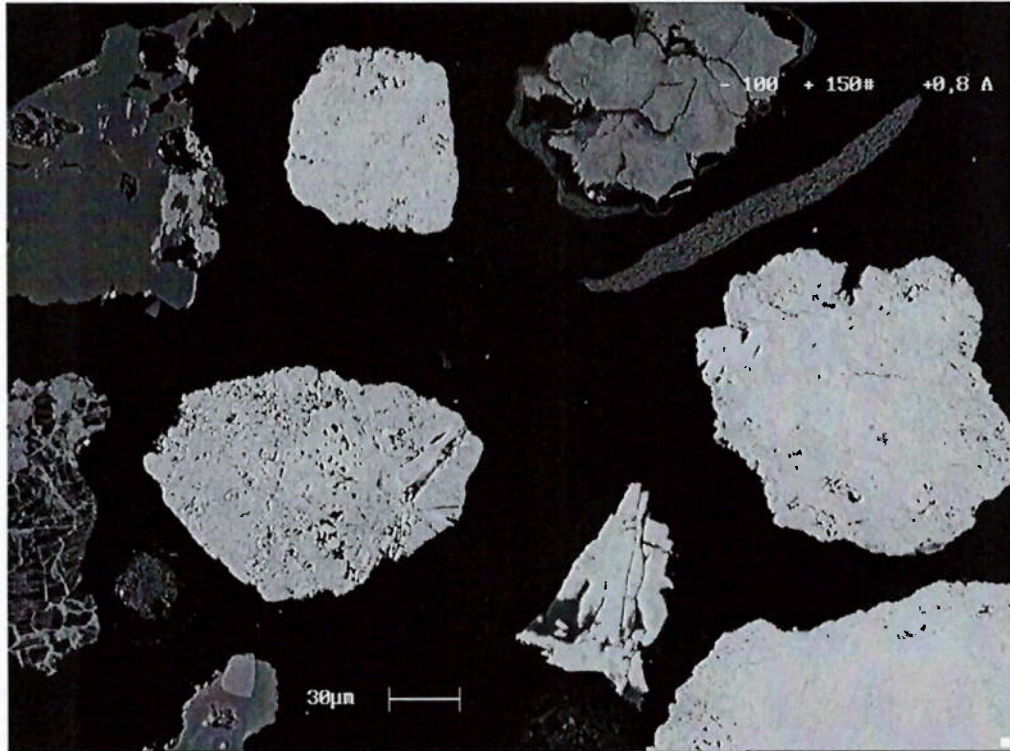


Foto 9 - Agregados de monazita (grãos claros). Nota-se a presença de discontinuidades nesses agregados, o que os torna frágeis e quebradiços (MEV, elétrons retroespalhados)

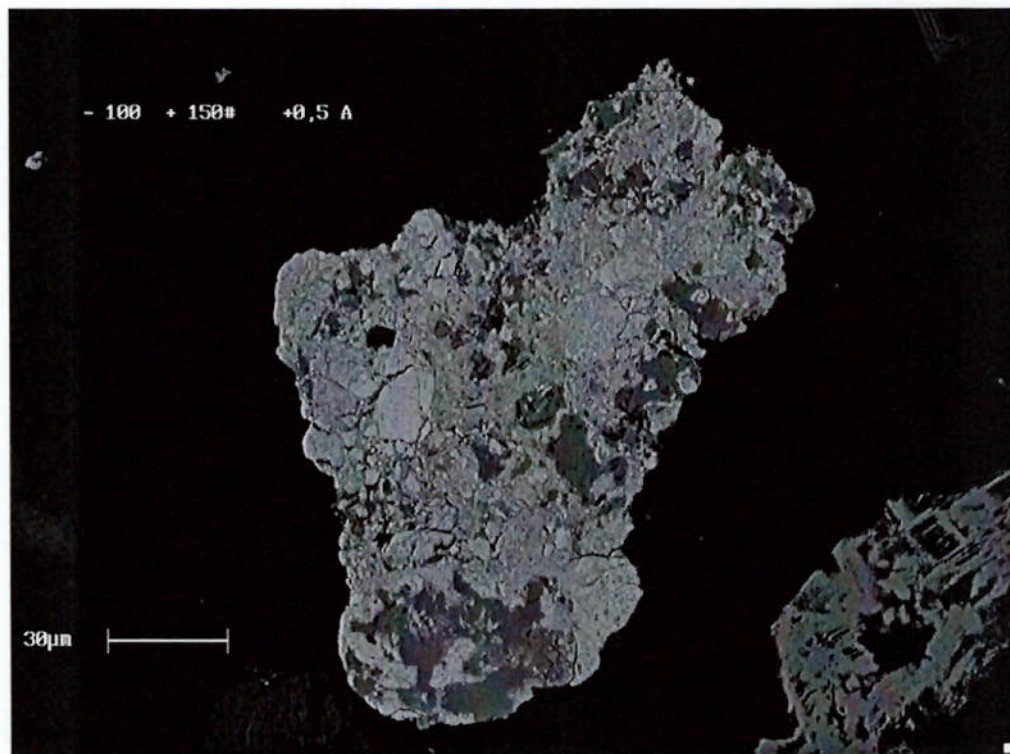


Foto 10 - Partícula mista de monazita (parte clara) com apatita (parte escura; MEV, elétrons retroespalhados)

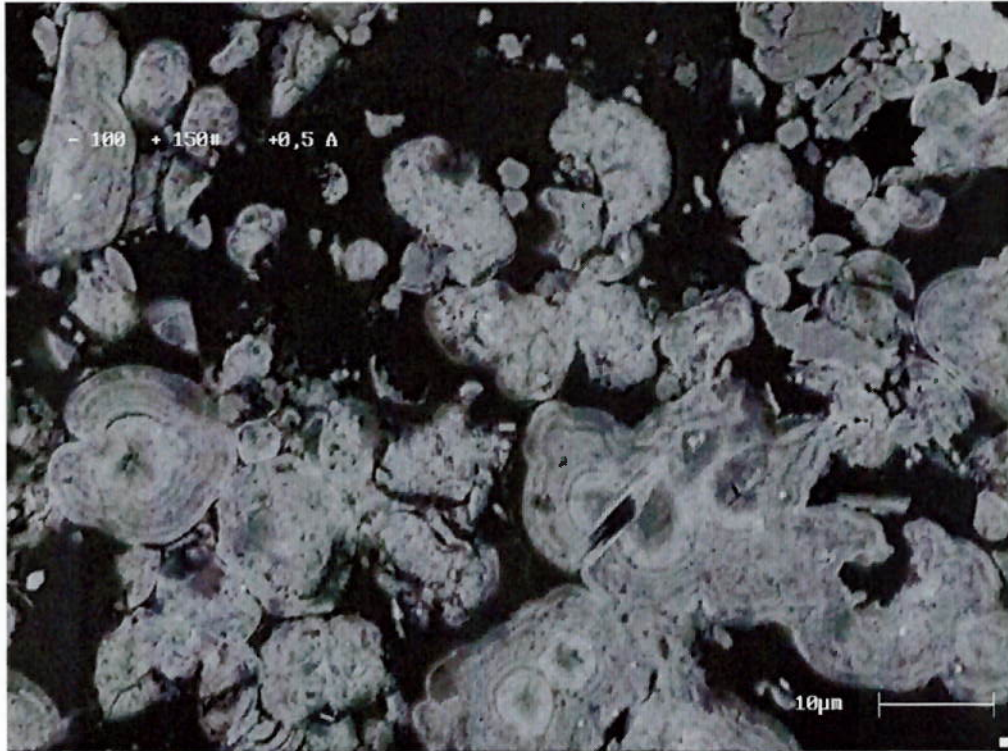


Foto 11 - Monazita de aspecto coloforme. Nota-se graduação de cor na monazita, possivelmente decorrente da variação do conteúdo de água (MEV, elétrons retroespalhados)

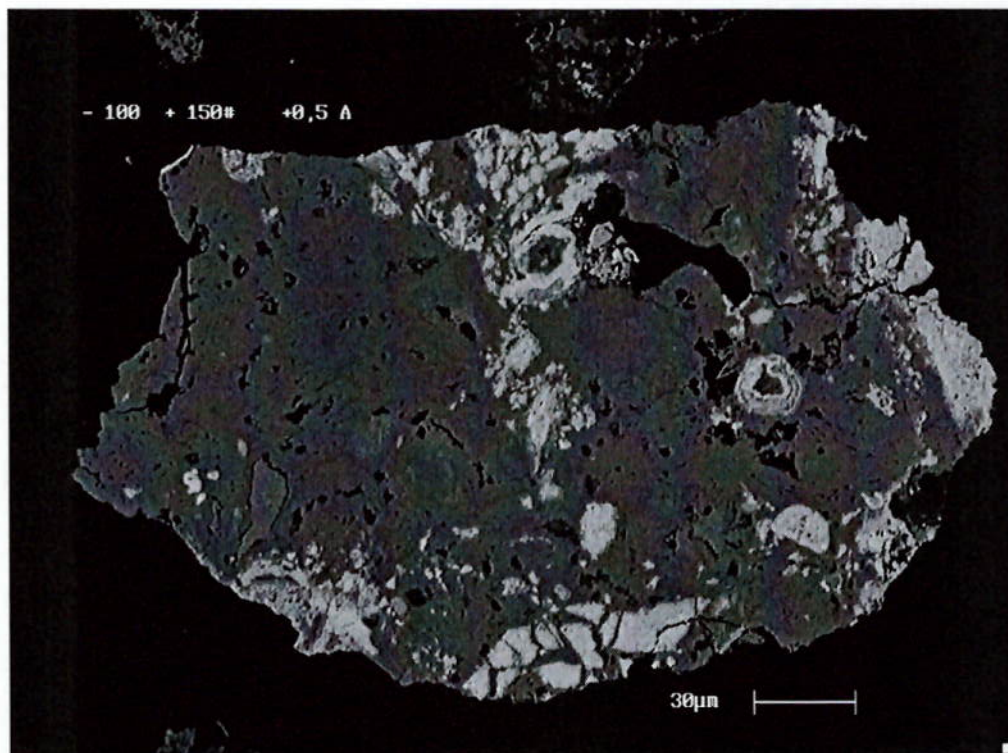


Foto 12 - Monazita coloforme em grão de óxido-hidróxido de ferro. Nota-se as diminutas dimensões desses agregados (MEV, elétrons retroespalhados)

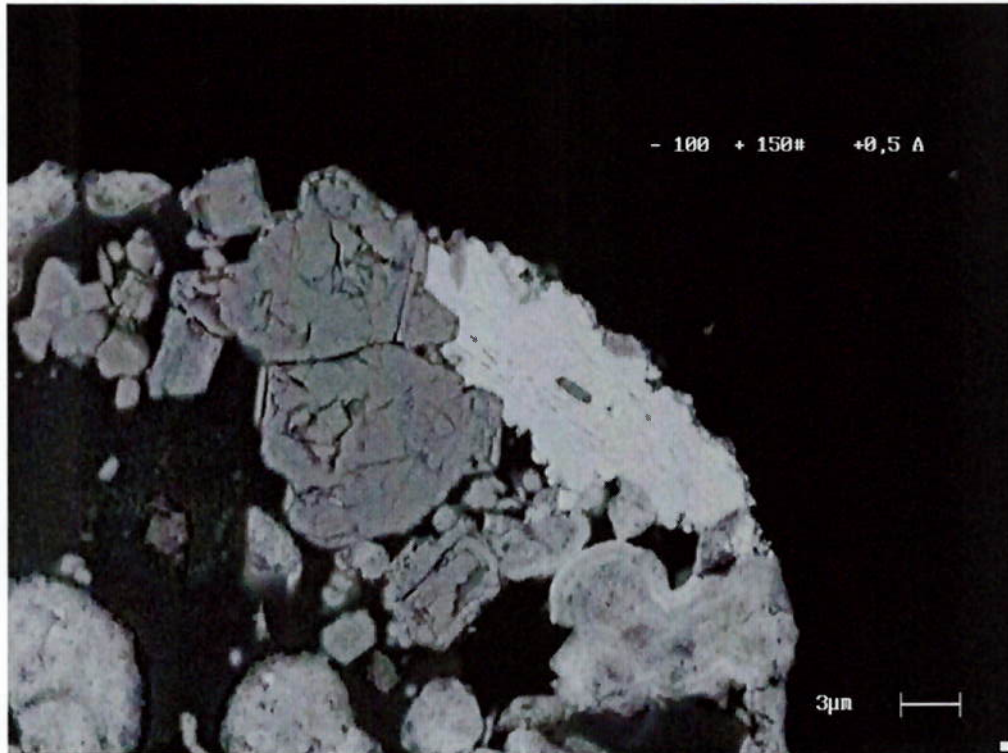


Foto 13 - Grão misto apresentando monazita coloforme (cinza claro), óxido-hidróxido de ferro (cinza médio), quartzo (cinza escuro) e barita (branco; MEV, elétrons retroespalhados)

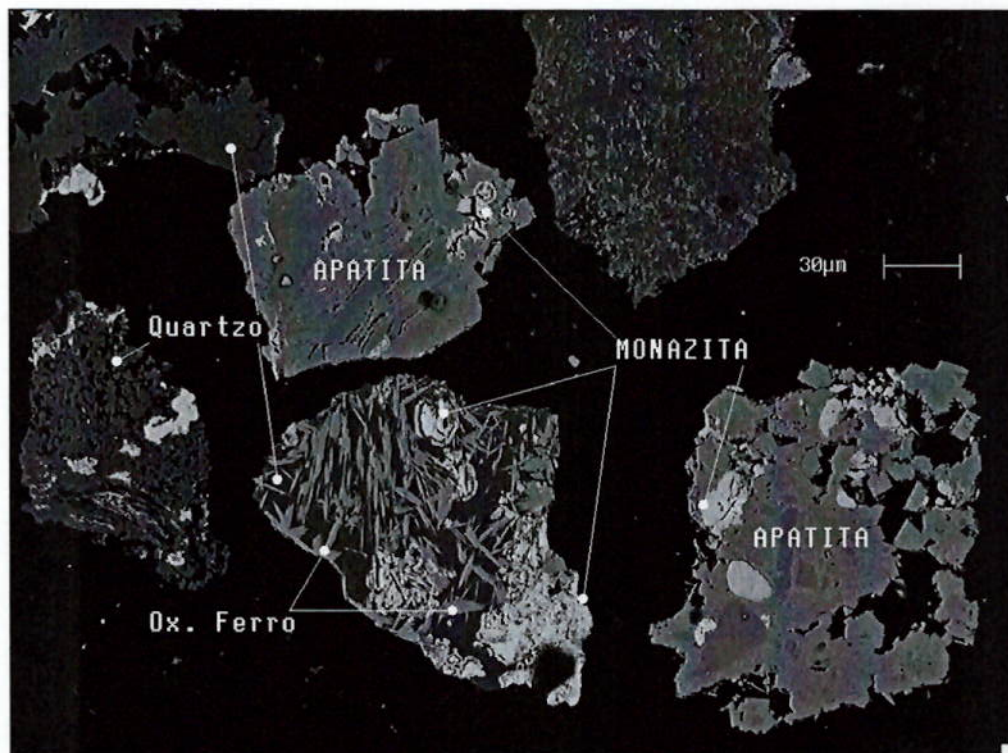


Foto 14 - Partículas mistas de monazita (coloforme) com óxidos de ferro ou com apatita. (MEV, elétrons retroespalhados)

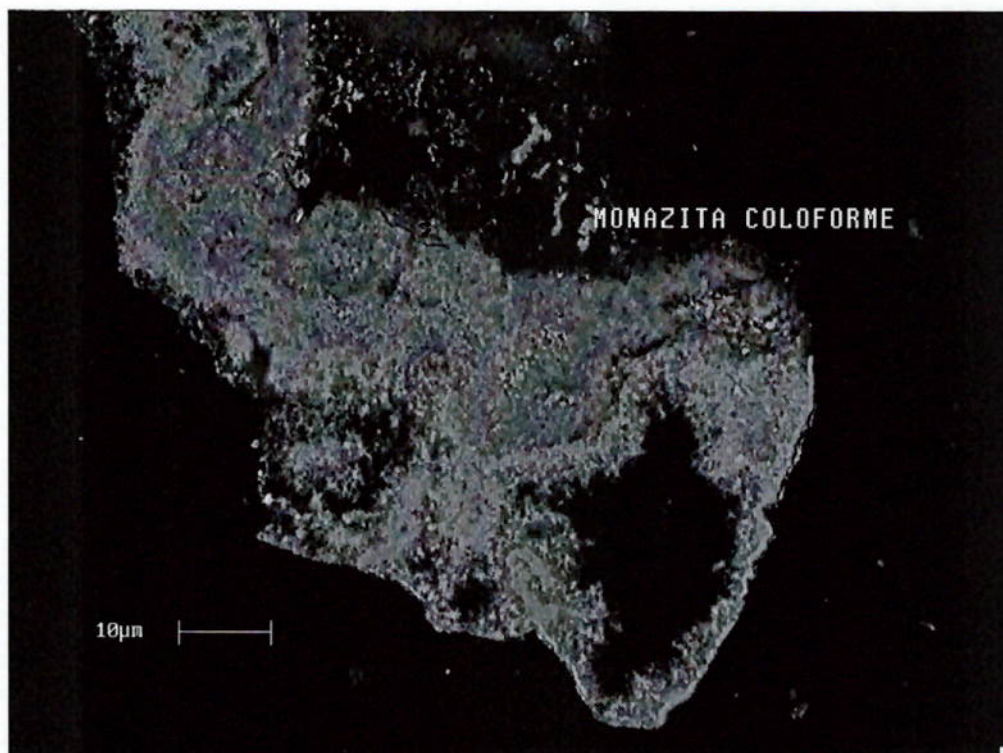


Foto 15 - Partícula mista de monazita (coloforme) com quartzo. (MEV, elétrons retroespalhados)

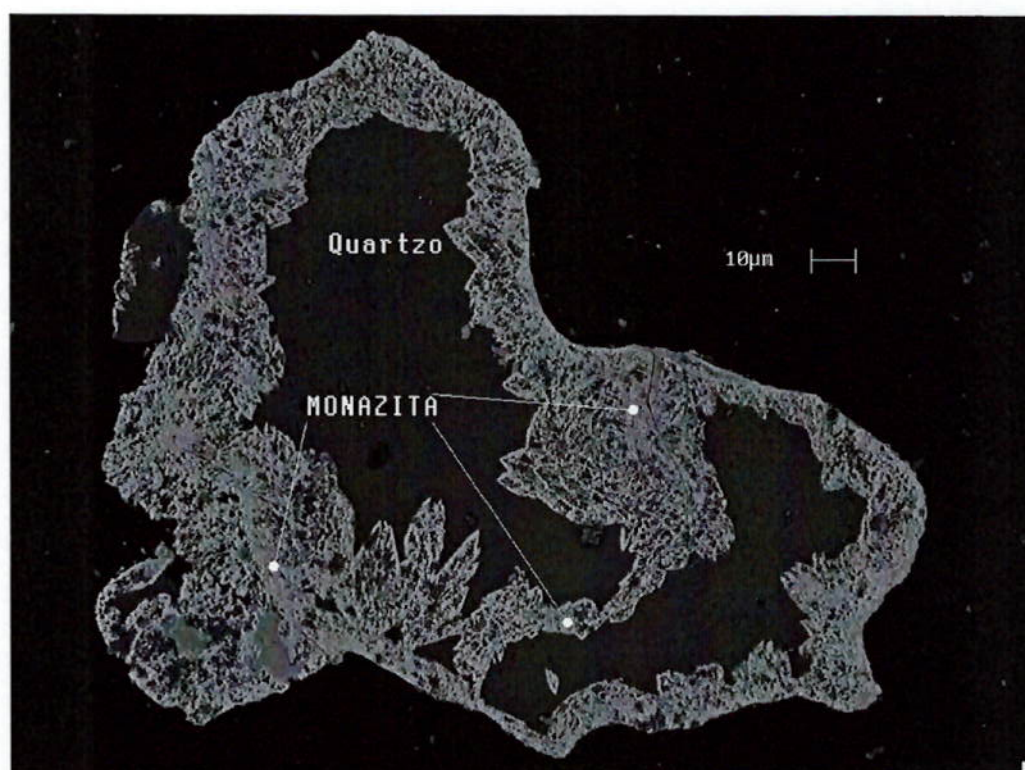


Foto 16 - Partícula mista de monazita (coloforme) com quartzo. Nota-se a dimensão diminuta dos cristalitos de monazita. (MEV, elétrons retroespalhados)

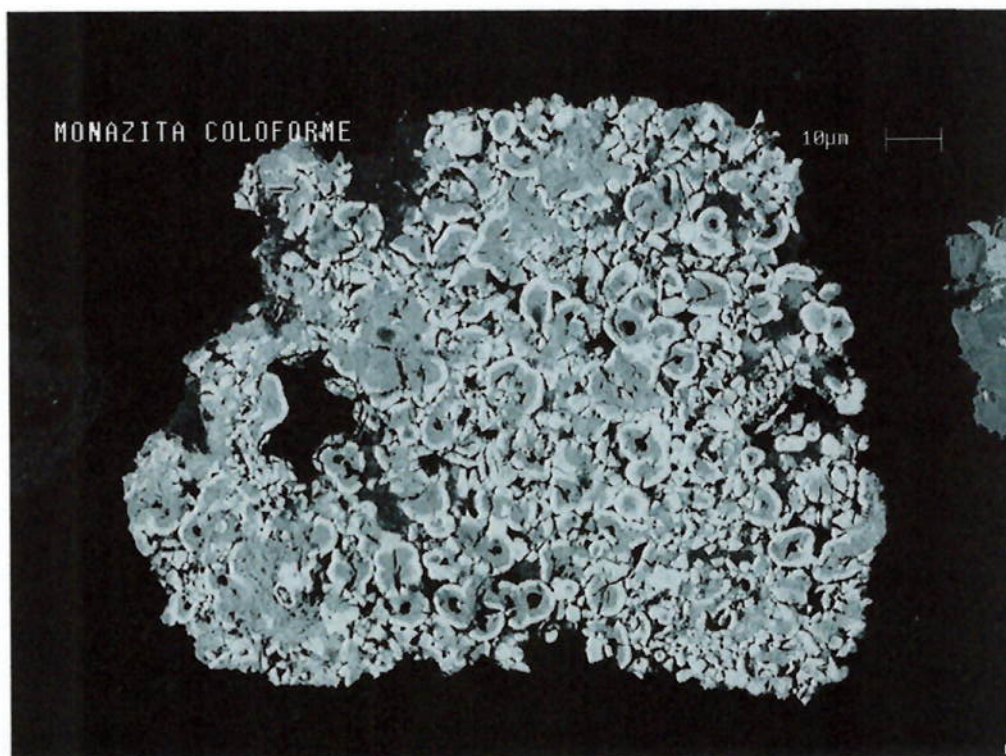
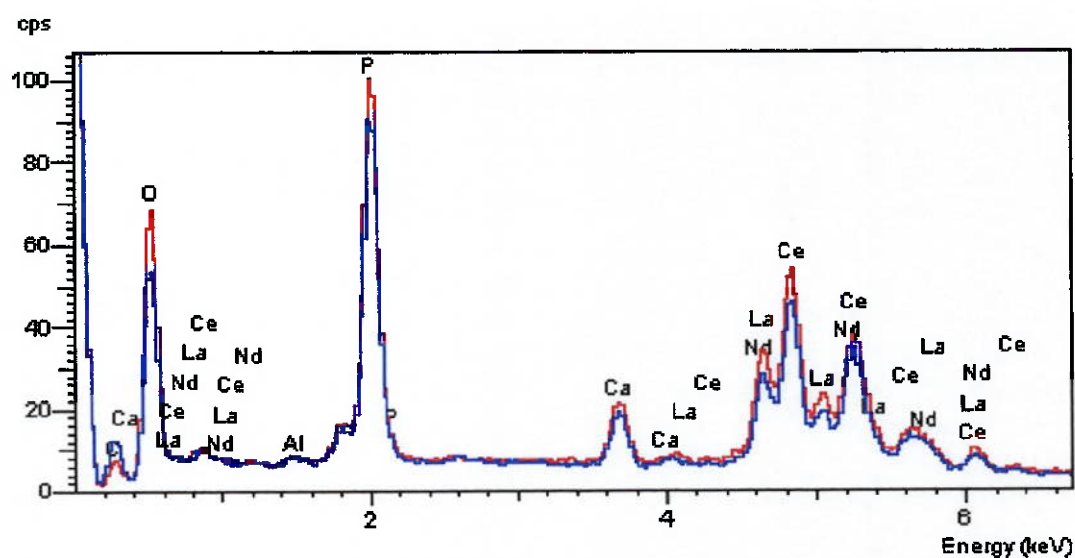


Foto 17 - Agregados de monazita coliforme, com dimensão média da ordem de 10 μm. apresentando auréolas mais claras, referente a aumento de número atômica médio (núcleo hidratado??). (MEV, elétrons retroespalhados)



Espectro relativo à foto anterior. Ambas as fases apresentam os mesmos elementos. Nota-se, no entanto, que a fase mais escura apresenta maior conteúdo de O e menor para P e ETR (fase hidratada, rabdofanita??).

6.1.6 Conclusões da caracterização da amostra saprolito

As características mais relevantes do material saprolítico que devem ser consideradas para fins de processo são:

- as terras raras concentram-se naturalmente em granulação muito fina (<0,020 mm); essa fração, com teor de 19% OTR, contém cerca de 54% do total de OTR contido;
- as separações minerais efetuadas não lograram gerar produtos com teores mais expressivos de OTR, tanto a partir de separação magnética (produto -0,5+0,8A total +0,037 mm com teor de 11,0% e recuperação de 21,2% no ensaio, conforme descrito no item 6.1.3), como com separação em líquidos densos seguida de separação magnética no produto afundado (produto afundado não magnético total +0,037 mm, com teor de 13,7% e recuperação de 69,8% no ensaio, conforme apresentado no item 6.1.4), indicando que processos usuais de concentração física não são aplicáveis a esse tipo de material;
- a monazita, essencial mineral portador de ETR, ocorre basicamente sob a forma de agregados extremamente friáveis e com indivíduos cristalinos de dimensões micrométricas.

6.2. Estudo de desenvolvimento de processo - amostra saprolito, alíquota 2

A partir dos resultados dos estudos de caracterização, item 6.1, vislumbrou-se a alternativa do processamento mineral baseado nas características principais da monazita: ocorrência sob a forma de partículas em agregados com indivíduos cristalinos de dimensões diminutas (da ordem de micra) e de elevada friabilidade.

Considerou-se, portanto, como alternativa de concentração a ser estudada para este material, um procedimento que promovesse a “quebra”, preferencialmente seletiva, dos agregados de monazita, de modo a aumentar a sua concentração nas lamas ou ultrafinos. Para isso, executaram-se então etapas de atrição, seguidas por operação de deslamagem.

6.2.1 Resultados da preparação de amostras (definição das condições de atrição)

A primeira etapa que foi avaliada prendeu-se à definição da granulação da alimentação da etapa de atrição e do tempo a ser empregado na mesma. Foram, então, testadas duas granulações distintas de alimentação (-12,7 mm e -0,84mm) e dois tempos de atrição (3 e 10 minutos, conforme exposto na figura 10), os quais foram comparados

com o produto de moagem a menos 0,42 mm. Os resultados obtidos nas preparações efetuadas estão expostos na Tabela 14 e nas Figuras 16 e 17.

Tabela 14 - Resultados da etapa de preparação de amostras - Amostra saprolito

Saprolito a -12,7 mm - atrição por 3 minutos													
Fração mm	% Peso		Teores (%)									Distribuição (%)	
	retido	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	OTR	Fe ₂ O ₃	
+ 0,297	41,4	3,20	10,9	9,80	25,4	8,60	37,0	1,22	0,89	0,90	15,1	36,2	
-0,297+0,149	10,8	3,50	10,6	10,1	26,7	14,1	25,6	2,41	2,41	1,31	4,3	9,9	
-0,149+0,074	7,1	3,70	10,1	8,40	28,0	14,5	23,9	3,19	2,35	2,17	3,0	6,9	
-0,074+0,020	11,7	5,40	12,1	8,10	28,9	11,9	17,3	5,20	2,88	4,08	7,2	11,6	
-0,020	29,1	21,3	12,0	4,12	35,4	3,58	9,00	3,37	3,14	2,44	70,5	35,4	
Total calc.	100,0	8,78	11,3	7,88	29,0	8,54	24,4	2,58	2,04	1,85	100,0	100,0	
Saprolito a -12,7 mm - atrição por 10 minutos													
Fração mm	% Peso		Teores (%)									Distribuição (%)	
	retido	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	OTR	Fe ₂ O ₃	
+ 0,297	37,5	2,60	11,1	10,3	25,6	8,40	37,0	1,08	0,70	0,85	11,1	33,4	
-0,297+0,149	11,3	3,30	11,1	10,4	25,3	13,1	27,3	2,38	2,43	1,25	4,3	10,0	
-0,149+0,074	7,6	3,10	10,2	8,70	27,4	14,4	25,6	2,89	2,03	1,99	2,7	7,3	
-0,074+0,020	11,6	4,50	12,9	8,90	27,7	12,0	18,1	5,20	2,29	4,39	5,9	11,1	
-0,020	32,0	20,8	12,1	4,36	34,3	3,79	10,0	3,43	3,21	2,43	76,0	38,2	
Total calc.	100,0	8,76	11,6	8,13	28,7	8,33	24,2	2,59	1,98	1,90	100,0	100,0	
Saprolito moído a -0,84 mm - atrição por 3 minutos													
Fração mm	% Peso		Teores (%)									Distribuição (%)	
	retido	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	OTR	Fe ₂ O ₃	
-0,84+0,297	24,7	2,50	14,5	13,5	23,6	9,60	28,4	1,98	1,81	1,09	7,9	20,4	
-0,297+0,149	15,2	3,00	13,5	12,8	26,7	12,1	21,4	2,72	3,03	1,12	5,8	14,2	
-0,149+0,074	10,5	3,40	13,1	11,8	26,1	13,0	20,4	3,38	2,91	1,70	4,6	9,6	
-0,074+0,020	17,1	2,90	14,3	13,6	26,3	10,1	24,7	1,99	1,83	1,17	6,3	15,7	
-0,020	32,6	18,1	11,4	5,13	35,3	4,50	9,92	4,05	3,84	2,36	75,3	40,2	
Total calc.	100,0	7,81	13,2	10,5	28,6	8,76	19,8	2,92	2,77	1,58	100,0	100,0	
Saprolito moído a -0,84 mm - atrição por 10 minutos													
Fração mm	% Peso		Teores (%)									Distribuição (%)	
	retido	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	OTR	Fe ₂ O ₃	
-0,84+0,297	25,3	2,90	14,1	13,6	26,2	10,1	25,2	1,96	1,77	1,03	9,2	23,0	
-0,297+0,149	14,2	2,60	12,5	12,1	26,4	11,3	22,4	3,35	4,50	1,09	4,6	13,0	
-0,149+0,074	13,4	3,50	12,2	11,3	25,2	12,3	21,0	4,18	4,46	2,05	5,8	11,7	
-0,074+0,020	16,8	5,00	13,3	10,4	26,7	11,2	16,0	5,70	4,60	3,49	10,5	15,6	
-0,020	30,3	18,5	12,4	6,00	34,9	5,36	8,79	3,41	2,54	2,56	69,9	36,7	
Total calc.	100,0	8,00	13,0	10,2	28,8	9,32	17,7	3,52	3,22	2,05	100,0	100,0	
Saprolito moído a -0,420 malhas													
Fração mm	% Peso		Teores (%)									Distribuição (%)	
	retido	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	OTR	Fe ₂ O ₃	
-0,84+0,297	17,4	2,60	12,7	12,8	26,8	9,80	26,5	2,32	2,39	1,13	5,9	17,6	
-0,297+0,149	17,7	2,20	12,8	13,2	27,7	11,4	23,1	2,53	2,95	1,02	5,1	18,1	
-0,149+0,074	17,4	3,20	12,7	11,7	25,5	12,0	21,7	3,73	3,99	1,71	7,3	17,7	
-0,074+0,020	18,1	4,50	13,5	10,9	26,8	11,2	17,0	5,20	3,74	3,28	10,7	19,5	
-0,020	29,4	18,4	11,6	5,11	36,7	4,54	9,21	3,58	2,76	2,36	70,9	36,3	
Total calc.	100,0	7,62	12,5	10,1	29,6	9,18	18,3	3,49	3,12	1,96	100,0	100,0	

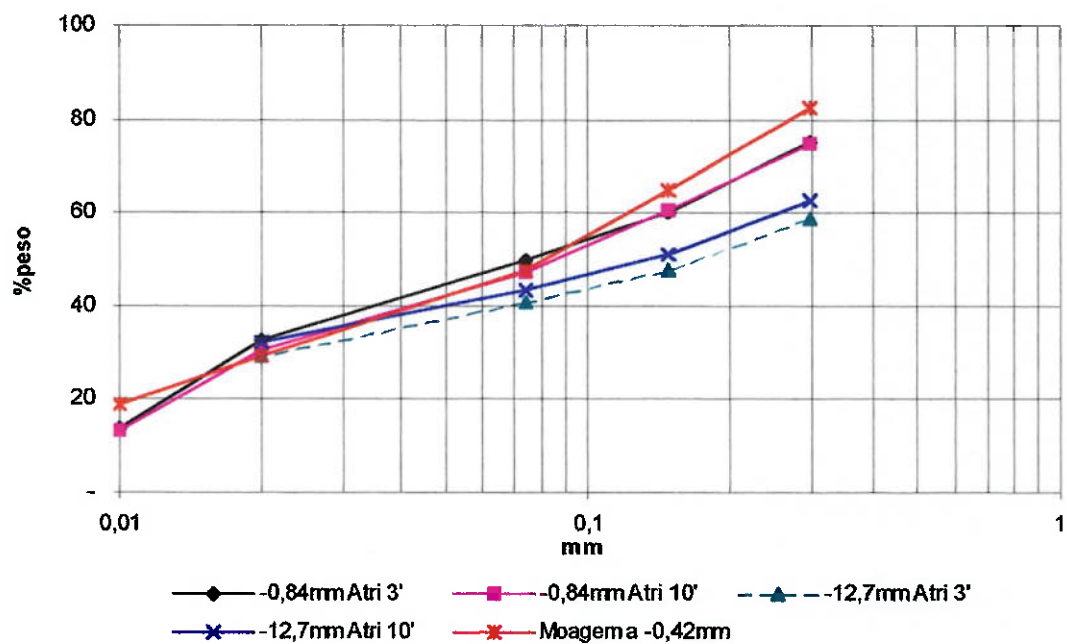


Figura 16 - Distribuição em massa na preparação de amostras - Amostra saprolito

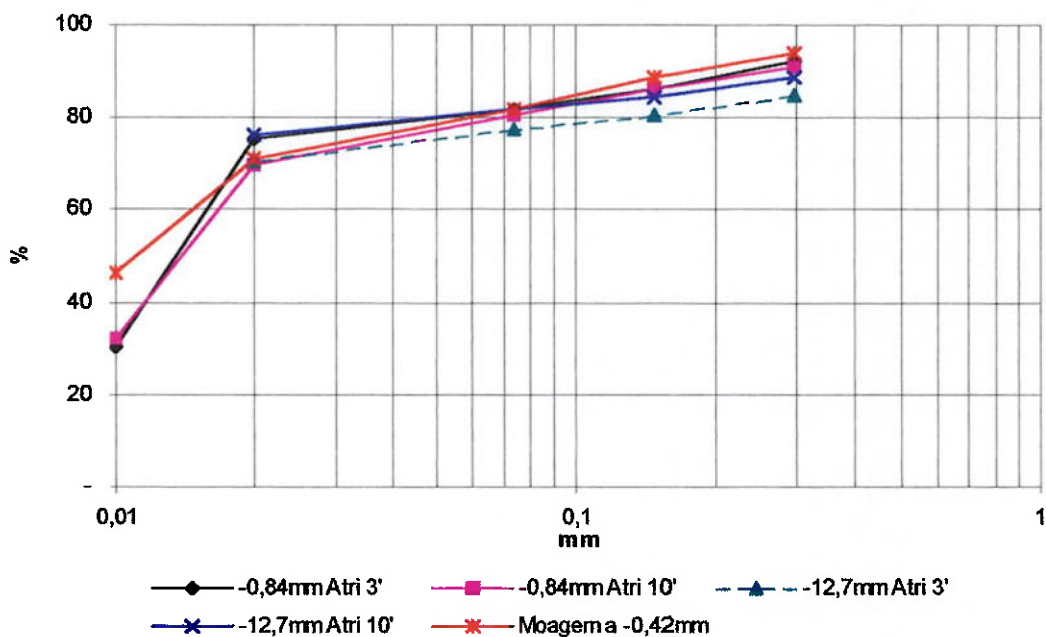


Figura 17 - Distribuição de OTR na preparação de amostras - Amostra saprolito

Dos vários testes de preparação de amostras realizados, verificou-se que a melhor alternativa é a que considera apenas desagregação e atrição, não envolvendo moagem do material, como indicado na Figura 18 (melhores resultados). Os ensaios com moagem e

atrição geraram produtos com teores de 18% OTR e recuperações da ordem de 70%, enquanto que, apenas por atrição do material a -12,7 mm, obtiveram-se valores mais elevados de teor e de recuperação (20,8% de OTR e 76% de recuperação).

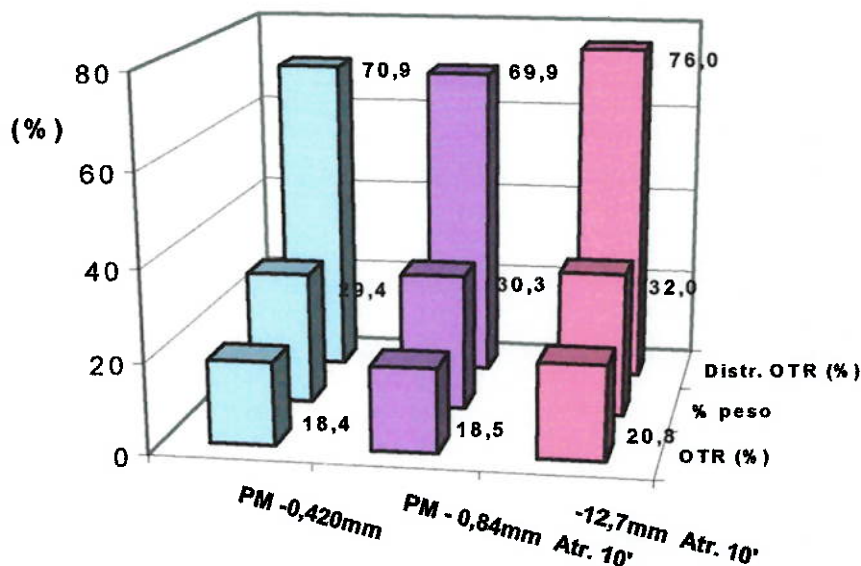


Figura 18 - Comparação entre os resultados dos ensaios de preparação de amostras - Amostra saprolito

6.2.2 Ensaios de atrição e deslamagem

Na seqüência dos trabalhos foi avaliada a atrição do material deslamado; esta foi executada em dois ciclos intercalados com etapas de deslamagem, após a remoção dos finos naturais. A distribuição de teores nos produtos gerados está exposta no diagrama de blocos da Figura 19 e na Tabela 15.

O produto correspondente ao *OF1* (finos naturais; overflow 1) significa 8,8% em peso e apresenta teor de 19,3% de OTR, o que significa cerca de 20% do total de OTR contidas na amostra. O teor de Fe_2O_3 associado a esse produto é de 46,7% (14,6% do total de Fe_2O_3 da amostra). A relação OTR/ Fe_2O_3 é de 0,41.

O produto *UF1* (finos naturais; underflow 1) representa 11,1% em peso e tem teor de 19,5% de OTR, o que significa cerca de 25,5% do total de OTR contidas na amostra. O teor de Fe_2O_3 associado a esse produto é de 34,6%, o que significa aproximadamente 13,7% do total de Fe_2O_3 da amostra). A relação OTR/ Fe_2O_3 é de 0,56.

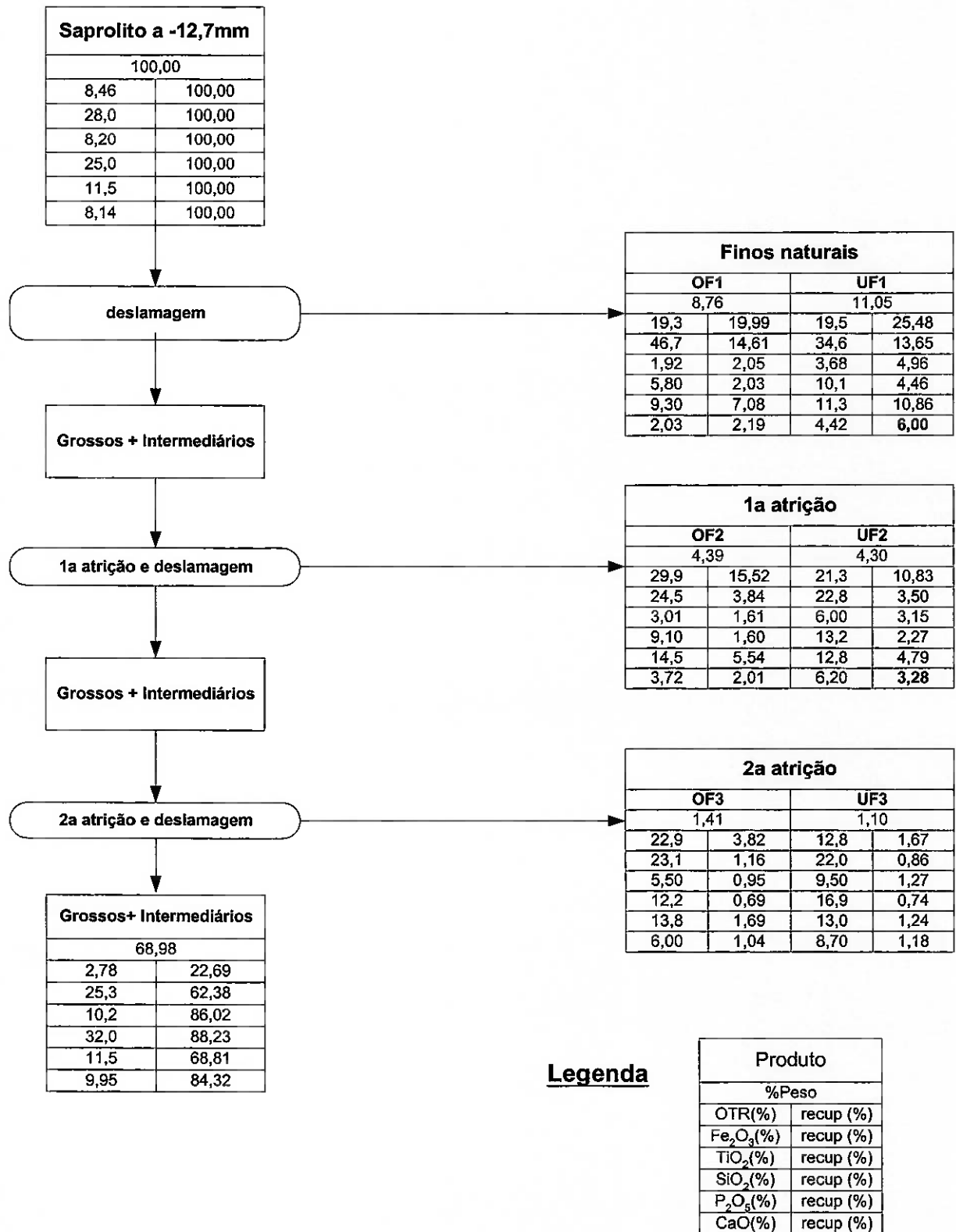


Figura 19 - Características dos produtos obtidos nas etapas de atrição e deslamagem - Amostra saprolite

Tabela 15 - Distribuição de teores nos produtos gerados nos ensaios de atrição e deslamagem - Amostra saprolito

Ensaio	Produto mm	% Peso		Teores (%)							OTR/ Fe ₂ O ₃	Distribuição no ensaio (%)						
		ensaio	acum.	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃
Grossos-Intermediárias	-12,7+7,93	7,6	7,6	3,30	11,1	0,90	69,8	7,00	5,30	0,06	0,30	3,0	3,0	0,8	21,1	4,6	4,9	0,2
	-7,93+2,38	9,8	17,4	2,50	24,1	5,20	49,3	8,70	7,40	0,33	0,10	2,9	8,4	6,2	19,3	7,4	8,9	1,2
	-2,38+0,595	13,2	30,6	1,90	29,3	8,90	32,2	12,0	11,1	1,07	0,06	3,0	13,8	14,3	17,0	13,8	18,0	5,3
	-0,595+0,297	7,7	38,2	2,10	25,4	11,4	25,2	15,8	14,1	1,56	0,08	1,9	7,0	10,7	7,7	10,0	13,3	4,5
	-0,297+0,149	8,7	47,0	1,90	26,3	13,7	24,4	12,5	12,1	2,31	0,07	2,0	8,2	14,6	8,5	9,5	13,8	7,6
	-0,149+0,074	7,4	54,4	2,10	28,8	15,8	22,2	9,80	9,50	3,11	0,07	1,8	7,7	14,3	6,6	6,3	8,7	8,8
	-0,074+0,020	9,8	64,2	3,10	27,0	14,2	15,9	13,1	9,40	5,70	0,11	3,6	9,5	17,0	6,2	11,2	11,4	21,2
	-0,020 dest	4,8	69,0	8,10	28,7	13,9	9,50	14,5	10,6	4,06	0,28	4,6	4,9	8,1	1,8	6,0	6,2	7,3
Finos naturais	OF1	8,8	77,7	19,3	46,7	1,92	5,80	9,30	2,03	2,92	0,41	20,0	14,6	2,1	2,0	7,1	2,2	9,7
	UF1	11,1	88,8	19,5	34,6	3,68	10,1	11,3	4,42	4,13	0,56	25,5	13,7	5,0	4,5	10,9	6,0	17,3
1ª atrição	OF2	4,4	93,2	29,9	24,5	3,01	9,10	14,5	3,72	3,53	1,22	15,5	3,8	1,6	1,6	5,5	2,0	5,9
	UF2	4,3	97,5	21,3	22,8	6,00	13,2	12,8	6,20	4,38	0,93	10,8	3,5	3,1	2,3	4,8	3,3	7,1
2ª atrição	OF3	1,4	98,9	22,9	23,1	5,50	12,2	13,8	6,00	3,87	0,99	3,8	1,2	0,9	0,7	1,7	1,0	2,1
	UF3	1,1	100,0	12,8	22,0	9,50	16,9	13,0	8,70	4,31	0,58	1,7	0,9	1,3	0,7	1,2	1,2	1,8
	Total calc.	100,0		8,46	28,0	8,20	25,0	11,5	8,14	2,64	0,30	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

O produto fino gerado a partir da 1ª atrição - OF2 - representa 4,4% em peso da amostra com teor de 29,9% de OTR, o que significa cerca de 15,5% do total de OTR contidas na amostra. O teor de Fe₂O₃ associado a esse produto é de 24,5% (3,8% do total de Fe₂O₃ da amostra). A relação OTR/Fe₂O₃ é de 1,22.

O produto UF2 gerado na 1ª atrição significa 4,3% em peso da amostra e tem teor de 21,3% de OTR, o que significa cerca de 10,8% do total de OTR contido na amostra. O teor de Fe₂O₃ associado a esse produto é de 22,8% (3,5% do total de Fe₂O₃ da amostra). A relação OTR/Fe₂O₃ é de 0,93.

O produto fino gerado a partir da 2ª atrição - OF3 - representa 1,4% em peso da amostra com teor de 22,9% de OTR, o que significa cerca de 3,8% do total de OTR contido na amostra. O teor de Fe₂O₃ associado a esse produto é de 23,1% (1,2% do total de Fe₂O₃ da amostra). A relação OTR/Fe₂O₃ é de 0,99.

O produto UF3 gerado na 2ª atrição representa 1,1% em peso da amostra e tem teor de 12,8% de OTR, o que significa cerca de 1,7% do total de OTR contido na amostra. O teor de Fe₂O₃ associado a esse produto é de 22,0% (0,9% do total de Fe₂O₃ da amostra). A relação OTR/Fe₂O₃ é de 0,58.

6.2.3 Considerações sobre o procedimento empregado e características dos produtos passíveis de serem obtidos

Como pôde ser observado, o procedimento empregado nas etapas de desagregação e deslamagem foi extremamente eficiente na concentração dos OTR junto aos finos.

Os finos naturais (OF1 e UF1), relativos a deslamagem antes de atrição, apresentam elevados teores de Fe_2O_3 e OTR, sendo constituídos basicamente por goethita e monazita. A relação OTR/ Fe_2O_3 média é de 0,47.

Os finos gerados no primeiro ciclo de atrição (OF2 e UF2) mostram maior enriquecimento em OTR (25,6%), aliado a substancial elevação na relação OTR/ Fe_2O_3 , em média de 1,08. Já no segundo ciclo de atrição e deslamagem ocorre um empobrecimento em OTR, decorrente da elevação generalizada do conteúdo de minerais de ganga associados aos finos; a relação OTR/ Fe_2O_3 apresenta valor médio de 0,77.

As características dos produtos passíveis de serem obtidos através de etapas de desagregação e deslamagem do material saprolítico são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Características dos produtos passíveis de serem obtidos - Amostra saprolito

Produtos	%		Teores (%)						OTR/ Fe_2O_3	Recup. (%)	
	Peso	OTR	P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	SiO_2	Al_2O_3		OTR	Fe_2O_3
Finos Naturais	19,8	19,4	10,2	3,09	41,3	2,70	7,70	3,46	0,47	45,7	29,0
1ª Atrição	8,7	25,6	13,6	4,97	23,6	4,52	11,2	3,96	1,08	26,4	7,3
2ª Atrição	2,5	17,2	13,4	7,52	22,5	7,75	14,8	4,12	0,77	5,1	2,0
Finos Naturais+ 1ª Atrição	28,5	21,3	11,2	3,66	35,9	3,25	8,76	3,61	0,59	72,1	36,2
Finos Naturais+1ª+2ª atrições	31,0	20,9	11,4	3,97	34,9	3,62	9,25	3,65	0,60	77,2	38,2

As recuperações globais de OTR situam-se, respectivamente, entre 72 e 77% para o emprego de um e dois ciclos de atrição, com teores médios da ordem de 21% de OTR.

Os melhores resultados alcançados em termos de recuperação de OTR são obtidos para a conjugação dos finos naturais com dois ciclos de atrição e deslamagem, gerando um produto que representa 31% em peso de material, com teor de 20,9% OTR e recuperação de 77% do total de terras raras contidas no material saprolítico.

6.2.4 Separações magnéticas a úmido

Separações magnéticas a úmido foram efetuadas com o intuito de avaliar as possibilidades de se elevar a relação OTR/Fe₂O₃. Foram realizados testes em separador de alta intensidade via úmida (WHIMS) com o emprego de diferentes tipos de matrizes sobre os seguintes produtos:

- ⇒ OF1;
- ⇒ UF1;
- ⇒ UF1 + OF2 + UF2 + OF3.

De uma forma geral, os ensaios de separação magnética não lograram obter substancial minimização dos teores de ferro, em razão da granulação do material e em função das condições reológicas da polpa (altamente floculada), apresentando grandes dificuldades para uma adequada dispersão.

Os melhores resultados obtidos encontram-se sumariados na Tabela 17, na qual se verifica a baixa eficiência de concentração dos OTR associada a perdas significativas. Para o produto OF1, os ensaios realizados não alcançaram resultados satisfatórios.

Tabela 17 - Sumário dos resultados de separação magnética - Amostra saprolito

Produto	%		Teores (%)						OTR/ Fe ₂ O ₃	Distrib. OTR (%)	
	Peso	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃		Ensaio	Amostra
Produto : OF1 (matriz fina, 6A, T10)											
Magnético	5,3	16,7	8,50	2,25	49,8	2,18	5,50	3,13	0,34	4,6	0,9
Não Magnético	94,7	19,7	9,50	2,20	45,9	1,91	6,00	2,91	0,43	95,4	19,1
Total Calc.	100,0	19,5	9,45	2,20	46,1	1,92	5,97	2,92	0,42	100,0	20,0
Produto: UF1 (matriz fina, 4A, T13)											
Magnético	18,5	11,7	7,20	2,75	49,1	6,90	7,00	3,79	0,24	11,0	2,8
Não Magnético	81,5	21,4	12,8	5,50	29,2	2,74	11,8	4,38	0,73	89,0	22,7
Total	100,0	19,6	11,8	4,99	32,9	3,51	10,9	4,27	0,60	100,0	25,5
Produtos: UF1 + OF2 + UF2 + OF3 (matriz fina, 6A, T22)											
Magnético	17,2	14,6	8,70	3,36	47,0	7,80	5,50	3,37	0,31	11,1	6,2
Não Magnético	82,8	24,3	13,1	5,70	24,7	3,45	12,0	4,28	0,98	88,9	49,5
Total	100,0	22,6	12,3	5,30	28,5	4,20	10,9	4,12	0,79	100,0	55,7

Uma estimativa do desempenho da separação magnética para os produtos finais de atrição e deslamagem (resultados expostos na Tabela 16) é apresentada na Tabela 18. De modo geral, espera-se uma elevação da ordem de 1,5%, em termos absolutos, nos teores de OTR e redução da ordem de 3% absolutos nos teores de Fe₂O₃, com perdas de cerca de 6% na recuperação de OTR.

Tabela 18 - Características dos produtos finais passíveis de serem obtidos por separação magnética - Amostra saprolito

Produtos	%		Teores (%)						OTR/	Recup. (%)
	Peso	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	OTR
<i>Não Magnético - finos naturais mais um ciclo de atrição e deslamagem</i>										
Finos Naturais + 1ª Atrição	24,4	22,8	11,8	4,5	32,0	2,8	9,9	3,8	0,7	64,8
<i>Não Magnético - finos naturais mais dois ciclos de atrição e deslamagem</i>										
Finos Naturais +1ª e 2ª atrições	26,9	22,4	12,0	4,7	31,1	3,2	10,4	3,9	0,7	70,3

6.3. Conclusões dos estudos efetuados para o saprolito

6.3.1 Caracterização do material saprolítico

As terras raras ocorrem essencialmente sob a forma de monazita; esta apresenta-se na forma de agregados de cristalitos micrométricos, associados a óxidos-hidróxidos de ferro e quartzo. Como característica marcante, a monazita é bastante friável, o que faz com que ela apresente tendência natural à desagregação, concentrando-se portanto junto às frações finas e ultrafinas.

A fração passante em 0,020 mm, com teor da ordem de 20% de OTR, é responsável por cerca de 54% dos OTR totais contidos na amostra saprolítica. As separações minerais efetuadas para este material (itens 6.1.3 e 6.1.4) não lograram a obtenção de produtos com teores de OTR superiores a 15%, mantendo teores elevados de Fe₂O₃ associados.

6.3.2 Estudos de desenvolvimento de processos para o material saprolítico

Face às características da monazita, a premissa básica adotada para o desenvolvimento de processos foi promover ciclos de atrição/desagregação seguidos por estágios de deslamagem, de forma a intensificar a concentração dos OTR nos ultrafinos. Uma cominuição usual somente iria diluir o teor de OTR junto aos finos.

Os estudos efetuados lograram a obtenção de produtos com diferentes relações OTR/Fe₂O₃.

Através de desagregação seletiva e deslamagem é possível obter-se um produto com teor médio de 21% OTR, aliado a recuperação de 77% (Tabela 19).

Tabela 19 - Produtos obtidos por desagregação seletiva e deslamagem - Amostra saprolito

Produtos	%		Teores (%)						OTR/		Recup. (%)	
	Peso	OTR	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	OTR	Fe ₂ O ₃	
<i>Finos naturais mais um ciclo de atrição e deslamagem</i>												
Finos Naturais+ 1ª Atrição	28,5	21,3	11,2	3,66	35,9	3,25	8,76	3,61	0,59	72,1	36,2	
<i>Finos naturais mais dois ciclos de atrição e deslamagem</i>												
Finos Naturais+ 1ª e 2ª Atrições	31,0	20,9	11,4	3,97	34,9	3,62	9,25	3,65	0,60	77,2	38,2	

Uma separação magnética permite uma ligeira elevação no teor de OTR (cerca de 15% absolutos) e recuperação de 70%, conforme exposto na Tabela 17.

6.4. Estudos de caracterização e processamento da amostra TR 02 - Córrego do Garimpo

A amostra TR 02 representa um material característico da zona de interface do minério de fosfato com a mineralização de ETR.

Os estudos efetuados com esta amostra foram realizados na seqüência da amostra saprolito, tendo por meta principal, verificar as características e o comportamento da região com mineralização de fósforo (apatita) e ETR.

6.4.1 Composição química

A composição química da amostra TR 02 está exposta na Tabela 20.

Tabela 20 - Composição química da amostra TR 02 - Córrego do Garimpo

Óxidos	(%)	Óxidos	(%)
OTR	4,59	CaO	10,0
Fe ₂ O ₃	30,9	Al ₂ O ₃	1,48
TiO ₂	7,39	BaO	2,20
SiO ₂	28,8	SO ₃	0,02
P ₂ O ₅	11,5	ZrO ₂	0,39

6.4.2 Análise granulométrica

A distribuição de teores por faixa granulométrica para a amostra TR 02 está exposta na Tabela 21.

Tabela 21 - Distribuição de teores por fração granulométrica - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo)

Fração mm	% Peso		Teores (%)							CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio(%)						
	retido	acum	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃
+0,84	14,6	14,6	1,40	28,0	5,50	42,2	9,90	10,0	0,46	1,01	4,5	13,2	10,9	21,4	12,5	14,5	4,5
-0,84+0,595	19,9	34,5	1,10	31,1	5,50	40,4	9,40	9,70	0,41	1,03	4,8	20,0	14,8	27,9	16,2	19,2	5,5
-0,595+0,297	15,0	49,5	1,70	26,7	7,10	35,2	12,3	12,9	0,80	1,05	5,5	12,9	14,4	18,3	15,9	19,2	8,1
-0,297+0,149	12,1	61,6	2,20	26,6	9,40	30,4	13,3	12,7	1,21	0,95	5,8	10,4	15,4	12,8	13,9	15,3	9,9
-0,149+0,074	8,5	70,0	2,70	28,6	11,7	26,0	12,2	10,9	2,0	0,89	5,0	7,8	13,4	7,6	8,9	9,2	11,3
-0,074+0,037	8,3	78,3	3,80	31,8	12,3	20,1	11,2	9,30	3,04	0,83	6,8	8,5	13,8	5,8	8,0	7,7	16,9
-0,037+0,020	4,2	82,5	6,20	32,0	9,30	11,9	14,3	8,30	5,40	0,58	5,7	4,3	5,3	1,7	5,2	3,5	15,2
-0,020	17,5	100,0	16,2	40,0	5,10	7,50	12,7	6,50	2,42	0,51	61,9	22,7	12,1	4,6	19,3	11,4	28,6
Total calc.	100,0		4,59	30,9	7,39	28,8	11,5	10,0	1,48	0,87	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

A análise granulométrica indica que cerca de 78% em peso da amostra estão retidos em 0,037 mm e aproximadamente 18% em peso constituem material passante em 0,020 mm. De forma geral, a proporção em peso de cada fração analisada diminui para os finos até 0,020 mm, aumentando abaixo dessa fração. Os teores de OTR até 0,037 mm variam entre 1,1% (fração -0,84+0,595 mm) e 3,8% (fração -0,074+0,037 mm), atingindo 6,2% na fração -0,037+0,020 mm; abaixo de 0,020 mm esse teor eleva-se para 16,2%, o que significa 61,9% do total de OTR contido na amostra.

Os teores de Fe₂O₃ variam entre 28,0% (fração +0,84 mm) e 40,0% (-0,020 mm), elevando-se para os finos. Os teores de TiO₂ situam-se entre 5,5% (acima de 0,595 mm) e 12,3% (fração -0,074+0,037 mm).

Os teores de P₂O₅ variam entre 9,4% (na fração -0,84+0,595 mm) e 14,3% (na fração -0,037+0,020 mm), sem tendência muito definida. Os teores de CaO variam entre 6,5% (fração -0,020 mm) e 12,9% (fração -0,595+0,297 mm); as relações CaO/P₂O₅ são baixas e variam entre 0,51 e 1,05 (com tendência à diminuição para os finos abaixo de 0,297 mm).

Os teores de SiO₂ variam entre 7,5% (-0,020 mm) e 42,2% (+0,595 mm) com diminuição para os finos. Os teores de Al₂O₃ variam entre 0,4% (-0,84+0,595 mm) e 5,4%

(-0,037+0,020 mm), com tendência a elevação para os finos até 0,020 mm; a fração -0,020 mm é responsável por 28,6% do Al₂O₃ total contido na amostra.

6.4.3 Moagem e atrição após remoção dos finos naturais (-0,020 mm) - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo)

A distribuição de teores por faixa granulométrica do produto moído a -0,420 mm e atricionado, após a remoção dos finos naturais (fração -0,020 mm), está exposta na Tabela 22.

Tabela 22 - Distribuição de teores por fração nos produtos de atrição após remoção dos finos naturais - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo)

Fração mm	% Peso		Teores (%)							CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)						
	ensaio	amostra	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃
-0,420+0,297	11,6	9,6	0,98	29,1	6,50	38,0	10,3	11,9	0,51	1,16	5,5	10,9	8,9	13,9	11,3	13,0	4,5	2,1	8,4	7,9	13,3	9,1	11,5	3,2
-0,297+0,210	19,0	15,7	1,10	30,6	7,30	36,6	10,3	11,5	0,59	1,12	10,1	18,9	16,5	21,4	18,6	20,6	8,6	3,9	14,6	14,5	20,4	15,0	18,3	6,2
-0,210+0,149	18,3	15,1	1,30	31,2	8,10	34,4	9,90	11,0	0,73	1,11	11,5	18,4	17,6	19,8	17,2	18,9	10,3	4,4	14,3	15,4	18,9	13,9	16,7	7,3
-0,149+0,074	20,9	17,3	1,50	30,8	9,40	32,3	10,1	10,5	1,11	1,04	15,2	20,9	23,3	21,3	20,1	20,7	17,9	5,8	16,1	20,5	20,3	16,2	18,3	12,8
-0,074+0,037	16,3	13,5	2,40	31,0	10,6	26,8	10,8	9,80	2,36	0,91	18,9	15,4	20,5	13,8	16,7	15,0	29,6	7,2	12,6	16,0	13,2	13,5	13,3	21,1
-0,037+0,020	6,3	5,2	3,80	30,4	8,80	23,6	12,8	8,80	3,17	0,69	11,6	6,2	6,6	4,7	7,7	5,2	15,4	4,4	4,8	5,8	4,5	6,2	4,6	11,0
-0,020	7,6	6,3	7,40	34,1	7,30	21,3	11,6	9,30	2,35	0,80	27,2	8,4	6,6	5,1	8,4	6,6	13,7	10,3	6,5	5,8	4,9	6,8	5,9	9,8
Total Calc.	100,0	82,5	2,07	30,9	8,43	31,7	10,5	10,6	1,30	1,01	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	36,1	77,3	87,9	95,4	80,7	88,6	71,4

A análise granulométrica indica que 30,6% em peso da amostra estão retidos em 0,210 mm (25,3% em relação à amostra original) e 7,6% em peso representam material passante em 0,020 mm (6,3% em relação a amostra inicial).

Até 0,020 mm, os teores de OTR variam entre 1,0% (fração -0,420+0,297 mm) e 3,8% (fração -0,037+0,020 mm), com tendência à elevação para os finos; na fração -0,020 mm esse teor eleva-se para 7,4%, o que corresponde a 27,2% do total de OTR contido no ensaio (10,3% em relação a total da amostra inicial).

Os teores de Fe₂O₃ variam entre 29,1% (na fração -0,420+0,297 mm) e 34,1% (fração -0,020 mm; 8,4% do total contido no material; 6,5% do Fe₂O₃ total contido na amostra inicial).

6.4.4 Separações magnéticas dos finos naturais (-0,020 mm)

Os resultados dos ensaios de separações magnéticas a úmido (WHIMS), efetuados para a fração -0,020 mm natural, estão expostos na Tabela 23. À semelhança da amostra saprolito, de uma forma geral, os ensaios de separação magnética não lograram obter redução substancial dos teores de ferro, em função da granulação do material

(extremamente fina) como em relação às condições reológicas da polpa. Os teores de OTR mostram elevações da ordem de 1 a 1,5% absolutos, para recuperações de 80 a 90% no ensaio.

Tabela 23 - Distribuição de teores nos produtos de separação magnética a úmido para a fração -0,020 mm - Amostra TR 02 (Córrego do Garimpo)

<i>matriz fina 2A</i>																	
Produto	% Peso		Teores (%)							OTR/ Fe ₂ O ₃	Distribuição no ensaio (%)						
	ensaio	amostra	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃
Magnético	12,0	2,1	9,30	44,9	15,5	4,22	8,60	3,68	3,68	0,21	7,0	14,1	37,1	8,2	7,9	6,3	15,4
Não Magnético	88,0	15,4	16,9	37,2	3,57	8,70	13,7	7,50	2,74	0,45	93,0	85,9	62,9	93,8	92,1	93,7	84,6
Total	100,0	17,5	16,0	38,1	5,00	8,16	13,1	7,04	2,85	0,42	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>matriz fina 4A</i>																	
Produto	% Peso		Teores (%)							OTR/ Fe ₂ O ₃	Distribuição no ensaio (%)						
	ensaio	amostra	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃
Magnético	27,0	4,7	12,5	43,4	10,1	5,00	11,0	4,60	3,62	0,29	21,4	30,8	51,3	16,6	22,6	17,7	33,8
Não Magnético	73,0	12,8	17,0	36,0	3,56	9,30	13,9	7,90	2,61	0,47	78,6	69,2	48,7	83,4	77,4	82,3	66,1
Total	100,0	17,5	15,8	38,0	5,32	8,14	13,1	7,01	2,88	0,42	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>matriz fina 6A</i>																	
Produto	% Peso		Teores (%)							OTR/ Fe ₂ O ₃	Distribuição no ensaio (%)						
	ensaio	amostra	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃
Magnético	26,5	4,6	12,4	43,9	10,0	4,80	10,4	4,60	3,99	0,28	20,8	30,2	50,6	16,1	21,5	17,0	35,3
Não Magnético	73,5	12,9	17,2	36,5	3,51	9,00	13,7	7,90	2,63	0,47	79,4	69,8	49,4	83,9	78,5	83,0	64,7
Total	100,0	17,5	15,9	38,5	5,23	7,89	12,8	7,00	2,99	0,41	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>matriz fina 10A</i>																	
Produto	% Peso		Teores (%)							OTR/ Fe ₂ O ₃	Distribuição no ensaio (%)						
	ensaio	amostra	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃
Magnético	37,7	6,6	13,3	43,9	8,30	4,90	11,0	4,60	3,45	0,30	32,0	43,1	59,4	23,2	32,1	24,7	44,5
Não Magnético	62,3	10,9	17,1	35,1	3,44	9,80	14,1	8,50	2,80	0,49	68,0	56,9	40,6	76,8	67,9	75,3	55,5
Total	100,0	17,5	15,7	38,4	5,27	7,95	12,9	7,03	2,92	0,41	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

6.4.5 Estimativa da composição mineralógica da amostra TR 02 - Córrego do Garimpo

A estimativa da composição mineralógica da amostra TR 02 está exposta na Tabela 24.

A amostra é constituída predominantemente por óxidos-hidróxidos de ferro (magnetita, hematita e goetita; 37% em peso), quartzo (25% em peso), apatita (cerca de 18% em peso) e secundariamente por anatásio (8% em peso), monazita (7% em peso), alumínio-fosfato (gorceixita; 5% em peso) e zircão (cerca de 1% em peso).

Para os finos naturais (-0,020 mm), a monazita representa cerca de 25% em peso da fração, o que corresponde a 62,5% do total de monazita contida na amostra total. Conteúdos elevados de óxidos de ferro (da ordem de 50% em peso) e de apatita (12% em peso), além de quartzo (7% em peso) e anatásio (5%), e quantidades menores de zircão e de alumino-fosfato também estão presentes.

Tabela 24 - Estimativa da composição mineralógica da amostra TR 02 - Córrego do Garimpo

Produto	Fração mm	% Massa		Mineralogia (%)							Distrib. monazita (%)	
		ensalo	amostra	monazita	apatita	alum-fosf.	anatásio	óx.ferro	quartzo	zircão	ensalo	amostra
moagem/atricção	-0,420+0,297	11,6	9,6	2	22	3	7	32	35	1	5,5	2,1
	-0,297+0,210	19,0	15,7	2	21	4	7	34	31	1	10,1	3,8
	-0,210+0,149	18,3	15,1	2	20	3	8	35	31	1	11,5	4,3
	-0,149+0,074	20,9	17,3	2	19	5	9	34	28	1	15,2	5,7
	-0,074+0,037	16,3	13,5	4	18	9	11	34	23	1	18,9	7,1
	-0,037+0,020	6,3	5,2	6	16	19	9	30	20	1	11,6	4,3
	-0,020	7,6	6,3	11	17	3	7	38	22	1	27,2	10,2
Total	100,0	82,5	3	20	6	8	34	28	1	100,0	37,5	
Total moagem/atricção			82,5	3	20	6	8	34	28	1		37,5
Finos naturais	-0,020		17,5	25	12	1	5	50	7	1		62,5
Total calc.			100,0	7	18	5	8	37	25	1		100,0

A proporção média de monazita para o produto moído e atricionado é de 3% e varia, até 0,020 mm, entre 2 e 6% em peso (com tendência à elevação para os finos), atingindo 11% na fração -0,020 mm. O produto moído e atricionado contém 37,5% do total de monazita presente na amostra.

A proporção em peso de apatita, para o produto moído e atricionado é da ordem de 20%, variando no intervalo considerado entre 16 e 22%, com tendência à diminuição para os finos até 0,020 mm.

O conteúdo de óxidos-hidróxidos de ferro, para esse produto, é de 34% em peso, variando na granulometria entre 30 e 35%, sem tendência muito definida.

Quartzo constitui aproximadamente 28% em peso desse produto; sua proporção varia entre 20 e 35% e diminui para os finos até 0,020 mm.

6.4.6 Conclusões

A amostra TR 02 apresenta um teor de OTR de 4,6%, o que significa praticamente a metade em relação ao observado para a amostra *saprolito* (com teor da ordem de 8,7% de OTR).

Para esta amostra, a fração -0,020 mm tem um teor de 16,2% de OTR, o que corresponde a 61,9% do total de OTR da amostra.

Esta amostra é constituída predominantemente por óxidos-hidróxidos de ferro (magnetita, hematita e goethita), quartzo, apatita e secundariamente por anatásio, monazita, fosfato secundário e zircão.

A monazita concentra-se preferencialmente nos finos naturais, fração essa que contém 62,5% do total de monazita da amostra.

Os ensaios de separação magnética efetuados na fração -0,020 mm promoveram uma ligeira elevação no teor de terras raras.

Embora o procedimento experimental adotado nesta amostra tenha sido simplificado em relação ao da amostra *saprolito*, nota-se que este material tem comportamento similar ao *saprolito*, pois houve uma razão de enriquecimento da ordem de 4 vezes, aliado a uma recuperação de cerca de 60% de OTR apenas com a geração da fração fina.

6.5. Caracterização do depósito do Córrego do Garimpo

6.5.1 Tipologia preliminar do depósito

Como já citado anteriormente, o tratamento dos dados relativos às análises químicas e às descrições macroscópicas dos furos de sondagem, efetuados na área do Córrego do Garimpo, permitiu a definição preliminar de cinco tipos de materiais distintos. Diagramas de correlação, apresentados a partir da Figura 20 até a Figura 26, foram de extrema valia na definição desses tipos preliminares.

A Figura 20 e a Figura 21, correspondendo, respectivamente, aos teores de OTR versus a relação $\text{CaO} / \text{P}_2\text{O}_5$ e ao teor de CaO x teor de P_2O_5 , permitiram individualizar materiais com presença de apatita (relação $\text{CaO} / \text{P}_2\text{O}_5$ de 0,8 a 1,5) e carbonatitos (relação $\text{CaO} / \text{P}_2\text{O}_5$ acima de 2).

A Figura 22, apresentando a correlação entre os teores de OTR e CaO , evidencia que a maior parcela da porção mineralizada mostra baixos conteúdos de CaO (<5%), embora possam ser observados teores de até 25% ou mais desse óxido (carbonatitos).

Materiais ricos em sílica (>40%), caracterizando o tipo silexito, são facilmente individualizados, como pode ser observado a partir da Figura 23 (OTR versus SiO_2).

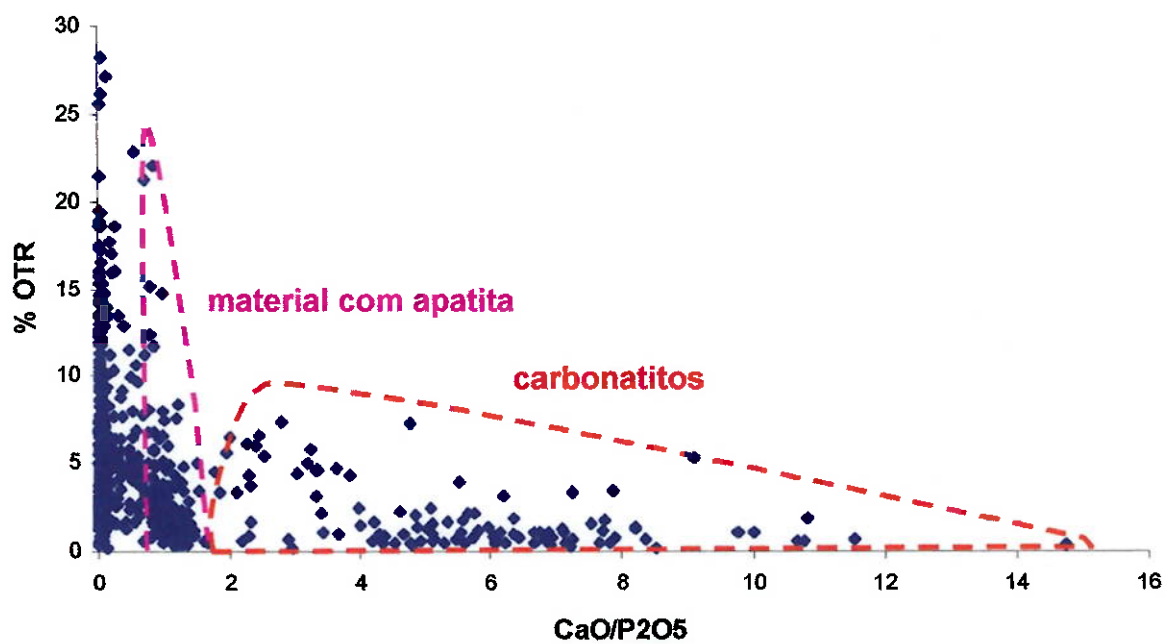


Figura 20 - Correlação de teores de OTR versus a relação CaO / P₂O₅ - Córrego do Garimpo

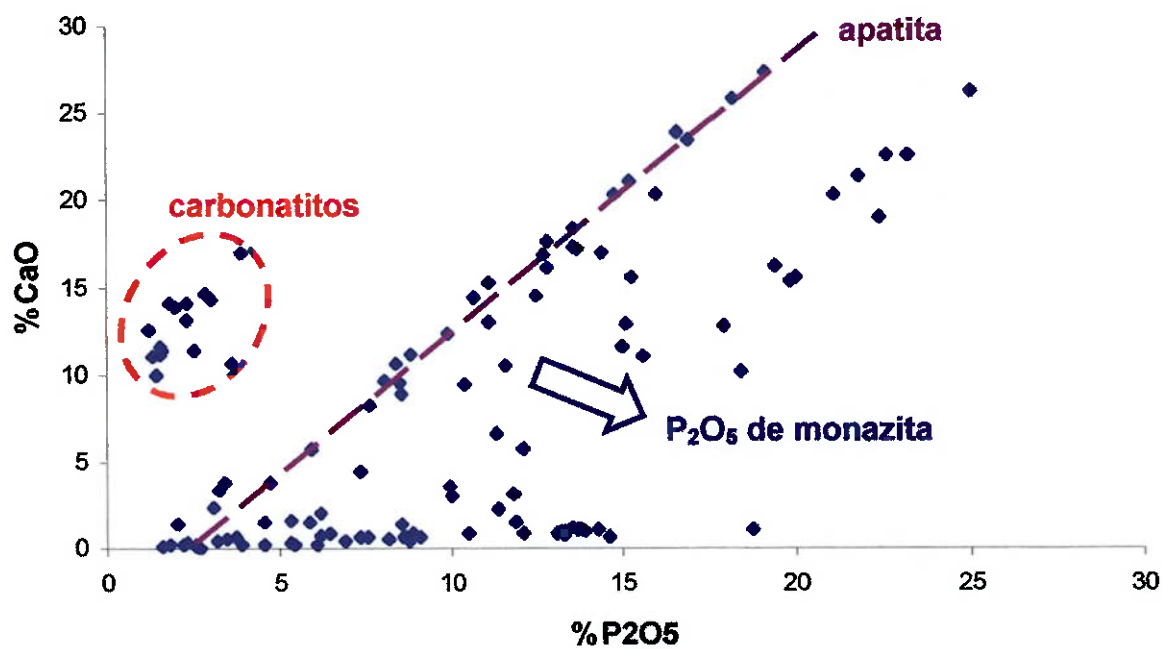


Figura 21 - Correlação de teores de CaO versus P₂O₅ - Córrego do Garimpo

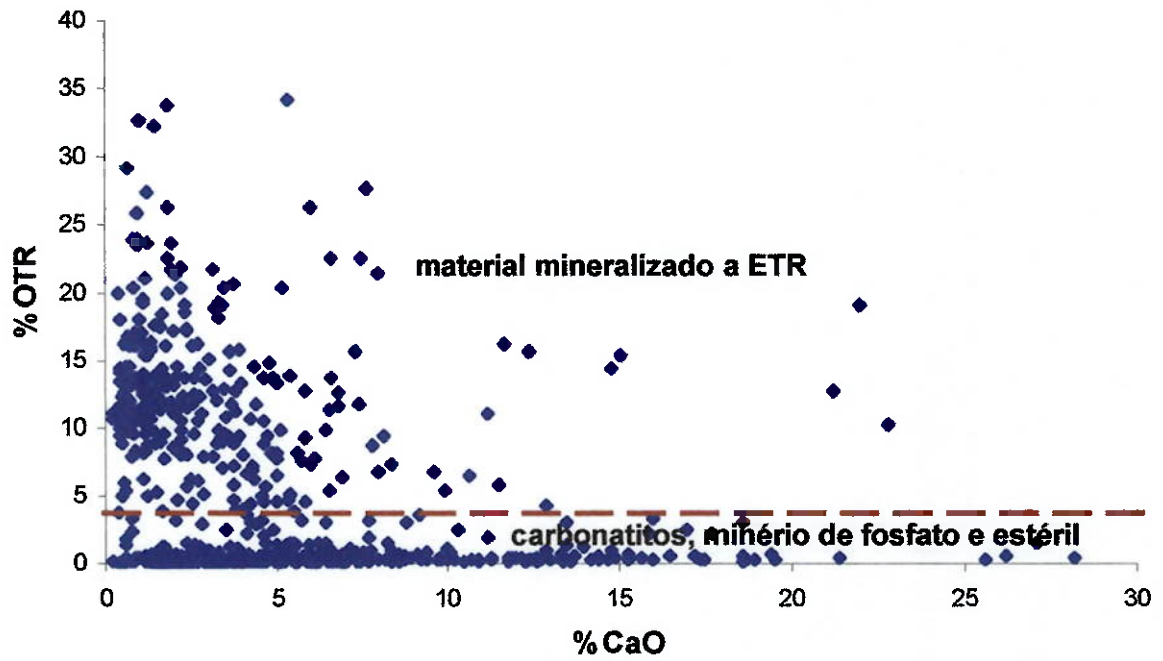


Figura 22 - Correlação de teores de OTR versus CaO - Córrego do Garimpo

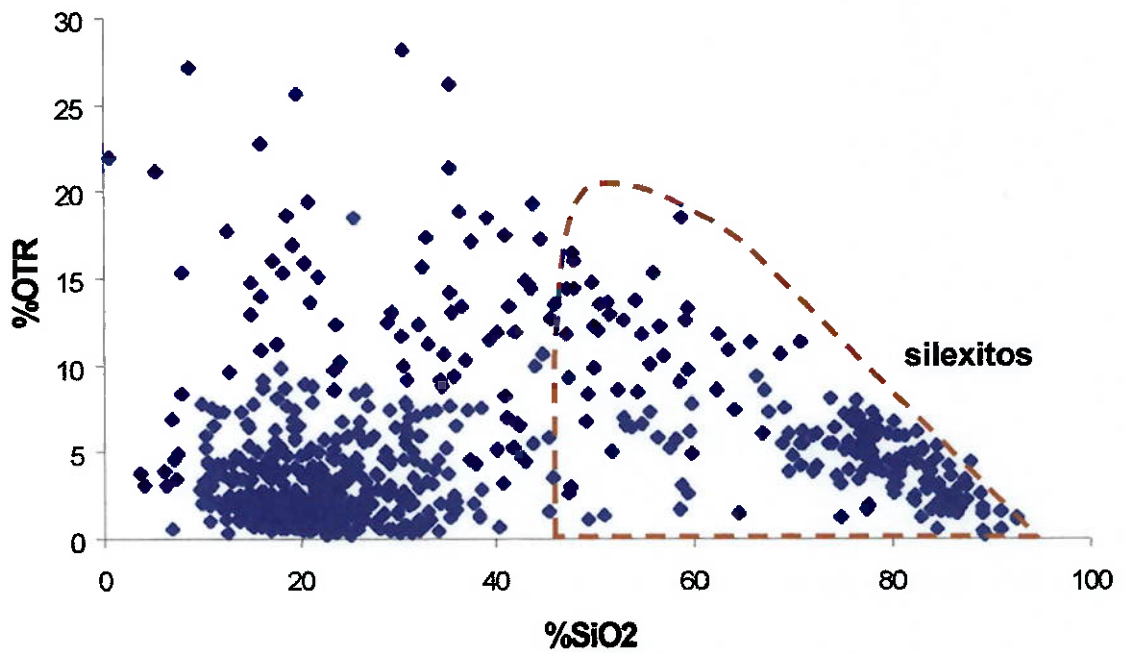


Figura 23 - Correlação de teores de OTR versus SiO₂ - Córrego do Garimpo

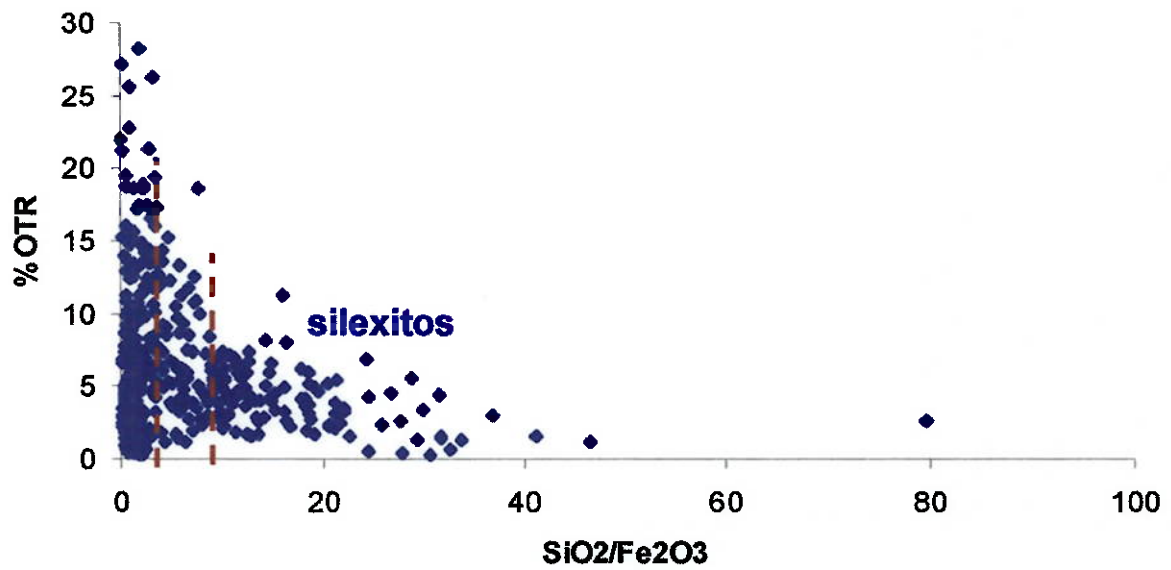


Figura 24 - Correlação dos teores de OTR versus a relação $\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3$ - Córrego do Garimpo

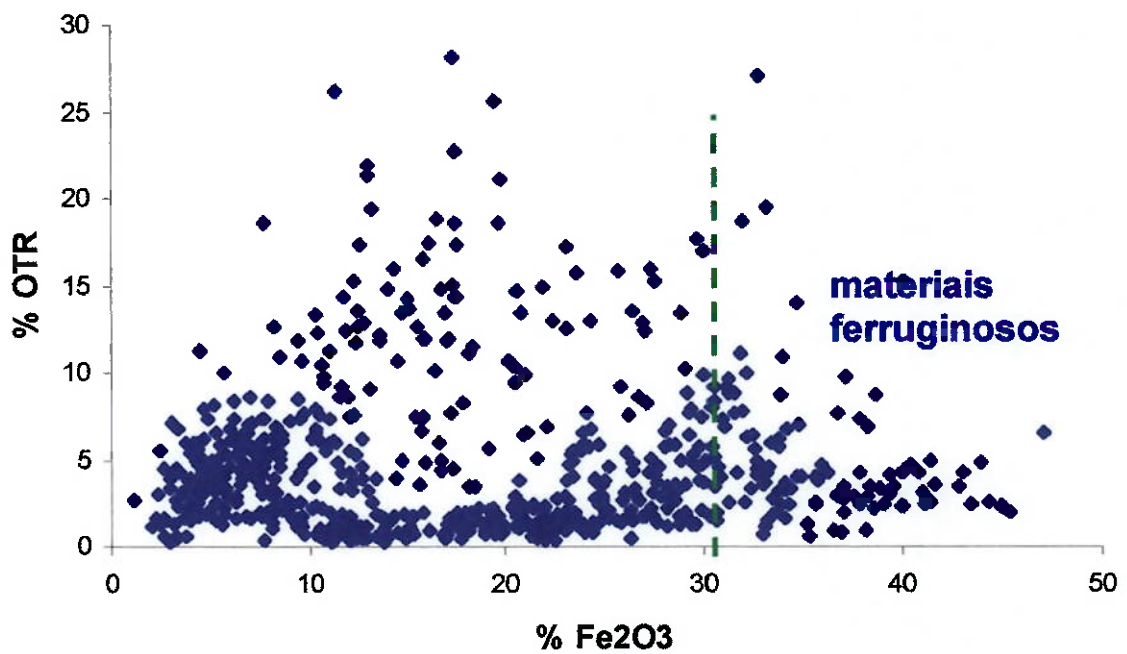


Figura 25 - Teores de OTR versus Fe_2O_3 - Córrego do Garimpo

A correlação entre os teores de OTR e a relação $\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Figura 24) evidencia três grupos distintos:

- um com elevada relação $\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3$ (silexitos);
- outro com baixa relação $\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3$, também evidenciado a partir da Figura 25 (correlação entre os teores de OTR e Fe_2O_3), constituído por materiais com elevados teores de Fe_2O_3 ;
- um terceiro, intermediário entre estes.

Os principais critérios distintivos entre os tipos de materiais observados, como já citado, prenderam-se aos teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO .

A correlação entre os teores de SiO_2 , Fe_2O_3 e CaO , normalizados a 100%, exclusivamente para os intervalos mineralizados (>4% OTR) e apresentada na forma de diagrama triangular na Figura 26, permite uma fácil e rápida individualização dos cinco tipos ou agrupamentos definidos.

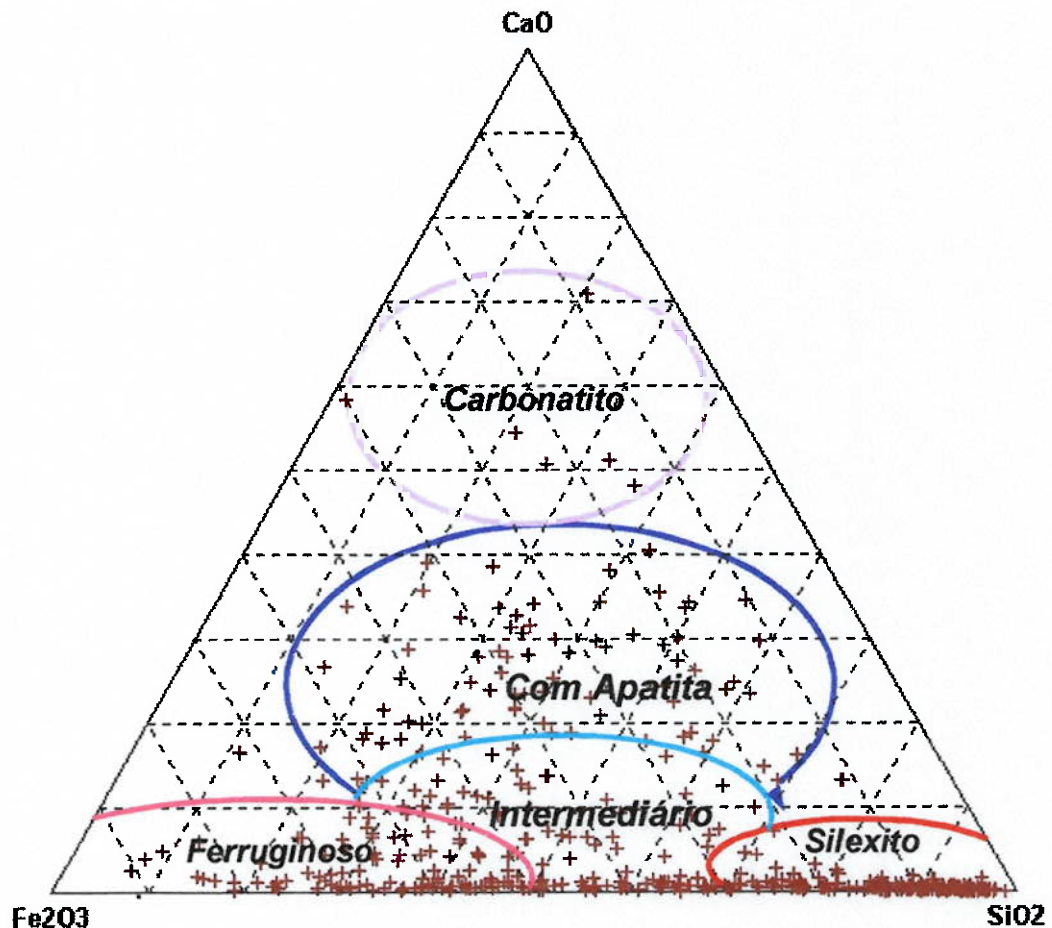


Figura 26 - Diagrama triangular $\text{CaO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$ para a zona mineralizada - Córrego do Garimpo

Dessa forma, os agrupamentos resultantes representam:

- amostras com predominância relativa de SiO_2 em relação aos demais teores de contaminantes, aqui denominadas como tipo *silexito*;
- amostras com maior conteúdo relativo de Fe_2O_3 , designadas por tipo *ferruginoso*;
- amostras com predominância de SiO_2 e de Fe_2O_3 , classificadas como tipo *intermediário*;
- amostras com presença de apatita, constituindo o tipo *com apatita*;
- amostras com elevado conteúdo de carbonatos, formando o tipo *carbonatito*.

Em função das características particulares da malha de sondagem (espaçamento) e da grande variabilidade dos materiais observada, efetuou-se uma avaliação preliminar da distribuição dos tipos definidos com base nas metragens interceptadas pelas sondagens, para cada um dos materiais mineralizados ($\text{OTR} > 4,0\%$), conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Distribuição dos tipos de materiais - Córrego do Garimpo

Tipo	Metros lineares	Teores médios por tipo (%)							Distribuição (%)	
		OTR	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	TiO_2	P_2O_5	Al_2O_3	linear	OTR
silexito	259,5	7,72	12,5	62,1	0,65	1,96	6,17	1,57	36,9	36,8
intermediário	71,4	9,01	22,3	40,5	0,97	4,60	7,99	4,77	10,1	11,8
ferruginoso	134,3	7,54	32,4	22,9	1,45	9,82	8,76	5,07	19,1	18,6
com apatita	192,9	8,10	21,5	21,5	10,8	6,69	12,6	2,02	27,4	28,7
carbonatito	45,7	4,84	11,0	15,7	10,6	2,02	7,15	0,87	6,5	4,1
Total	704,0	7,73	19,6	38,3	4,25	5,02	8,67	2,64	100,0	100,0

O tipo predominante é o *silexito* que corresponde a cerca de 37%, vindo a seguir o tipo *com apatita* (representando 27%); o menos expressivo é o *carbonatito*, que significa aproximadamente 6,5%.

O material *intermediário* é o que apresenta o maior teor de OTR, com valor de 9%, o que significa 12% do total de OTR contido no depósito. Para os demais tipos, esses teores são similares, estando compreendidos entre 7,5 e 8,1%, à exceção do material carbonatito, o mais pobre, com teor de 4,8%. O tipo *silexito* contém cerca de 37% do total de OTR, vindo a seguir o material *com apatita* (~29%), enquanto que o tipo *carbonatito* contém aproximadamente 4% do total de OTR do depósito.

Uma vez definidos os tipos de materiais citados, foram compostas 28 amostras referentes aos quatro tipos de materiais relacionados a processos supérgenos (exceção do carbonatito).

Os teores para essas amostras compostas, por tipo, são apresentados na Tabela 26.

Nas amostras estudadas, correspondentes ao tipo *com apatita*, os teores de OTR variam entre 5,7% e 19% (Furo 39, intervalo de 9,15 a 24,75m), embora os valores mais freqüentes oscilem entre 6,5 e 8%.

Para o tipo *silexito*, as amostras estudadas apresentam teores de OTR compreendidos entre 3,9 e 14,7%. No tipo *ferruginoso*, os teores de OTR estão compreendidos entre 5,7 e 15,3% e, para o tipo *intermediário*, entre 5,8 e 7%.

6.5.2 Ensaio padrão (estágios sucessivos de atrição e deslamagem) nas amostras compostas - Córrego do Garimpo

Os resultados obtidos a partir da execução do ensaio padrão nas amostras compostas estão sumariados na Tabela 27.

Para o tipo *ferruginoso*, com teor médio de 8,6% de OTR, os finos naturais representam 24,6% em massa e têm teor (média) de 17,2% de OTR, o que corresponde a 49% em peso do total contido na amostra. Com a primeira etapa de atrição e deslamagem, o produto obtido representa 33% em massa, com teor de 17,8% de OTR, o que corresponde a 69% do total de OTR. Com a execução da segunda etapa de atrição e deslamagem, obtém-se um produto final com 35,1% da massa, teor de 17,6%, o que significa 73,2% do total de OTR da amostra.

Para o tipo *com apatita* (teor médio de 8,9% de OTR), os finos naturais significam 23,1% em massa e têm teor (média) de 16,8% de OTR, o que representa 47% em peso do total de OTR da amostra. Na primeira etapa de atrição e deslamagem, o produto gerado é de 30% em massa, com teor de 17,5% de OTR, o que corresponde a 62% do total de OTR contido. Após a segunda etapa do processamento, o produto final significa 32,4% em massa, com teor de 17,5% e recupera 66,5% do total de OTR da amostra.

Tabela 26 - Teores iniciais obtidos nas amostras compostas, por tipo - Córrego do Garimpo

		Teores (%)				
		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	CaO
tipo com apatita						
FTR 07	16,0-49,0	6,62	33,0	6,64	20,3	9,75
FTR 09	9,7-23,5	7,63	28,5	8,79	25,3	8,24
FTR 09	97,4-108,5	6,42	9,74	2,26	9,39	12,1
FTR 10	28,6-32,6 e 47,1-52,7	8,12	29,1	11,8	20,2	4,95
FTR 10	78,4-96,6	5,65	37,6	19,3	13,5	6,09
FTR 19	63,6-126,0	6,70	15,1	3,44	13,2	13,6
FTR 30	40,4-62,0	11,3	12,4	1,18	31,8	18,0
FTR 33	44,9-57,1	9,32	20,5	9,37	14,8	17,2
FTR 39	9,1- 24,7	19,0	22,6	4,93	23,3	6,92
FTR 39	24,7- 52,6	6,73	21,5	7,95	12,3	20,4
tipo silixito						
FTR 09	2,0-9,7	10,4	12,3	1,94	61,1	1,28
FTR 10	37,5-45,1 e 62,3-75,5	5,87	7,14	1,26	76,2	0,58
FTR 12	30,3-72,0	7,28	11,3	1,60	65,1	1,21
FTR 14	17,4-27,6	13,8	28,7	5,28	26,7	0,38
FTR 22	4,0-21,9	3,79	4,91	0,55	83,1	0,39
FTR 23	12,8-49,9	11,9	15,0	1,55	59,1	0,47
FTR 26	0,0-21,0	14,7	15,4	1,15	50,5	0,42
FTR 27S	0,0-14,6	9,23	17,9	3,38	53,9	0,87
FTR 27W	0,4-13,5	11,8	18,2	3,90	48,4	0,43
FTR 08	15,4-21,6	7,75	20,8	6,23	47,4	0,90
tipo ferruginoso						
FTR 07	0,0-16,0	5,65	42,6	10,1	22,7	0,56
FTR 13	18,5-31,0	15,3	34,3	3,89	24,6	0,59
FTR 27S	14,6-50,6	8,04	31,9	8,05	32,0	3,18
FTR 30	0,5-21,1	6,84	33,2	11,4	24,6	2,76
FTR 08	0,0-15,4	8,08	38,7	10,7	17,3	0,52
FTR 11	47,9-64,0	10,4	40,8	17,3	8,39	2,71
tipo intermediário						
FTR 10	52,7-62,3	7,05	21,5	8,12	45,0	1,73
FTR 15	27,8-39,3	5,78	22,4	1,97	52,0	0,37

Tabela 27 - Resultados obtidos no ensaio padrão - Córrego do Garimpo

Tipo / Amostra	Teores OTR (%)				Recuperação Massa (%)			Recuperação OTR (%)		
	TQ	Fino Natural	Finos 1ª Atrição	Finos 2ª Atrição	Fino Natural	Finos 1ª Atrição	Finos 2ª Atrição	Fino Natural	Finos 1ª Atrição	Finos 2ª Atrição
Ferruginoso										
FTR 07 0,00-16,00 m	5,65	13,1	14,2	13,7	14,3	30,4	33,3	33,2	76,4	80,9
FTR 13 18,55-31,00 m	15,3	19,1	19,8	19,9	37,6	46,6	48,9	46,9	60,4	63,9
FTR 27S 14,6-50,65 m	8,04	20,1	20,8	20,4	22,4	29,3	31,2	55,8	75,5	79,0
FTR 30 0,5-21,15 m	6,84	14,6	14,9	14,8	22,9	27,4	29,3	49,0	59,6	63,4
FTR 08 0,00-15,40 m	8,08	15,2	15,1	15,1	28,4	39,4	41,4	53,3	73,8	77,1
FTR 11 47,95-64,00 m	10,4	18,5	19,4	19,7	28,2	34,2	36,2	50,0	63,3	68,2
Média	8,6	17,2	17,8	17,6	24,6	33,0	35,1	49,4	69,3	73,2
Desvio padrão	3,1	2,6	2,7	2,8	7,1	6,6	6,7	7,2	7,2	7,2
Com Apatita										
FTR 07 16,00-49,00 m	6,62	15,0	14,6	14,2	23,6	30,4	32,3	53,4	67,1	69,2
FTR 09 9,70-23,50 m	7,63	16,1	15,9	15,7	28,4	36,9	39,2	60,0	76,9	80,4
FTR10 28,6-32,6 e 47,1-52,7 m	8,12	17,5	18,4	18,3	23,5	31,3	33,1	50,6	70,9	74,6
FTR 10 78,4-96,6m	5,65	13,0	12,6	12,4	30,4	36,6	38,7	69,7	81,8	84,7
FTR 30 40,45-62,00 m	11,3	21,1	24,0	24,5	15,5	24,6	27,9	29,1	52,4	60,6
FTR 33 44,95-57,1 m	9,32	14,8	15,9	16,2	22,0	29,2	32,8	34,9	49,8	56,9
FTR 39 9,15- 24,75 m	19,0	27,0	28,6	29,1	23,7	29,4	32,0	33,7	44,2	49,0
FTR 39 24,75- 52,65 m	6,73	13,4	14,0	14,3	21,0	26,0	28,4	41,7	54,0	60,2
Média	8,9	16,8	17,5	17,5	23,1	30,0	32,4	46,7	61,8	66,5
Desvio padrão	4,0	4,4	5,2	5,4	4,2	4,1	3,9	13,3	12,9	11,6
Sillexito										
FTR 09 2,00-9,70 m	10,4	21,5	23,3	24,0	13,1	19,9	21,4	26,9	44,3	49,3
FTR 10 37,55-45,1 m e 62,35-75,5 m	5,87	19,7	22,4	22,2	6,34	9,47	9,84	21,2	36,1	37,2
FTR 12 30,3-70,9 m	7,28	15,7	17,3	17,1	14,4	22,4	24,0	31,1	53,1	56,5
FTR 14 17,45-27,6 m	13,8	21,1	21,8	21,9	36,5	44,8	48,4	55,9	71,0	76,8
FTR 22 4, - 21,95 m	3,79	17,0	17,9	17,8	10,4	12,6	13,3	46,6	59,7	62,7
FTR 23 12,8-49,3 m	11,9	30,5	31,5	31,6	15,8	20,9	23,8	40,6	55,7	63,3
FTR 26 0,-21, m	14,7	20,1	22,2	23,1	26,5	34,3	37,2	36,4	52,0	58,6
FTR 27S 0, -14,6m	9,23	24,5	25,7	25,7	14,2	21,0	24,8	37,6	58,4	69,3
FTR 27W 0,4-13,5 m	11,8	26,6	27,5	27,3	19,4	29,2	35,9	43,5	67,7	82,8
FTR 08 15,40-21,60 m	7,75	18,6	20,2	20,1	16,8	23,1	25,2	40,3	60,1	65,2
Média	9,5	21,7	23,2	23,2	16,3	22,6	25,0	36,8	54,5	60,4
Desvio padrão	3,3	4,3	4,1	4,1	8,1	9,7	10,8	9,4	9,8	12,4
Intermed. Ferrug/ Sillexito										
FTR 10 52,7-62,35 m	7,05	19,5	20,1	19,7	17,4	23,2	25,3	48,0	66,1	70,4
FTR 15 27,8-39,3 m	5,78	10,5	11,2	11,2	28,9	36,7	38,1	52,3	71,0	73,9
Média	6,4	14,6	15,3	15,1	23,6	30,5	32,2	50,4	68,8	72,3

No tipo *silexito* (teor médio de 9,5% de OTR), os finos naturais representam 16,3% em massa e têm teor (média) de 21,7% de OTR, o que corresponde a 37% em peso do total de OTR da amostra. Com o primeiro ciclo de atrição e deslamagem, o produto obtido, com 23% em massa, tem teor de 23,2% de OTR, o que significa 55% do total de OTR. Com a realização da segunda etapa de atrição e deslamagem, o produto final corresponde a 25% em massa, com teor de 23,2% e contém 60,4% do total de OTR da amostra. No tipo *intermediário* (teor médio de 6,4% de OTR), os finos naturais correspondem a 24% em massa, com teor (média) de 14,6% de OTR, o que significa 50% em peso do total de OTR da amostra.

No primeiro ciclo de atrição e deslamagem, o produto gerado tem 30% em massa e teor de 15,3% de OTR, o que corresponde a 69% do total de OTR contido.

Na segunda etapa, o produto final significa 32% em massa, com teor de 15,1% e recupera 72,3% do total de OTR da amostra.

Todos os materiais responderam satisfatoriamente ao processo estabelecido - recuperação média geral de 66% OTR, aliada a um teor da ordem de 16% OTR.

6.5.3 Ensaios de tratamento químico da monazita

Os resultados dos testes químicos, utilizando lixiviação sulfúrica (85%), à temperatura ambiente, em ensaios com duração de 3 horas, para os produtos gerados no ensaio padrão, correspondentes aos *Finos Naturais* e aos *Finos das atrições*, estão expostos na Tabela 28.

A Tabela 29 traz um balanço geral, considerando a recuperação final de terras raras, após os ensaios de atrição, deslamagem e lixiviação sulfúrica à temperatura ambiente para as amostras do depósito do Córrego do Garimpo.

**Tabela 28 - Resultados da extração nos produtos gerados a partir das amostras compostas -
Córrego do Garimpo**

Furo (FTR)	Intervalo (m)	Recuperação OTR (%)			Extração OTR (%)				
		F.Naturais	F.Atrições	Total	ensaio		amostra		Total
					F.Naturais	F.Atrições	F.Naturais	F.Atrições	
Ferruginoso									
07	0,0 - 16,0	33,2	47,6	80,9	84,4	76,7	28,1	36,5	64,6
13	18,5 - 31,0	46,9	17,0	63,9	25,2	18,6	11,8	3,2	15,0
27S	14,6 - 50,6	55,8	23,2	79,0	82,0	69,3	45,8	16,1	61,9
30	0,5 - 21,1	49,0	14,4	63,4	85,3	74,1	41,8	10,7	52,5
08	0,0 - 15,4	53,3	23,8	77,1	48,0	42,6	25,6	10,2	35,7
11	47,9 - 64,0	50,0	18,2	68,2	88,5	79,3	44,2	14,5	58,7
Média		49,4	23,7	73,2	73,3	63,6	36,1	15,5	51,7
Desvio padrão		7,2	11,1	7,2	23,8	22,2	12,2	10,4	17,5
Com Apatita									
07	16,0 - 49,0	53,4	15,8	69,2	93,3	94,3	49,8	14,9	64,7
09	9,7 - 23,5	60,0	20,4	80,4	91,5	93,6	54,9	19,1	74,0
10	28,6-32,6 e 47,1-52,7	50,6	24,1	74,6	94,3	92,6	47,7	22,3	70,0
10	78,4 - 96,6	69,7	15,0	84,7	96,4	87,8	67,2	13,2	80,4
30	40,4 - 62,0	29,1	31,6	60,6	72,2	53,4	21,0	16,9	37,8
33	44,9 - 57,1	34,9	22,0	56,9	*	s/m	**		
39	9,1 - 24,7	33,7	15,4	49,0	64,5	77,2	21,7	11,9	33,6
39	24,7 - 52,6	41,7	18,5	60,2	90,7	68,3	37,8	12,6	50,4
Média		46,7	19,8	66,5	86,6	79,9	42,4	15,1	57,6
Desvio padrão		13,3	5,2	11,6	11,6	14,4	15,9	3,5	16,9
Silexito									
09	2,0 - 9,7	26,9	22,3	49,3	66,3	61,0	17,9	13,6	31,5
10	37,6- 45,1 e 62,3-75,5	21,2	15,9	37,2	80,7	67,0	17,1	10,7	27,8
12	30,3 - 70,9	31,1	25,4	56,5	66,8	46,2	20,8	11,7	32,5
14	17,4 - 27,6	55,9	20,9	76,8	45,9	36,5	25,7	7,6	33,3
22	4,0 - 21,9	46,6	16,0	62,7	16,6	14,3	7,7	2,3	10,0
23	12,8 - 49,3	40,6	22,7	63,3	67,5	63,9	27,4	14,5	41,9
26	0,0 - 21,0	36,4	22,1	58,6	18,1	14,6	6,6	3,2	9,8
27S	0,0 - 14,6	37,6	31,7	69,3	32,7	25,5	12,3	8,1	20,4
27W	0,4 - 13,5	43,5	39,3	82,8	33,1	38,2	14,4	15,0	29,4
08	15,4 - 21,6	40,3	24,9	65,2	76,7	79,8	30,9	19,9	50,8
Média		36,8	23,6	60,4	52,5	44,4	18,2	10,4	28,6
Desvio padrão		9,4	6,7	12,4	22,9	21,6	7,8	5,2	12,2
Intermediário silexito / ferruginoso									
10	52,7 - 62,3	48,0	22,4	70,4	85,8	82,5	41,2	18,5	59,7
15	27,8 - 39,3	52,3	21,6	73,9	7,0	5,4	3,7	1,2	4,8
Média		50,4	22,0	72,3	43,0	40,6	20,8	9,1	29,9
Desvio padrão		2,1	0,4	1,7	39,4	38,6	18,8	8,7	27,4

Tabela 29 - Sumário da recuperação de terras raras nos processos mineral e hidrometalúrgico a partir das amostras compostas - Córrego do Garimpo

	<i>Tipo de material</i>				<i>Média</i>
	<i>Silexito</i>	<i>Intermediário</i>	<i>Ferruginoso</i>	<i>Apatítico</i>	
Nº amostras	9	3	7	8	27
Distrib. OTR (%)	38,4	12,3	19,4	29,9	100,0
Processamento mineral (ensaio padrão - 2 ciclos de atrição e deslamagem)					
Teores médios (%peso)					
OTR	23,2	15,1	17,6	17,5	19,5
Fe ₂ O ₃	21,2	30,5	39,2	30,5	28,6
SiO ₂	23,3	17,4	8,3	9,3	15,5
TiO ₂	1,7	4,1	4,3	4,0	3,2
CaO	1,1	1,2	1,5	6,8	2,9
P ₂ O ₅	10,4	8,5	9,7	11,2	10,3
Al ₂ O ₃	5,7	8,8	5,8	3,0	5,3
Recuperações médias (%)					
<i>massa</i>	25,0	32,2	35,1	32,4	30,0
OTR	60,2	72,3	73,2	66,9	66,2
Testes hidrometalúrgicos (lixiviação sulfúrica à temperatura ambiente)					
Recuperações OTR (%)					
<i>ensaio</i>	47,3	41,3	70,6	86,6	61,5
Recuperação total de OTR (%)					
	28,6	29,9	51,7	57,6	41,9

Para as amostras correspondentes aos tipos *ferruginoso e com apatita*, a recuperação global de terras raras foi superior a 50%. Já para as amostras dos tipos *silexito e intermediário*, as recuperações são inferiores, situando-se na faixa de 30%. A maior presença de material silicoso implica, provavelmente, na necessidade da utilização de temperaturas mais elevadas para a sua abertura, de modo a colocar as terras raras em solução.

Conseqüentemente, para as condições adotadas, a recuperação global para os dois tipos de minério com *silexito* situa-se ao redor de 30% e para os outros dois tipos é ao redor de 55%, o que corresponde a uma recuperação total de 42% de OTR.

Estudos hidrometalúrgicos adicionais sobre amostras volumétricas correspondentes aos quatro tipos determinados devem ser realizados, de forma a possibilitar a otimização do processo, particularmente para os tipos onde a proporção de material *silexítico* é mais elevada.

6.6. Estudos complementares efetuados em amostras da trincheira aberta no Córrego do Garimpo (argila ferruginosa e silexito)

6.6.1 Argila ferruginosa

Esta amostra apresenta teor de OTR de 5,01%, 37,2% Fe₂O₃ e 22,1% SiO₂.

Os estudos efetuados sobre esta amostra indicaram não haver uma resposta satisfatória ao processo de atrição e deslamagem empregado (só 1 estágio), uma vez que o produto final obtido (OF), com teor de apenas 10,2% OTR, recupera 39% do total contido. Para esse produto, há uma razão de enriquecimento de OTR em relação à alimentação de 2,04. A Tabela 30 sumaria esses resultados.

Tabela 30 - Distribuição de teores no produto britado a -3,36 mm após atrição e deslamagem - Amostra argila ferruginosa

Fração mm	% Massa		Teores (%)									OTR/ Fe ₂ O ₃
	retida	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO	PF		
+0,84	17,2	3,36	36,8	10,6	27,4	6,01	0,25	5,51	4,35	4,59	0,09	
-0,84+0,297	12,3	2,21	40,5	18,6	20,4	5,28	0,19	5,45	3,91	3,87	0,05	
-0,297 +0,149	15,0	2,24	38,5	22,3	18,1	4,50	0,22	4,74	3,53	4,04	0,06	
-0,105+0,020	19,2	2,66	33,6	19,3	25,2	4,92	0,26	5,16	3,77	5,33	0,08	
Under	17,2	7,90	31,4	8,43	26,8	7,01	0,29	5,29	3,77	7,99	0,25	
OF	19,2	10,2	43,4	3,09	14,3	6,93	0,42	7,27	2,04	11,2	0,24	
Total Calc.	100,0	5,01	37,2	13,2	22,1	5,83	0,28	5,62	3,52	6,41	0,13	

Fração mm	% Massa		Distribuição (%)						
	retido	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO
+0,84	17,2	11,5	17,0	13,8	21,3	17,7	15,4	16,8	21,2
-0,84+0,297	12,3	5,4	13,4	17,3	11,3	11,1	8,4	11,9	13,7
-0,297 +0,149	15,0	6,7	15,5	25,3	12,2	11,5	11,8	12,6	15,0
-0,149+0,020	19,2	10,2	17,3	28,1	21,9	16,2	17,9	17,6	20,6
Under	17,2	27,1	14,5	11,0	20,9	20,7	17,8	16,2	18,4
OF	19,2	39,0	22,4	4,5	12,4	22,8	28,8	24,8	11,1
Total Calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

6.6.2 Silexito

Ao contrário da amostra de argila ferruginosa, também coletada na trincheira, o silexito responde satisfatoriamente ao processo desenvolvido. Ambos os produtos finos obtidos (abaixo de 0,020 mm) apresentam teores de OTR superiores a 21%, com média

de 21,9% OTR, e recuperam cerca de 45% do total contido na amostra. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 31.

Tabela 31 - Distribuição de teores no produto britado a -3,36 mm após atrição e deslamagem - Amostra sílexito

Fração mm	%Massa retida	Teores (%)										OTR/ Fe ₂ O ₃
		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO	PF	Fe ₂ O ₃	
+0,84	39,2	4,60	7,09	0,52	82,4	2,62	0,16	0,48	0,66	1,77	0,65	
-0,84+0,297	19,9	5,81	8,20	1,44	78,3	2,84	0,17	0,49	0,85	1,99	0,71	
-0,297+0,149	12,2	5,63	10,3	2,86	69,3	3,10	0,24	0,62	1,09	2,38	0,55	
-0,149+0,020	10,2	12,5	10,8	3,87	61,5	5,73	0,47	1,07	1,59	3,38	1,16	
Under	10,3	21,4	16,0	2,57	42,0	7,49	0,69	1,35	2,01	6,06	1,34	
OF	8,3	22,5	34,6	1,73	15,8	8,21	0,81	1,85	3,12	9,47	0,65	
Total Calc.	100,0	8,97	11,3	1,64	68,2	4,00	0,31	0,76	1,19	3,13	0,80	

Fração mm	%Massa retida	Distribuição (%)							
		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO
+0,84	39,2	20,1	24,7	12,4	47,4	25,7	20,2	24,7	21,8
-0,84+0,297	19,9	12,9	14,5	17,4	22,8	14,1	10,8	12,8	14,2
-0,297+0,149	12,2	7,7	11,2	21,3	12,4	9,5	9,4	9,9	11,2
-0,149+0,020	10,2	14,2	9,8	24,0	9,2	14,6	15,4	14,3	13,6
Under	10,3	24,5	14,6	16,1	6,3	19,2	22,8	18,2	17,4
OF	8,3	20,7	25,3	8,7	1,9	16,9	21,5	20,0	21,7
Total Calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

6.6.3 Comparação entre as amostras volumétricas estudadas

Uma comparação entre as amostras volumétricas (frente de lavra e trincheira) estudadas, correspondentes à região do Córrego do Garimpo, é apresentada na Tabela 32.

À exceção da amostra de *argila ferruginosa* (razão de enriquecimento de 2,0, porém com recuperação inferior a 40%), as demais respondem favoravelmente ao processo físico vislumbrado, gerando produtos com teores superiores a 15% de OTR (razões de enriquecimento entre 2,5 e 3,5) e recuperações compreendidas entre 45% e 77%.

Tabela 32 - Características dos Produtos Finais (Finos Naturais + 2 Atrições) - Córrego do Garimpo

	Amostra				média dos furos de sondagem
	Saprolito	TR-02 (*)	silexito (trincheira)	argila ferruginosa (trincheira)	
% OTR Alim.	8,46	4,59	8,97	5,01	7,73
% Massa	31,0	17,5	18,5	19,2	30,0
% OTR	20,9	16,2	21,9	10,2	19,5
% Fe ₂ O ₃	34,9	40,0	24,3	43,4	28,6
% TiO ₂	3,62	5,10	2,20	3,09	3,18
% P ₂ O ₅	11,4	12,7	7,81	6,93	10,3
% CaO	3,97	6,5	0,74	0,42	2,85
% SiO ₂	9,25	7,50	30,3	14,3	15,5
% Al ₂ O ₃	3,65	2,42	1,57	7,27	5,27
%OTR/%Fe ₂ O ₃	0,60	0,51	0,90	0,24	0,68
Rec. OTR (%)	77,2	61,9	45,2	39,0	66,2

(*) somente um estágio de atrição

7. Resultados preliminares obtidos para amostras do depósito da Lagoa Seca

7.1. Amostra TR 01

7.1.1 Composição Química

A composição química da amostra TR 01 comparativamente a amostra de saprolito está exposta na Tabela 33.

Tabela 33 - Composição química das amostras TR 01 e Saprolito

óxidos	Amostra	
	TR 01 Lagoa Seca (%)	Saprolito (média; %)
OTR	12,5	8,69
P ₂ O ₅	13,3	11,8
CaO	0,72	8,95
Fe ₂ O ₃	12,6	28,5
TiO ₂	26,5	8,80
SiO ₂	8,43	20,9
Al ₂ O ₃	9,40	3,23
MgO	< 0,10	3,21
SrO	...	0,77
BaO	8,43	1,84
SO ₃	0,33	...
ZrO ₂	1,73	...

As duas amostras apresentam diferenças significativas quanto à sua composição química. A amostra TR 01 mostra teor de OTR mais elevado do que a amostra saprolito (12,5% contra 8,69%), o mesmo ocorrendo em relação aos teores de P₂O₅ (13,3% contra 11,8%), TiO₂ (26,5% contra 8,80%), Al₂O₃ (9,40% contra 3,23%) e BaO (8,43% contra 1,84%); por outro lado, destaca-se também a marcante redução nos teores de Fe₂O₃ (12,6% contra 28,5%) e CaO (0,7% contra 8,9%)

7.1.2 Análise granulométrica

A distribuição em massa e de teores por faixa granulométrica para a amostra TR 01 está exposta na Tabela 34.

Tabela 34 - Distribuição de teores por fração granulométrica - Amostra TR 01

Fração mm	% Peso		Teores (%)											OTR/ Fe ₂ O ₃
	retido	acum	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO	SO ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	
+0,595	8,1	8,1	7,30	7,20	26,4	8,50	14,9	0,98	13,2	12,2	0,47	3,12	1,35	1,01
-0,595+0,297	6,6	14,7	6,10	10,3	26,7	10,3	13,8	0,87	12,4	11,0	0,38	3,10	1,27	0,59
-0,297+0,149	8,6	23,4	5,50	13,3	30,6	8,90	12,2	0,75	11,2	9,40	0,37	2,63	1,37	0,41
-0,149+0,074	10,6	33,9	5,10	16,4	34,2	7,20	10,7	0,65	9,80	8,20	0,30	2,08	1,49	0,31
-0,074+0,044	8,5	42,4	5,50	17,0	33,0	6,60	11,1	0,64	10,1	8,50	0,27	1,56	1,55	0,32
-0,044+0,037	6,7	49,1	6,20	17,0	31,8	7,20	11,3	0,65	9,90	8,50	0,27	1,40	1,70	0,36
-0,037+0,020	9,2	58,3	8,20	15,7	28,7	9,40	11,8	0,65	9,40	8,50	0,28	1,35	2,13	0,52
-0,020	41,7	100,0	21,2	10,6	21,0	8,70	14,9	0,71	7,50	7,10	0,33	1,14	2,38	2,00
Total Calc.	100,0		12,5	12,6	26,5	8,43	13,3	0,72	9,40	8,43	0,33	1,73	1,90	0,99

Fração mm	% Peso		Distribuição (%)									Nb ₂ O ₅
	retido	acum	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO		
+0,595	8,1	8,1	4,7	4,6	8,1	8,2	9,1	11,4	11,7	5,8	1,35	
-0,595+0,297	6,6	14,7	3,2	5,4	6,7	8,1	6,9	8,7	8,6	4,4	1,27	
-0,297+0,149	8,6	23,4	3,8	9,1	10,0	9,1	7,9	10,3	9,6	6,2	1,37	
-0,149+0,074	10,6	33,9	4,3	13,8	13,6	9,0	8,5	11,0	10,3	8,3	1,49	
-0,074+0,044	8,5	42,4	3,7	11,4	10,5	6,6	7,1	9,1	8,5	6,9	1,55	
-0,044+0,037	6,7	49,1	3,3	9,1	8,1	5,8	5,7	7,1	6,8	6,0	1,70	
-0,037+0,020	9,2	58,3	6,0	11,5	10,0	10,2	8,2	9,2	9,3	10,3	2,13	
-0,020	41,7	100,0	70,8	35,1	33,1	43,0	46,7	33,3	35,1	52,2	2,38	
Total Calc.	100,00		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	1,90	

A análise granulométrica indica que 58,3% em peso da amostra estão retidos em 0,020 mm.

Os teores de OTR até 0,020 mm variam entre 5,1% (fração -0,149+0,074 mm) e 8,2% (fração -0,037+0,020 mm); abaixo de 0,020 mm esse teor eleva-se para 21,2%, o que significa 70,8% do total de OTR contido na amostra.

Até a fração +0,037 mm, os teores de Fe_2O_3 elevam-se para os finos, variando entre 7,2% (fração +0,595 mm) e 17% (fração +0,037 mm), diminuindo a seguir em direção aos finos, atingindo 10,6% abaixo de 0,020 mm (35,1% do Fe_2O_3 total contido na amostra).

Os teores de TiO_2 são elevados e variam entre 21% (fração -0,020 mm; 33,1% do TiO_2 total contido na amostra) e 34,2% (fração -0,149+0,074 mm).

Os teores de P_2O_5 até 0,074 mm variam entre 10,7% (fração -0,149+0,074 mm) e 14,9% (fração +0,595 mm), com tendência à diminuição para os finos; para o intervalo -0,074+0,020 mm esse teor varia pouco, situando-se entre 11,1 e 11,8%, atingindo valor de 14,9% na fração -0,020 mm (o que corresponde a 46,7% do P_2O_5 total contido na amostra).

Os teores de CaO são extremamente baixos, variando entre 0,64 e 0,98%, com decréscimo para os finos até 0,020 mm. Os teores de SiO_2 variam entre 6,6% (fração -0,074+0,044 mm) e 10,3% (fração -0,595+0,297 mm); a fração -0,020 mm é responsável por 43% do SiO_2 total contido na amostra.

Os teores de Al_2O_3 variam entre 7,5% (fração -0,020 mm; 33,3% do Al_2O_3 total contido na amostra) e 13,2% (fração +0,595 mm), com tendência à diminuição para os finos. Os teores de BaO situam-se entre 7,1% (fração -0,020 mm; 35,1% do BaO total contido na amostra) e 12,2% (fração +0,595 mm), com a mesma tendência observada para o Al_2O_3 .

Teores de SO_3 são baixos para todo o intervalo considerado, estando compreendidos entre 0,3% e 0,5%, com tendência à diminuição para os finos. Os teores de Nb_2O_5 , acima de 0,037 mm, variam entre 1,3 e 1,7%, atingindo 2,4% (52,2% do total) na fração -0,020 mm.

7.1.3 Moagem e atrição

A análise granulométrica do produto moído a -0,420 mm e atricionado, após a remoção prévia dos finos naturais (fração -0,020 mm), está exposta na Tabela 35.

A distribuição em massa indica que 15% em peso da amostra estão retidos em 0,210 mm (8,7% em relação à amostra original) e 6,8% em peso representam material passante em 0,020 mm.

Tabela 35 - Distribuição de teores por fração. Produto de atrição após remoção dos Finos Naturais - Amostra TR 01

Fração mm	% Massa			Teores (%)											OTR/ Fe ₂ O ₃
	retido	acum	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO	SO ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	
-0,420+0,210	15,0	8,7	5,89	9,50	26,3	11,3	13,2	0,94	12,0	11,4	0,36	3,16	1,28	0,62	
-0,210+0,149	12,1	7,1	5,28	11,9	29,6	10,3	11,9	0,89	10,9	9,76	0,34	3,08	1,37	0,44	
-0,149+0,074	22,1	12,9	5,08	14,6	32,9	8,08	11,0	0,81	9,79	8,52	0,30	2,56	1,47	0,35	
-0,074+0,044	31,5	18,4	5,54	16,3	32,6	6,84	10,6	0,74	9,26	9,48	0,33	1,80	1,67	0,34	
-0,044+0,020	12,5	7,3	7,02	15,8	30,0	8,38	11,2	0,75	9,35	8,97	0,29	1,57	1,98	0,44	
-0,020	6,8	3,9	10,8	10,6	27,7	7,70	15,1	0,98	11,4	6,50	0,43	1,41	1,41	1,02	
Total Calc.	100,0	58,3	6,00	13,9	30,7	8,45	11,6	0,82	10,2	9,33	0,33	2,27	1,55	0,43	

Fração mm	% Massa			Distribuição no ensaio (%)						Distribuição na amostra (%)					
	retido	acum	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	
-0,420+0,210	15,0	8,7	14,7	10,2	12,8	20,0	17,0	17,7	4,3	6,6	8,6	11,4	9,1	11,8	
-0,210+0,149	12,1	7,1	10,7	10,4	11,7	14,8	12,4	13,0	3,1	6,7	7,8	8,4	6,6	8,7	
-0,149+0,074	22,1	12,9	18,7	23,2	23,7	21,1	21,0	21,3	5,5	15,0	15,9	12,0	11,2	14,2	
-0,074+0,044	31,5	18,4	29,1	36,9	33,5	25,5	28,7	28,7	8,5	23,9	22,4	14,5	15,3	19,2	
-0,044+0,020	12,5	7,3	14,6	14,2	12,2	12,4	12,0	11,5	4,3	9,2	8,2	7,1	6,4	7,7	
-0,020	6,8	3,9	12,2	5,2	6,1	6,2	8,8	7,6	3,6	3,3	4,1	3,5	4,7	5,1	
Total Calc.	100,0	58,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	29,2	64,9	66,9	57,0	53,3	66,7	

Ao longo do intervalo granulométrico analisado, os teores de OTR variam entre 5,1% (fração -0,149+0,074 mm) e 10,8% (fração -0,020 mm), com tendência à elevação para os finos; a fração -0,020 mm contém 12,2% do total de OTR contido no material (3,6% em relação a total da amostra inicial).

Até a fração +0,037 mm, os teores de Fe₂O₃ elevam-se para os finos, variando entre 9,5% (fração -0,420+0,210 mm) e 16,3% (fração +0,037 mm), diminuindo a seguir, atingindo 10,6% abaixo de 0,020 mm (5,2% do total contido no material; 3,3% do Fe₂O₃ total contido na amostra inicial).

Os teores de TiO₂ aumentam até 0,074 mm, variando entre 26,3% (fração -0,420+0,210 mm) e 32,9% (fração -0,149+0,074 mm), decrescendo posteriormente em direção aos finos; a fração -0,020 mm, com teor de 27,7%, é responsável por 6,1% do TiO₂ total contido no material (4,1% em relação a amostra inicial).

Os teores de P₂O₅ variam entre 10,6% (fração -0,074+0,037 mm) e 15,1% (fração -0,020 mm), diminuindo para os finos até a fração -0,074+0,037 mm; a fração -0,020 mm contém 8,8% do P₂O₅ total presente no material (4,7% do total da amostra inicial).

Os teores de CaO variam entre 0,74 e 0,98%, com decréscimo para os finos até 0,020 mm.

7.1.4 Separações minerais

Os resultados dos ensaios de separações minerais estão expostos na Tabela 36.

Tabela 36 - Distribuição de teores nos produtos de separação mineral. Produto de atrição após remoção dos finos naturais - Amostra TR 01

Fração mm	Produto	%Massa		Teores (%)								OTR/ Fe ₂ O ₃	Distribuição no Ensaio (%)					Distribuição na Amostra (%)				
		ensalo	amostra	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Teores (%)	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	BaO		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅
-0,420+0,210	Flut.	16,9	1,4	3,10	2,66	2,30	66,6	8,60	0,43	7,60	6,70	1,17	8,4	4,6	1,4	92,6	10,4	0,4	0,3	0,1	10,6	0,9
	Magn.	18,7	1,6	1,40	27,9	53,6	0,28	3,13	0,26	3,15	2,22	0,05	4,6	54,9	38,0	0,5	4,4	0,2	3,6	3,3	0,1	0,4
	Fort. Magn.	29,1	2,5	7,47	8,01	28,2	0,38	16,4	1,20	13,7	13,5	0,93	36,9	24,5	31,1	1,0	33,8	1,6	1,6	2,7	0,1	3,1
	Frac. Magn.	31,7	2,8	8,40	4,41	22,3	1,33	18,4	1,28	16,9	16,6	1,90	46,2	14,7	26,9	3,7	44,1	1,9	1,0	2,3	0,4	4,0
	Não Magn.	4,6	0,4	6,40	2,83	14,5	5,67	20,7	1,48	19,5	16,9	2,26	5,1	1,4	2,6	2,3	7,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,7
Total		100,0	8,7	6,89	9,60	26,3	11,3	13,2	0,94	12,0	11,4	0,62	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,3	6,6	8,6	11,4	9,1
-0,210+0,149	Flut.	11,2	0,8	1,90	2,36	1,13	62,7	4,31	0,26	3,56	2,27	0,81	4,0	2,2	0,4	89,8	4,1	0,1	0,1	0,0	7,6	0,3
	Magn.	30,7	2,2	1,20	28,3	54,3	0,36	2,98	0,27	2,70	2,41	0,04	7,0	72,6	56,3	1,0	7,4	0,2	4,9	4,4	0,1	0,5
	Fort. Magn.	32,9	2,3	8,90	6,40	26,2	0,43	16,9	1,29	16,1	13,8	1,38	64,8	17,6	28,0	1,4	46,6	1,7	1,2	2,2	0,1	3,1
	Frac. Magn.	17,6	1,2	8,40	4,08	21,0	1,17	19,0	1,34	17,7	17,1	2,06	28,0	6,0	12,6	2,0	28,0	0,9	0,4	1,0	0,2	1,9
	Não Magn.	7,6	0,5	4,30	2,36	10,6	7,90	21,8	1,67	21,3	16,9	1,82	6,2	1,6	2,7	5,8	14,0	0,2	0,1	0,2	0,6	0,9
Total		100,0	7,1	6,28	11,9	28,6	10,3	11,9	0,89	16,9	9,76	0,44	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,1	6,7	7,8	8,4	6,6
-0,149+0,074	Flut.	7,9	1,0	1,80	0,93	1,00	88,4	3,77	0,16	1,81	1,07	1,72	2,5	0,6	0,2	86,9	2,7	0,1	0,1	0,0	10,6	0,3
	Magn.	43,2	5,6	1,20	28,7	56,9	0,09	2,33	0,26	2,09	1,87	0,04	10,2	86,0	73,3	0,6	9,1	0,6	12,8	11,6	0,1	1,0
	Fort. Magn.	36,9	4,8	10,6	4,90	20,1	0,22	18,9	1,33	16,6	16,6	2,14	76,3	12,4	22,6	1,0	63,2	4,2	1,9	3,6	0,1	7,1
	Frac. Magn.	9,1	1,2	6,40	2,86	13,4	2,11	26,5	1,78	24,6	11,8	1,89	9,7	1,8	3,7	2,4	21,1	0,6	0,3	0,6	0,3	2,4
	Não Magn.	2,9	0,4	2,40	1,26	1,88	26,9	16,1	1,26	13,2	16,2	1,90	1,4	0,2	0,2	9,2	3,9	0,1	0,0	0,0	1,1	0,4
Total		100,0	12,9	6,08	14,6	32,9	9,08	11,0	0,81	9,79	8,62	0,36	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,5	16,0	16,9	12,0	11,2
-0,074+0,037	Flut.	6,9	1,3	1,30	0,86	0,86	91,6	2,84	0,11	0,96	0,66	1,63	1,6	0,4	0,2	91,9	1,8	0,1	0,1	0,0	13,4	0,3
	Magn.	53,6	9,8	2,54	27,6	62,8	0,22	3,76	0,34	3,04	2,64	0,09	24,5	90,7	86,6	1,7	19,0	2,1	21,7	19,4	0,2	2,9
	Fort. Magn.	30,6	5,6	12,1	4,14	13,0	0,14	21,6	1,37	19,0	19,2	2,92	66,9	7,8	12,2	0,6	62,4	6,7	1,9	2,7	0,1	9,6
	Frac. Magn.	7,6	1,4	4,80	2,33	4,34	3,14	20,3	1,47	20,1	26,6	1,97	6,3	1,1	1,0	3,6	14,7	0,6	0,3	0,2	0,5	2,2
	Não Magn.	1,4	0,3	2,60	1,23	1,93	11,2	16,0	1,46	16,1	17,6	2,03	0,6	0,1	0,1	2,9	2,1	0,1	0,0	0,0	0,3	0,3
Total		100,0	18,4	6,54	16,3	32,6	6,84	10,6	0,74	9,26	9,48	0,34	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,6	23,9	22,4	14,6	16,3
-0,037+0,020	Flutuado	8,4	0,6	1,30	0,84	0,86	92,4	2,43	0,10	1,03	0,23	1,66	1,6	0,4	0,2	92,7	1,8	0,1	0,0	0,0	6,6	0,1
	Flut.	68,4	6,0	6,60	21,9	41,0	0,60	6,70	0,61	6,90	6,40	0,30	63,4	94,6	93,4	4,1	53,3	2,7	8,7	7,6	0,3	3,4
	Magn.	20,7	1,6	11,4	3,58	8,90	0,80	22,0	1,37	19,8	20,0	3,18	33,6	4,7	6,1	2,0	40,7	1,4	0,4	0,5	0,1	2,6
	Fort. Magn.	2,2	0,2	4,80	2,17	4,02	3,63	20,0	1,66	19,4	18,6	2,12	1,4	0,3	0,3	0,9	3,9	0,1	0,0	0,0	0,1	0,3
	Frac. Magn.	0,3	0,0	2,30	0,90	2,67	6,40	10,9	1,41	10,2	9,70	2,66	0,1	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total		100,0	7,3	7,02	16,8	30,0	6,38	11,2	0,76	9,36	8,97	0,44	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,3	9,2	8,2	7,1	6,4
Total +0,020	Flut.	9,3	5,1	1,96	1,69	1,32	82,6	4,78	0,23	3,36	2,66	1,22	3,2	1,1	0,4	90,7	3,9	0,8	0,6	0,3	48,5	1,9
	Magn.	44,6	24,2	2,86	26,8	61,3	0,26	4,38	0,37	3,69	3,16	0,11	22,4	84,1	73,7	1,4	16,9	5,8	61,7	46,3	0,7	8,2
	Fort. Magn.	30,8	16,8	10,4	6,20	18,6	0,30	19,2	1,32	17,0	16,9	2,00	66,9	11,3	18,6	1,1	62,2	14,6	7,0	11,7	0,6	26,4
	Frac. Magn.	12,4	6,7	7,00	3,59	16,4	1,87	20,2	1,42	19,1	17,7	1,96	15,4	3,1	6,6	2,7	22,0	3,9	1,9	4,1	1,5	10,7
	Não Magn.	2,9	1,6	4,08	2,02	8,06	12,0	18,9	1,46	17,8	16,4	2,01	2,1	0,4	0,8	4,1	4,9	0,5	0,3	0,5	2,2	2,4
Total		100,0	54,3	6,66	14,2	30,9	8,51	11,4	0,81	10,1	9,63	0,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	26,6	61,6	62,9	53,6	48,6

O produto *flutuado total +0,020 mm* corresponde a 9,3% em peso de material (5,1% em relação a amostra inicial), com tendência à diminuição para os finos; apresenta um teor médio de OTR de 1,95%, o que corresponde a 3,2% do total contido no ensaio (0,8% do total da amostra inicial).

O teor de SiO₂ junto a esse produto é de 82,5% (variando entre 65,5 e 92,4%, com tendência a elevação para os finos) e o teor médio de P₂O₅ é de 4,8%, o que corresponde a 3,9% do P₂O₅ total contido no ensaio (1,9% em relação ao total da amostra). Junto a esse produto, os teores de P₂O₅ variam entre 2,4% (-0,037+0,020 mm) e 8,6% (-0,420+0,210 mm), com tendência a decréscimo para os finos.

O produto afundado *magnético total +0,020 mm (4,1 KGauss)* corresponde a 44,5% em peso (24,2% em relação a amostra total), com tendência geral a aumento para os finos. Este produto apresenta teor médio de 2,85% de OTR (o que corresponde a 22,4% do OTR do contido no ensaio; 5,8% do total da amostra); no intervalo granulométrico, os teores de OTR variam entre 1,2% (-0,210+0,074 mm) e 6,5% (fração -0,037+0,020 mm), enquanto que os teores de Fe₂O₃ variam entre 21,9% (fração -0,037+0,020 mm) e 28,7% (-0,149+0,074 mm), com valor médio de 26,8% (84,1% do total contido no ensaio; 51,7% do total da amostra); o teor médio de TiO₂ é de 51,3% (variando entre 41,0 e 55,9%), o que corresponde a 73,7% do total contido no ensaio (46,3% do total contido na amostra).

Os teores de P₂O₅ associados a esse produto variam entre 2,3% e 8,7%, com média de 4,3% (o que corresponde a 17,0% do P₂O₅ do ensaio; 8,2% do total contido na amostra); teores de CaO são baixos, estando compreendidos entre 0,3% e 0,6% (elevando-se para os finos).

O produto *afundado fortemente magnético total +0,020 mm (6,8 KGauss)* corresponde a 30,8% em peso no ensaio, o que significa 16,8% em peso em relação a amostra inicial. De modo geral, a proporção em peso deste produto aumenta para os finos até 0,074 mm. Este produto apresenta teor médio de 10,4% de OTR (o que corresponde a 56,9% do OTR do ensaio; 14,6% do total contido na amostra); no intervalo granulométrico, os teores de OTR variam entre 7,5% (-0,420+0,210 mm) e 12,1% (-0,074+0,037 mm); os teores de Fe₂O₃ variam entre 3,6% (-0,037+0,020 mm) e 8,0% (-0,420+0,210 mm), com valor médio de 5,2%; o teor médio de TiO₂ é de 18,6% (variando entre 8,8% e 28,2%, diminuindo consideravelmente para os finos), o que corresponde a 18,6% do total contido no ensaio (11,7% do total contido na amostra).

Este produto apresenta teor médio de P₂O₅ de 19,2%, o que significa 52,2% do total contido no ensaio (25,4% em relação a amostra). Ao longo do intervalo granulométrico, os teores de P₂O₅ associados a esse produto variam entre 15,4% e 22,0%, com aumento para os finos.

O produto *afundado fracamente magnético total +0,020 mm (10,8 KGauss)* corresponde a 12,4% em peso no ensaio, o que significa 6,7% em peso em relação a amostra inicial; sua proporção em peso diminui para os finos. Este produto apresenta teor médio de 7,0% de OTR (o que corresponde a 15,4% do OTR do ensaio; 3,9% do total contido na amostra); acima de 0,149 mm, os teores de OTR são constantes e iguais a 8,4%, diminuindo para os finos abaixo dessa fração; os teores de Fe₂O₃ variam entre 2,2% (-0,037+0,020 mm) e 4,4% (fração -0,420+0,210 mm), com valor médio de 3,6%; o teor

médio de TiO_2 é de 16,4% (variando entre 4,0% e 22,3%, diminuindo para os finos), o que corresponde a 6,6% do total contido no ensaio (4,1% do total contido na amostra).

Este produto apresenta teor médio de P_2O_5 de 20,2%, o que significa 22,1% do total contido no ensaio (10,7% em relação a amostra). Ao longo do intervalo granulométrico, os teores de P_2O_5 associados a esse produto variam entre 18,4% e 25,5%, com aumento para os finos até 0,074 mm.

O produto *afundado não magnético total +0,020 mm* corresponde a 2,9% em peso no ensaio (variando entre 0,3 e 7,6% no ensaio, com tendência geral à diminuição para os finos), o que significa 1,6% em peso em relação a amostra inicial. Este produto apresenta teor médio de 4,08% de OTR (o que corresponde a 2,1% do OTR do ensaio; 0,5% do total contido na amostra).

No intervalo granulométrico, os teores de OTR situam-se entre 2,3% (fração -0,037+0,020 mm) e 6,4% (-0,420+0,210 mm), diminuindo para os finos. Os teores de Fe_2O_3 (com valor médio de 2,0%) variam entre 0,9 e 2,8% (com a mesma tendência evidenciada pelos OTR); o teor médio de TiO_2 é de 8,1% (variando entre 1,9% e 14,5%, com tendência à diminuição para os finos), o que corresponde a 0,8% do total contido no ensaio (0,5% do total contido na amostra).

Este produto apresenta teor médio de P_2O_5 de 18,9% (o que corresponde a 4,9% do P_2O_5 total do ensaio; 2,4% do total contido na amostra); ao longo do intervalo granulométrico considerado, os teores de P_2O_5 variam entre 10,9% (-0,037+0,020 mm) e 21,8% (na fração -0,210+0,149 mm), com tendência geral à diminuição para os finos.

7.1.5 Estimativa da composição mineralógica da amostra TR 01 - Lagoa Seca

A estimativa da composição mineralógica da amostra TR 01 está exposta na Tabela 37.

A amostra é constituída predominantemente por ilmenita, monazita e fosfato secundário (gorceixita) e, secundariamente, por anatásio, quartzo, argilominerais, niobatos (bário pirocloro), zircão e apatita, com quantidades menores de barita e óxidos-hidróxidos de ferro (traços de magnetita, hematita e goethita).

As terras raras ocorrem essencialmente sob a forma de monazita. Estima-se que a monazita represente mais de 90% dos OTR presentes na amostra estudada.

Para os finos naturais (-0,020 mm), a monazita representa cerca de 34% em peso da fração, o que corresponde a cerca de 72,6% do total de monazita contida na amostra total. Conteúdos elevados de ilmenita (da ordem de 25% em peso) e de fosfato secundário

(cerca de 12%), além de quartzo, anatásio (respectivamente 8 e 7%), com quantidades menores de niobatos (4%), argilominerais (3%), zircão (2%), apatita e barita (cada um ao redor de 1%) também estão presentes.

Tabela 37 - Estimativa da composição mineralógica - Amostra TR 01

Produto	Fração mm	% Massa		Mineralogia (%)											Distrib. monazita (%)		
		ensaio	amostra	monazita	apatita	fosf.sec.	barita	ilmenita	anatásio	óx. ferro	quartzo	argilom.	zircão	niobatos	outros	ensaio	amostra
Moagem/Atrição	-0,420+0,210	16,0	8,7	9	2	29	1	17	16	2	10	6	5	2	2	14,7	4,0
	-0,210+0,149	12,1	7,1	8	2	26	1	24	15	1	9	5	4	2	2	10,7	2,9
	-0,149+0,074	22,1	12,9	8	2	24	1	32	14	<0,5	8	4	4	2	3	18,7	5,1
	-0,074+0,037	31,5	18,4	9	1	22	1	36	11	<0,5	7	6	3	3	3	29,1	8,0
	-0,037+0,020	12,5	7,3	11	1	22	1	36	9	<0,5	8	7	2	3	1	14,6	4,0
	-0,020	6,8	3,9	17	2	27	1	24	13	<0,5	7	2	2	2	3	12,2	3,3
Total	100,0	68,3	58,3	9	2	24	1	30	13	<0,5	8	5	3	3	2	100,0	27,4
Total Moagem/Atrição		100,0	68,3	9	2	24	1	30	13	<0,5	8	5	3	3	2		27,4
Fines Naturais	-0,020		41,7	34	1	12	1	26	7	<0,5	8	3	2	4	3		72,6
Total Calc.			100,0	20	1	19	1	28	10	<0,5	8	4	3	3	3		100,0

A proporção de monazita até 0,020 mm, para o produto moído e atricionado, varia entre 8 e 11% em peso, atingindo cerca de 17% na fração -0,020 mm. Nos ensaios de separação mineral efetuados até 0,020 mm, para esse produto, a monazita concentra-se no produto afundado fortemente magnético, onde corresponde a cerca de 16% em peso (57% do total contido no ensaio) e no produto fracamente magnético, onde perfaz aproximadamente 11% em peso do produto (cerca de 15% do total contido no ensaio).

Os fosfatos secundários (alumino fosfatos) distribuem-se basicamente pelos produtos não magnético e fracamente magnético (onde correspondem a cerca de 47-48% em peso de cada produto) e no fortemente magnético (cerca de 40% em peso do produto); no produto magnético, os fosfatos secundários perfazem aproximadamente 8% em peso desse produto. Nesta amostra ocorrem dois tipos básicos de fosfato secundário:

- o mais freqüente, representado por um alumino-fosfato de bário, podendo conter pequenas proporções de cálcio e/ou de ferro;
- o mais raro, representado igualmente por um alumino-fosfato de bário, com algum conteúdo ou não de cálcio e/ou de ferro, mas que apresenta pequena parcela de óxidos de terras raras associada.

A ilmenita presente no produto afundado concentra-se predominantemente no produto fortemente magnético, onde constitui cerca de 59% em peso.

O anatásio ocorre disseminado por todos os produtos obtidos, concentrando-se predominantemente nos produtos magnético e no fracamente magnético, onde

corresponde a cerca de 15-16% em peso de cada produto e no fortemente magnético onde representa aproximadamente 12% em peso.

Niobatos estão preferencialmente associados ao produto não magnético, no qual correspondem a 10% em peso.

7.1.6 Características da monazita e partição dos ETR

Os principais aspectos de associação da monazita com os minerais de ganga presentes estão expostos nas Fotos 18 à 22, obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

A monazita ocorre na forma de agregados, microscritalina, com cristalitos da ordem de poucos micra, normalmente associada aos fosfatos secundários. É rara a presença de agregados de monazita livre acima de 0,037 mm.

Os estudos efetuados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), acoplada à espectrômetro de raios X por energia dispersiva (EDS), indicam que a maior parcela dos ETR contidos na amostra estão associados à monazita, onde constituem parcela da ordem de 90 a 95% e o restante está associado aos fosfatos secundários.

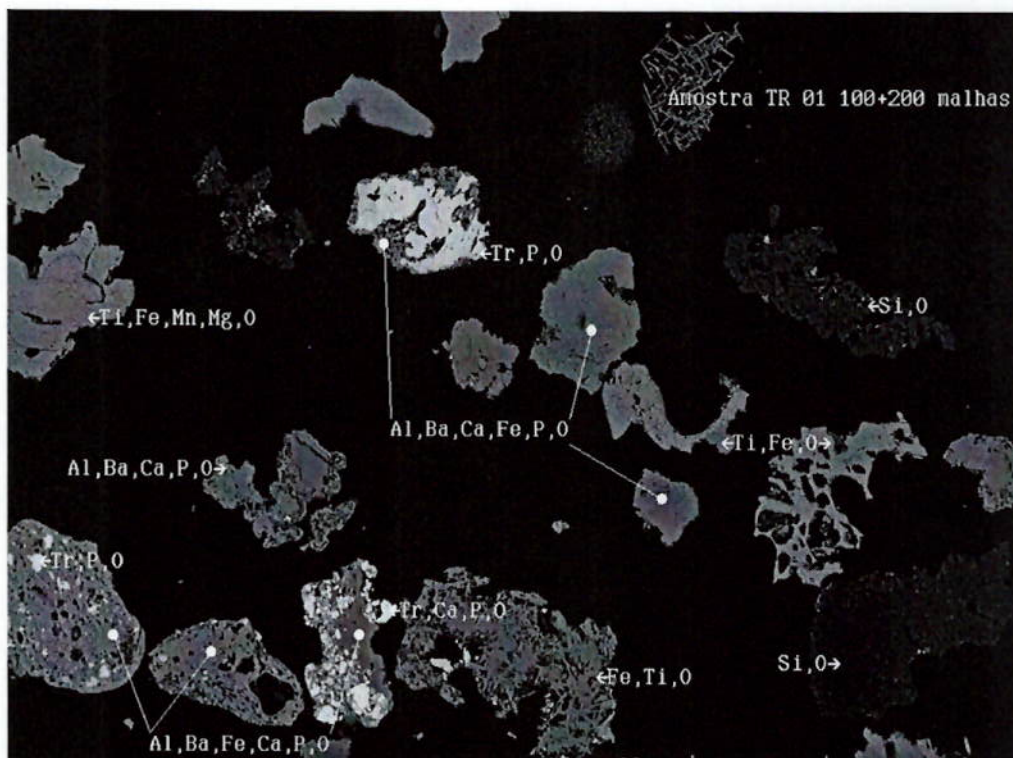


Foto 18 - Aspecto geral. Observa-se monazita intimamente associada à fosfato secundário (gorceixita; MEV, elétrons retroespalhados)

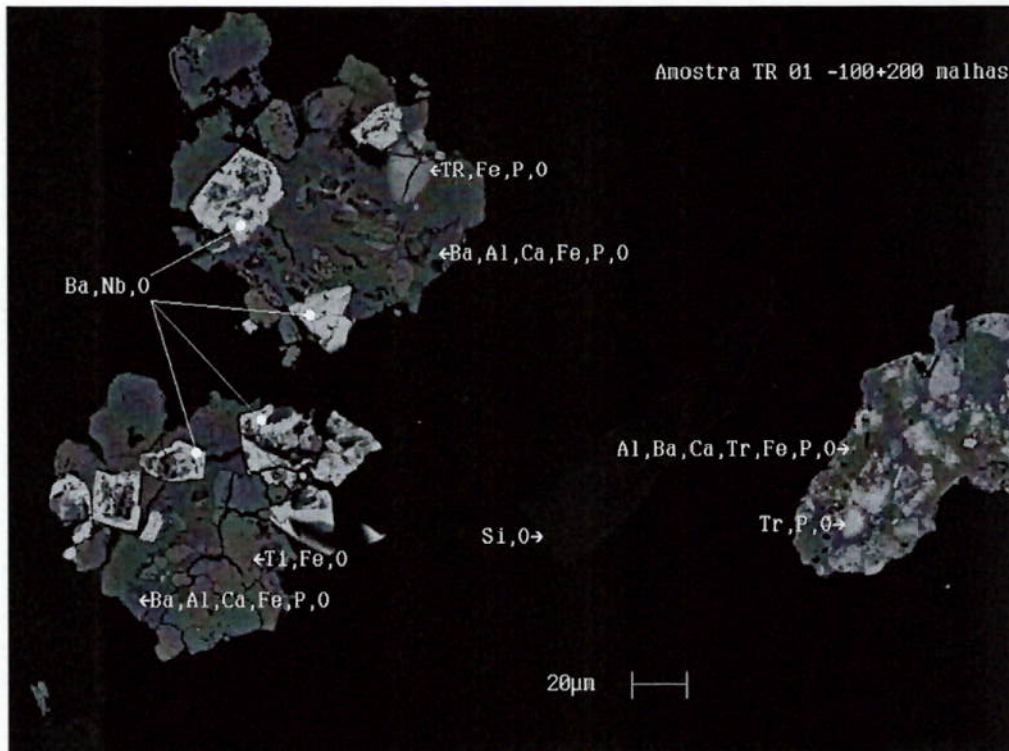


Foto 19 - À direita, monazita associada à fosfato secundário. À esquerda, grãos mistos de Ba-pirocloro e fosfato secundário (MEV, elétrons retroespalhados)

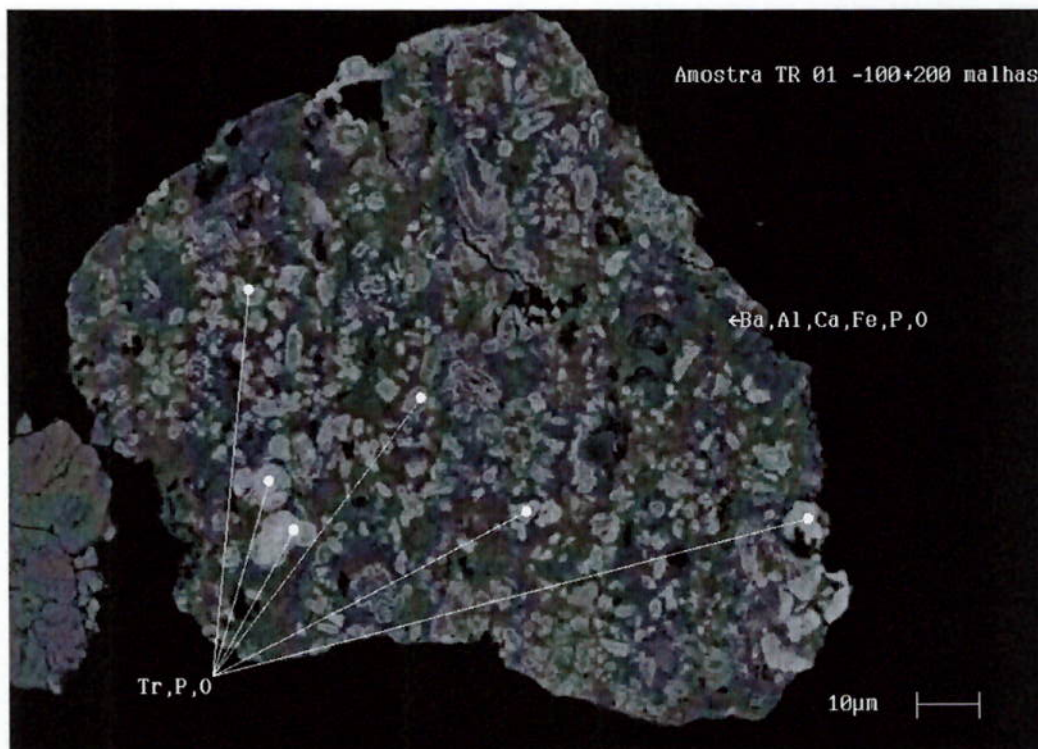


Foto 20 - Inclusões diminutas de monazita colorforme em grão de fosfato secundário (MEV, elétrons retroespalhados)

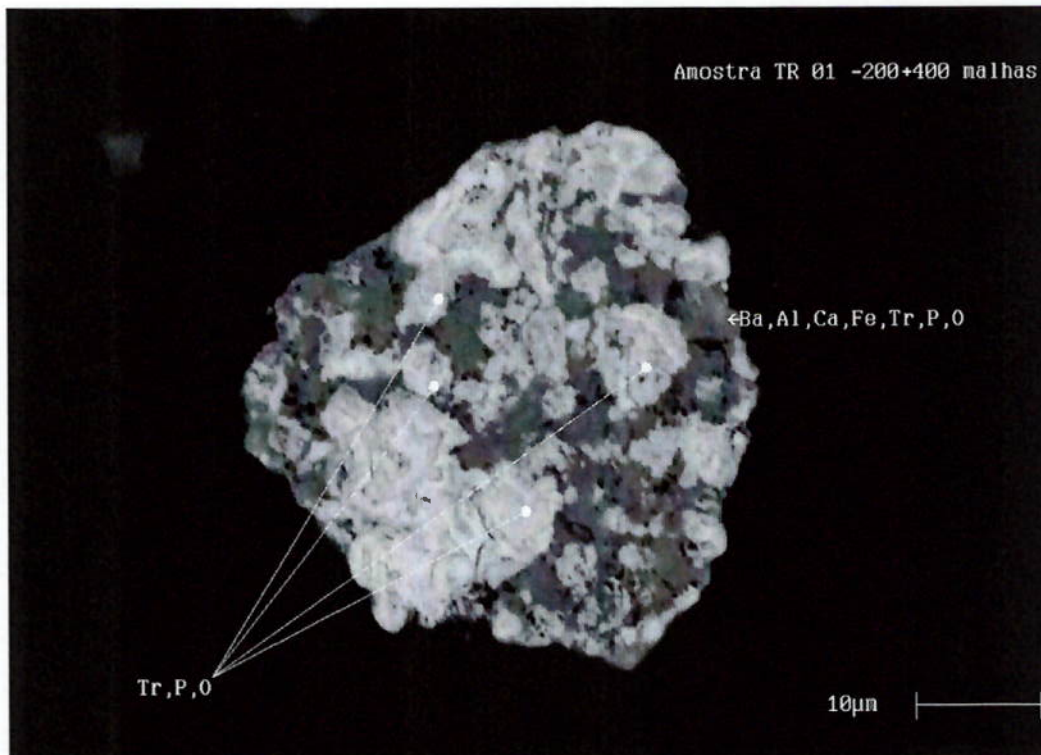


Foto 21 - Monazita colorforme mista com fosfato secundário. (MEV, elétrons retroespalhados)

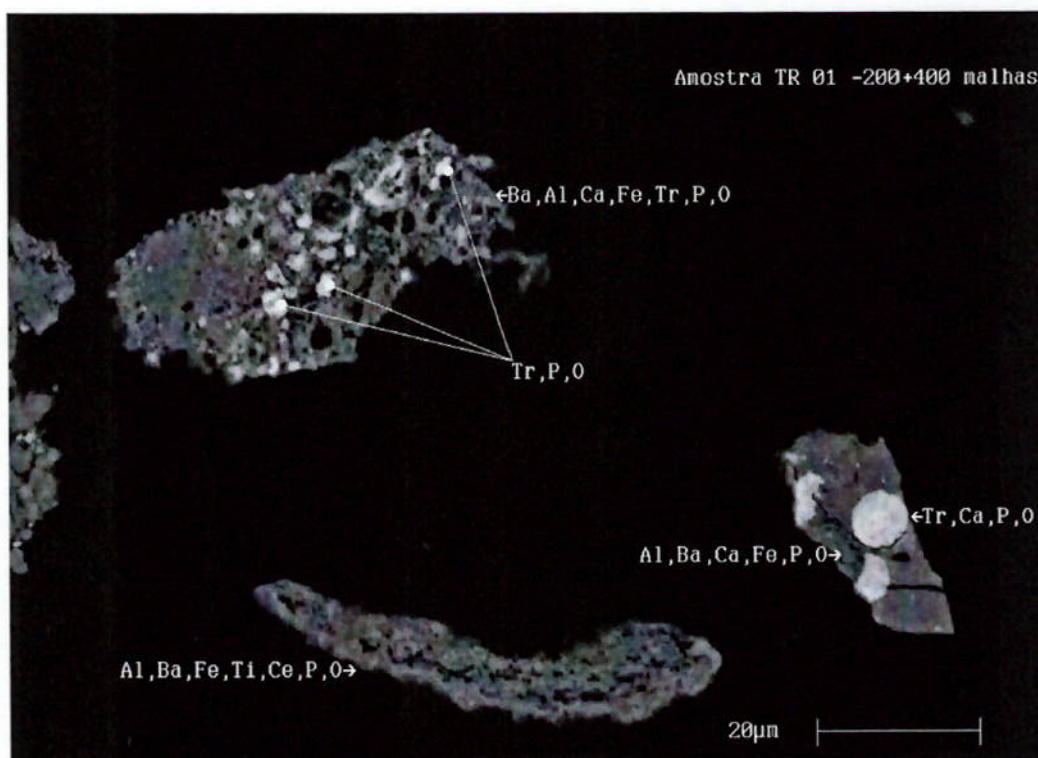


Foto 22 - Inclusões de monazita, de dimensões variadas, em grãos de fosfato secundário (MEV, elétrons retroespalhados)

7.1.7 Ensaio padrão na amostra TR 01 (Lagoa Seca)

A caracterização e o processamento da amostra TR 01 (Lagoa Seca) indicou que a monazita apresenta feições algo distintas das assinaladas para a área do Córrego do Garimpo. O produto obtido, correspondente à fração -0,020 mm (finos naturais) apresenta elevado teor de OTR (21,2%), aliado a recuperação de 70,8% e relação OTR / Fe₂O₃ de 2,0. A fração retida em 0,020mm, após atrição e deslamagem, atinge teor de OTR muito inferior ao verificado para as amostras da área do Córrego do Garimpo (10,8% para o produto -0,020 mm), indicando que este material responde de forma distinta ao processo desenvolvido e apresentado no item 6, conforme exposto na Tabela 38.

Tabela 38 - Características dos produtos finais da amostra TR 01 - Lagoa Seca

Produto	% Massa	Teores (%)						OTR / Fe ₂ O ₃	Recuper. OTR (%)
		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
alimentação	100,0	12,5	12,6	26,5	13,3	8,43	9,40	0,99	100,0
-0,020mm (natural)	41,7	21,2	10,6	21,0	14,9	8,70	7,50	2,00	70,8
-0,020 mm (após atrição e deslamagem)	4,0	10,8	10,6	27,7	15,1	7,70	11,4	1,02	3,6

7.1.8 Conclusões

Esta amostra é constituída essencialmente por ilmenita, monazita, fosfatos secundários (alumino-fosfatos: gorceixita e/ou goiazita) e, secundariamente, por anatásio, quartzo, argilominerais, niobatos (bário pirocloro), zircão e apatita, além de quantidades menores de barita e óxidos-hidróxidos de ferro.

As terras raras ocorrem essencialmente sob a forma de monazita. Estima-se que a monazita represente mais de 90% dos OTR presentes na amostra estudada, estando o restante associado a fosfatos secundários.

A monazita ocorre na forma de agregados, microcristalina, com cristalitos da ordem de poucos micra, normalmente associada a fosfatos secundários. É rara a presença de agregados de monazita com granulação superior a 0,037 mm.

Os OTR estão associados predominantemente à fração -0,020 mm natural, que apresenta teor de 21,2% e recuperação de 70,8% do total de OTR contidos na amostra.

Para a fração total +0,020 mm, após moagem e atrição, os ensaios de separação mineral efetuados não lograram a obtenção de teores elevados de OTR (teor médio de 10,4% OTR, aliada a recuperação de 14,6% sobre a amostra no *produto afundado fortemente magnético*).

7.2. Amostras volumétricas da região da Lagoa Seca

Quatro amostras volumétricas adicionais, coletadas por canaleta na região da Lagoa Seca e correspondentes à diferentes níveis da mineralização, foram estudadas em caráter preliminar e submetidas ao ensaio padrão desenvolvido para a área do Córrego do Garimpo.

7.2.1 Composição química

A composição química dessas amostras é apresentada na Tabela 39.

As amostras apresentam diferenças significativas quanto à sua composição química. A amostra correspondente ao *nível com apatita* é a que mostra o mais baixo teor de OTR (4,12%), enquanto que a do *nível com monazita*, o mais alto (39,8%). A amostra correspondente ao *nível superior* tem o teor mais elevado de Fe_2O_3 (11,3%) e a do *nível com apatita*, o mais baixo (3,09%, valor semelhante ao encontrado para a amostra do *nível com monazita*, que é de 3,30%). A amostra do *nível superior* tem um conteúdo de TiO_2 bastante elevado, de 23,8%, enquanto que, para as amostras dos *níveis com monazita e com apatita*, esse teor está compreendido entre 5,51 e 5,75%. O teor de CaO para a amostra do *nível com apatita* é de 41,9% e para a do *nível inferior* é de 22,9%, mantendo-se entre 2,5 e 2,8% nas demais.

Tabela 39 - Composição química das amostras volumétricas estudadas - Lagoa Seca

Amostra	Teores (%)							OTR / Fe_2O_3
	OTR	Fe_2O_3	TiO_2	SiO_2	P_2O_5	CaO	Al_2O_3	
<i>Nível inferior</i>	9,58	6,13	10,5	3,94	24,3	22,9	5,33	1,56
<i>Nível superior</i>	15,4	11,3	23,8	1,76	14,0	2,55	7,99	1,36
<i>Nível com monazita</i>	39,8	3,30	5,51	3,31	20,2	2,80	4,21	12,1
<i>Nível com apatita</i>	4,12	3,09	5,75	0,50	33,7	41,9	2,87	1,33

7.2.2 Ensaio padrão

Os resultados obtidos no ensaio padrão, para as amostras correspondentes aos diferentes níveis da mineralização, estão expostos na Tabela 40.

Tabela 40 - Resultados obtidos no ensaio padrão para os diferentes níveis da mineralização - Lagoa Seca

Amostra	%Massa	Teores (%)							Relação	Recuperação (%)	
		OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Al ₂ O ₃	OTR/ Fe ₂ O ₃	OTR	Fe ₂ O ₃
Nível inferior											
Alimentação	100,0	9,58	6,13	10,5	3,94	24,3	22,9	5,33	1,56	100,0	100,0
Under	76,6	6,91	6,51	11,1	4,10	24,8	25,3	5,14	1,06	55,3	81,4
Finos Naturais	13,1	19,8	5,26	9,62	3,58	20,9	11,1	6,47	3,76	27,0	11,2
1a Atrição	7,0	16,6	4,62	7,53	2,95	24,9	19,8	5,48	3,59	12,1	5,3
2a Atrição	3,3	16,1	3,99	6,46	4,04	24,7	20,5	4,98	4,04	5,6	2,2
Finos Naturais+1 Atrição	20,1	18,7	5,04	8,89	3,36	22,3	14,1	6,12	3,71	39,1	16,5
Finos Naturais+2 Atrições	23,4	18,3	4,89	8,55	3,45	22,6	15,1	5,96	3,74	44,7	18,6
Nível superior											
Alimentação	100,0	15,4	11,3	23,8	1,76	14,0	2,55	7,99	1,36	100,0	100,0
Under	68,9	11,2	12,6	26,7	2,29	12,6	3,03	8,07	0,89	50,3	76,3
Finos Naturais	20,4	24,4	8,83	18,0	0,53	16,9	1,45	7,66	2,76	32,4	15,9
1a Atrição	7,62	24,6	8,30	16,0	0,59	17,3	1,53	8,28	2,97	12,2	5,6
2a Atrição	3,02	25,8	8,21	17,5	0,82	17,1	1,54	7,52	3,14	5,06	2,2
Finos Naturais+1 Atrição	28,1	24,5	8,69	17,4	0,54	17,0	1,47	7,83	2,82	44,6	21,5
Finos Naturais+2 Atrições	31,1	24,6	8,64	17,4	0,57	17,0	1,48	7,80	2,85	49,7	23,7
Nível com monazita											
Alimentação	100,0	39,8	3,30	5,51	3,31	20,2	2,80	4,21	12,1	100,0	100,0
Under	61,3	36,6	4,25	6,92	4,82	19,4	3,34	4,34	8,62	56,4	78,9
Finos Naturais	24,9	44,6	1,84	3,58	0,92	21,5	1,83	4,30	24,3	27,8	13,8
1a Atrição	9,56	44,4	1,80	3,12	0,87	21,2	2,09	3,57	24,7	10,7	5,2
2a Atrição	4,34	46,9	1,55	2,09	1,10	21,3	2,22	3,24	30,4	5,12	2,0
Finos Naturais+1 Atrição	34,41	44,5	1,83	3,45	0,90	21,4	1,90	4,09	24,4	38,5	19,0
Finos Naturais+2 Atrições	38,75	44,8	1,79	3,30	0,93	21,4	1,94	4,00	25,0	43,6	21,1
Nível com apatita											
Alimentação	100,0	4,12	3,09	5,75	0,50	33,7	41,9	2,87	1,33	100,0	100,0
Under	94,6	3,62	2,65	4,59	0,49	34,8	43,9	2,74	1,37	83,1	81,2
Finos Naturais	2,74	13,7	10,8	27,6	0,68	14,7	6,60	4,66	1,27	9,08	9,5
1a Atrição	1,92	12,6	11,0	25,4	0,42	16,2	9,25	5,33	1,14	5,88	6,9
2a Atrição	0,76	10,5	9,8	21,1	0,40	18,0	12,6	6,11	1,07	1,93	2,4
Finos Naturais+1 Atrição	4,66	13,2	10,9	26,7	0,57	15,3	7,69	4,94	1,22	15,0	16,4
Finos Naturais+2 Atrições	5,42	12,9	10,7	25,9	0,55	15,7	8,38	5,10	1,20	16,9	18,8

As características dos produtos finais dos produtos passíveis de serem obtidos, considerando dois estágios de atrição e deslamagem estão expostos na Tabela 41.

Tabela 41 - Características dos produtos finais - Lagoa Seca

Amostra	%OTR	%	Teores (%)							OTR	Recup.
	Aliment	Massa	OTR	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	/Fe ₂ O ₃	OTR(%)
nível inferior	9,58	23,4	18,3	4,89	8,55	22,6	15,1	3,45	5,96	3,74	44,7
nível superior	15,4	31,1	24,6	8,64	17,4	17,0	1,48	0,57	7,80	2,85	49,7
nível com monazita	39,8	38,8	44,8	1,79	3,30	21,4	1,94	0,93	4,00	25,0	43,6
nível com apatita	4,12	5,4	12,9	10,7	25,9	15,7	8,38	0,55	5,10	1,20	16,9

À exceção do nível com apatita, onde o teor de OTR alcançado é inferior a 13% (embora com uma razão de enriquecimento da ordem de 3,1), todos os demais níveis atingiram teores expressivos de terras raras, porém com recuperações inferiores às anteriormente obtidas. Isto se deve ao fato da monazita apresentar-se menos friável e mais bem cristalizada que a observada nas amostras da área do Córrego do Garimpo.

A característica apresentada pela monazita da área da Lagoa Seca pode estar relacionada à gênese deste depósito, que inclui processos hidrotermais mais intensos, aliados a um certo transporte e sedimentação (*"deposição de sedimentos na base de uma chaminé ou duto hidrotermal"*, segundo as teorias mais recentes sobre a formação do depósito da Lagoa Seca).

O produto obtido a partir do nível inferior permanece com teores elevados de CaO (15,1%), Al₂O₃ (5,96%) e TiO₂ (8,55%), indicativos da presença de apatita, alumino-fosfatos, ilmenita e anatásio.

O produto gerado a partir do nível superior tem teor bastante elevado de TiO₂ (17,4%) e secundariamente de Al₂O₃ (7,80%) e Fe₂O₃ (8,64%), relacionados a alumino-fosfatos, ilmenita e anatásio.

Para o produto obtido a partir do nível com monazita, observa-se um teor residual de Al₂O₃ (4,0%) na forma predominante de alumino-fosfatos, enquanto que o produto referente ao nível com apatita permanece com teores muito elevados de TiO₂ (25,9%), além de Fe₂O₃ (10,7%) e CaO (8,4%), indicativos da presença de anatásio, ilmenita e apatita.

7.2.3 Características da monazita

A monazita presente nestas amostras mostra diferenças significativas quando comparada à proveniente do depósito do Córrego do Garimpo. Ela encontra-se melhor cristalizada, formando agregados na forma de concreções; apresenta-se menos friável, o que lhe confere maior resistência à fragmentação ou quebra, motivo pelo qual o processo

aplicado a área do Córrego do Garimpo não alcançou os mesmos resultados (Fotos 23 a 28).

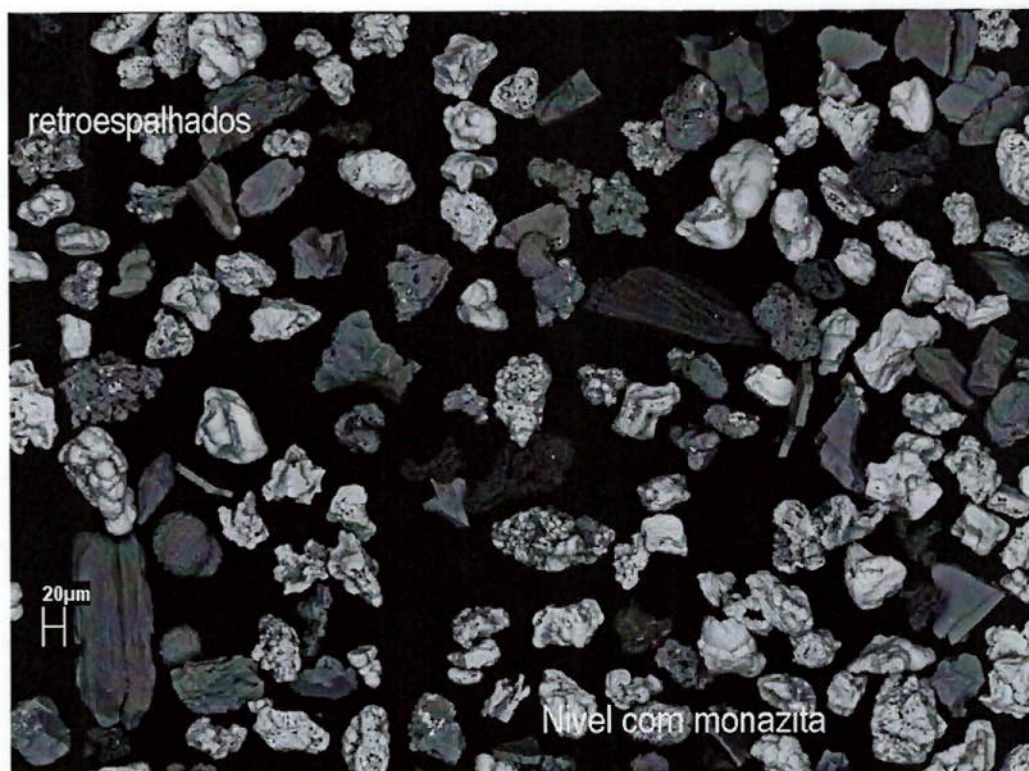


Foto 23 - Agregados de monazita (grãos claros) apresentando, essencialmente, aspecto concrecionar (MEV, elétrons retroespalhados).

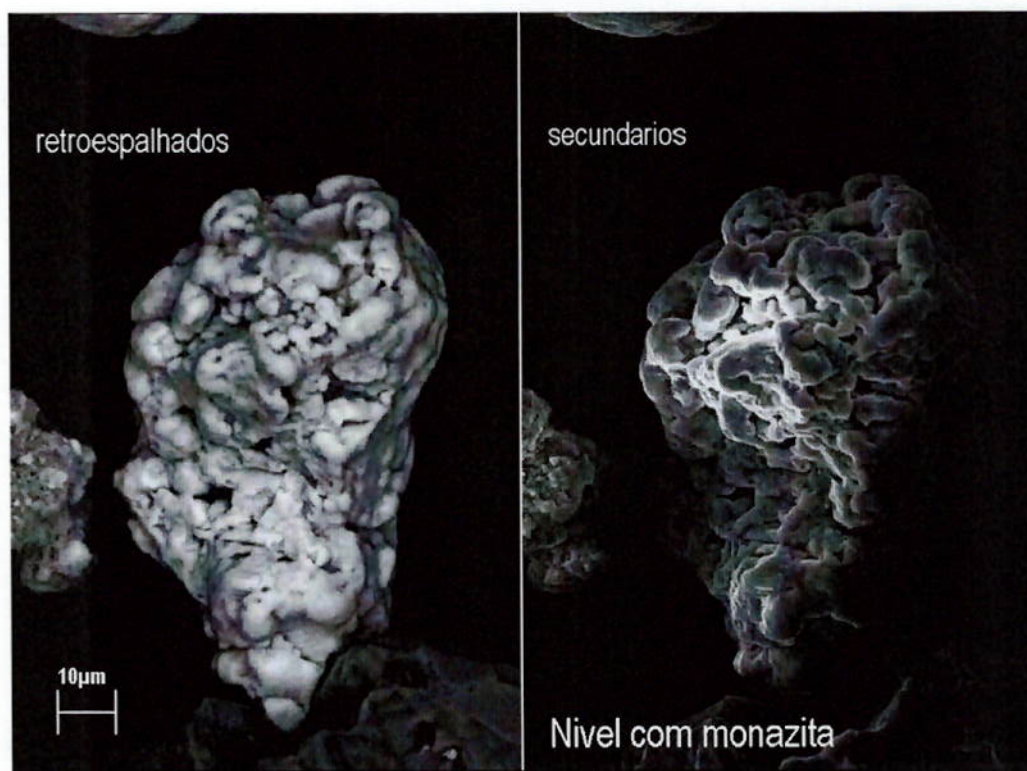


Foto 24 - Detalhe de agregado de monazita concrecionar; imagem de elétrons retroespalhados à esquerda e de secundários, à direita, onde é ressaltado o aspecto de superficial do mesmo (MEV).

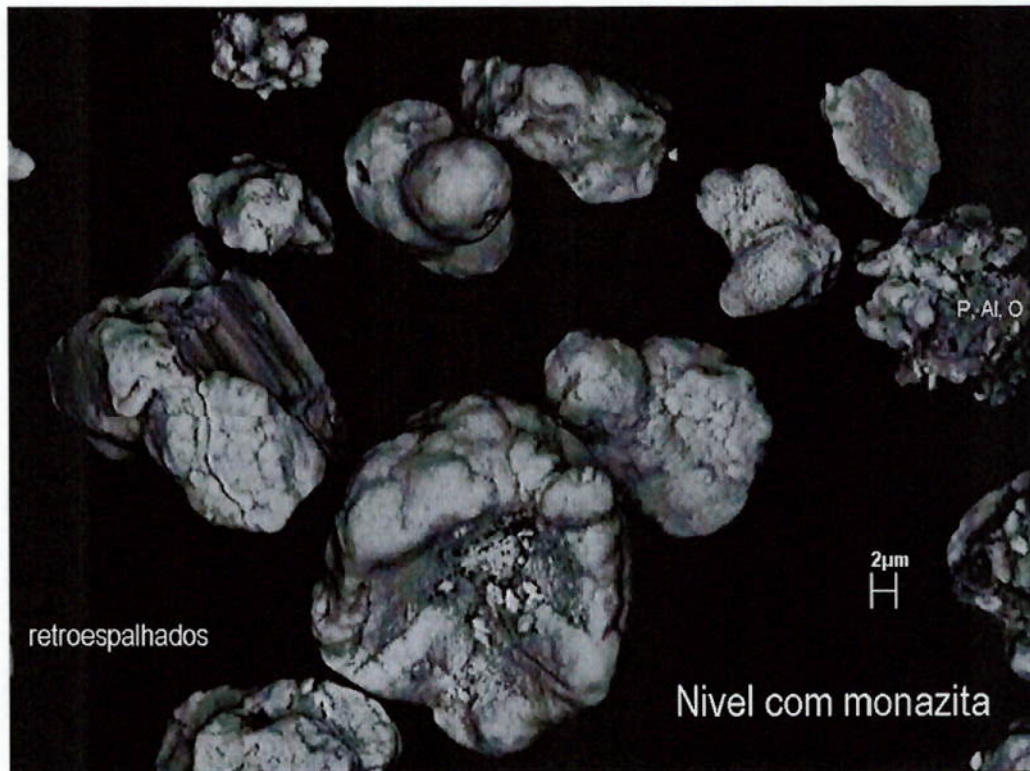


Foto 25 - Agregados concrecionares/globulares de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).

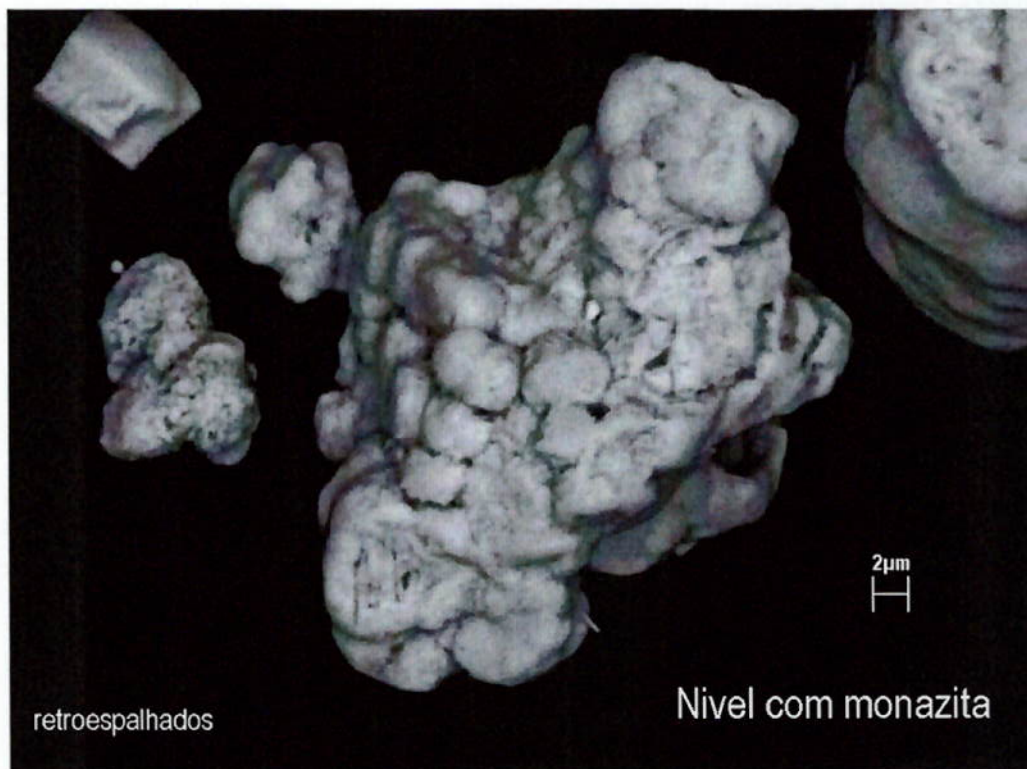


Foto 26 - Detalhe de agregados concrecionares/globulares de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).

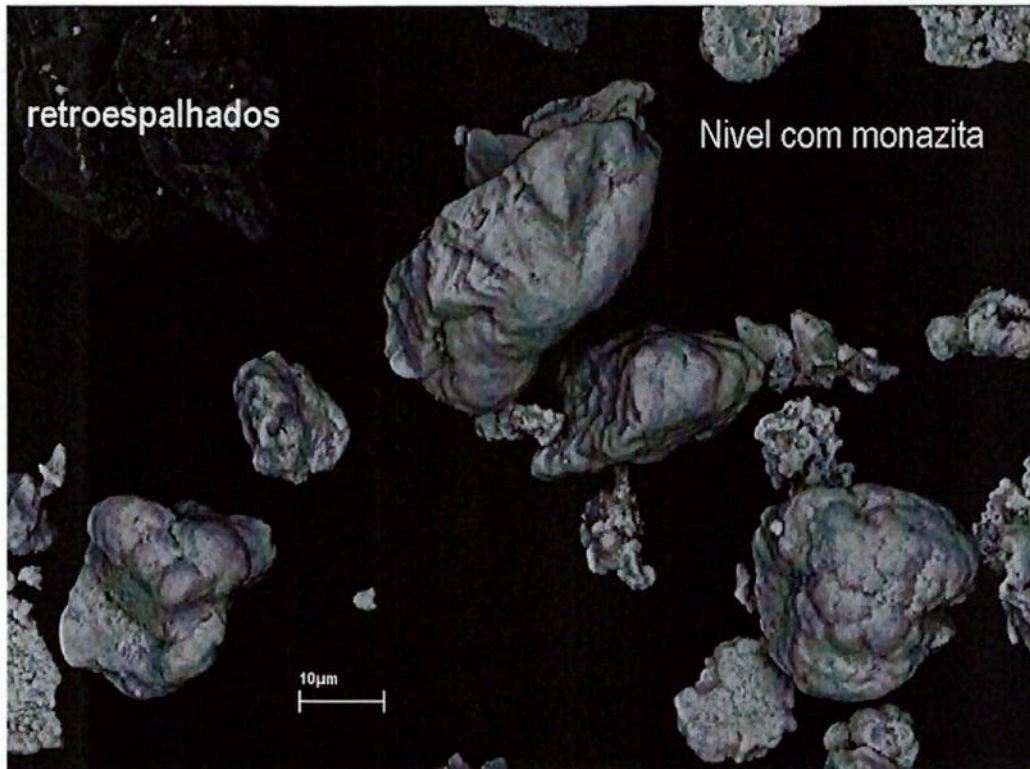


Foto 27 - Agregados concrecionares/globulares de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).

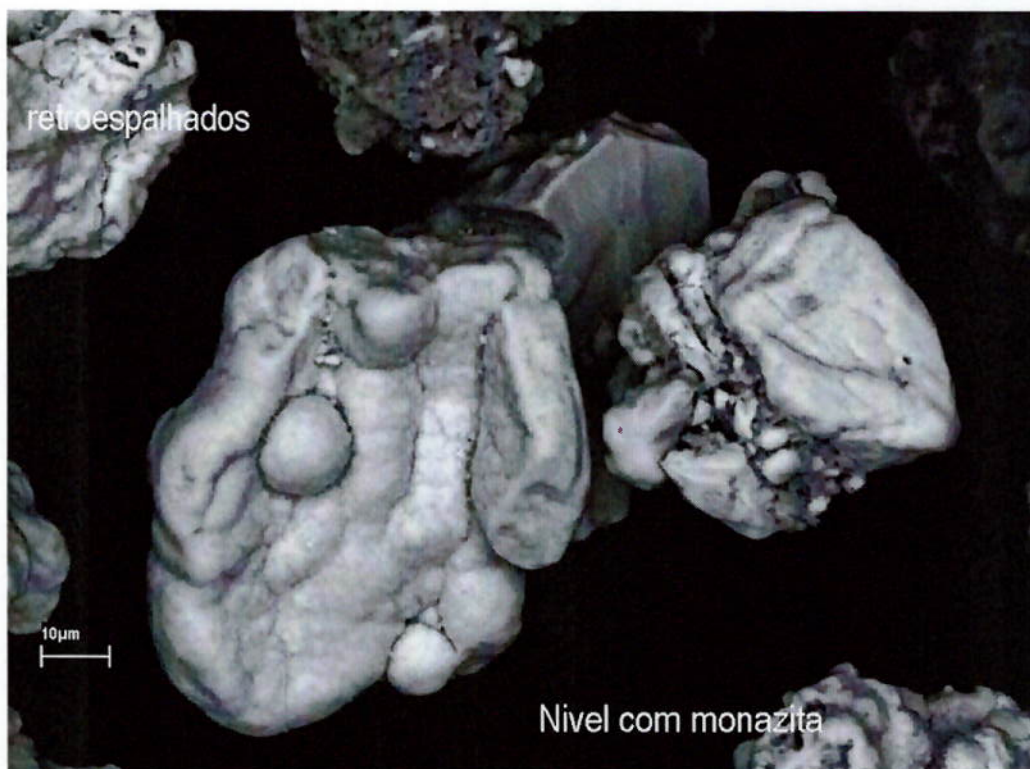


Foto 28 - Detalhe de agregado concrecionar/globular de monazita (MEV, elétrons retroespalhados).

8. Conclusões

8.1. Córrego do Garimpo

O depósito do Córrego do Garimpo representa um importante recurso de terras raras, com reserva estimada em 1,12 Mt, para um teor médio de 7,6% OTR.

A viabilização do aproveitamento dos ETR associados ao depósito de Catalão I depende, essencialmente, do equacionamento da etapa de concentração física, sendo de fundamental importância uma elevação nos teores de ETR de alimentação do processo químico.

Inúmeros trabalhos de concentração por rotas físicas foram efetuados sobre este material, desde a década de 70. No entanto, todas as tentativas de utilização de procedimentos convencionais de enriquecimento das terras raras não obtiveram bons resultados, uma vez que os minerais presentes encontravam-se intimamente relacionados e possuíam granulção fina.

Rotas químicas também foram testadas (tanto clorídricas como sulfúricas, com abertura direta da monazita) e embora tecnicamente viáveis, mostraram custos elevados, indicando a necessidade de uma etapa prévia de pré-concentração dos minerais portadores de terras raras.

Por outro lado, estes recursos de ETR encontram-se na área de influência da lavra de fosfato e atualmente estão preservados "in situ", sendo que a cava já os expôs em uma frente de lavra. Para a evolução da mina, far-se-á necessária a remoção de parte deles e, em não havendo condições técnico-econômicas de concentração, serão incorporados aos rejeitos (mina e bacia de sedimentação).

Permanece, portanto, um desafio tecnológico para o aproveitamento do material mineralizado.

O material saprolítico estudado é constituído por óxidos-hidróxidos de ferro (predominantemente goethita, além de magnetita e hematita), argilominerais (clorita, vermiculita e hidrobiotita), apatita, monazita, quartzo e ilmenita, com quantidades menores de anatásio, alumino-fosfato (gorceixita), barita e zircão.

Monazita é o principal portador de ETR, sendo raros outros minerais contendo esses elementos. Ocorre microcristalina, com cristalitos da ordem de poucos micra, sob a forma de agregados, por vezes coliformes, normalmente associada a óxidos-hidróxidos de ferro, apatita e quartzo. Como característica marcante apresenta-se bastante friável, o

que lhe confere tendência natural à desagregação e conseqüente concentração junto às frações finas.

Face às características da monazita, a premissa básica adotada para o desenvolvimento de processos foi promover ciclos de atrição/desagregação, seguidos por estágios de deslamagem, de forma a intensificar a concentração dos OTR nos ultrafinos. Uma cominuição usual somente iria diluir o teor de OTR junto aos finos. Através de desagregação seletiva e deslamagem foi possível obter-se, para a amostra de saprolito, um produto com teor médio de 21% OTR, aliado a recuperação de 77%, com diferentes relações OTR/Fe₂O₃.

O tratamento dos dados relativos às análises químicas e às descrições macroscópicas dos furos de sondagem, efetuados na área do Córrego do Garimpo, permitiu a definição preliminar de cinco tipos de materiais distintos. Os principais critérios distintivos entre os tipos de materiais observados prenderam-se aos teores de SiO₂, Fe₂O₃, CaO.

Dessa forma, os agrupamentos resultantes representam:

- amostras com predominância relativa de SiO₂ em relação aos demais teores de contaminantes, denominadas como tipo *silexitó*;
- amostras com maior conteúdo relativo de Fe₂O₃, designadas por tipo *ferruginoso*;
- amostras com predominância de SiO₂ e de Fe₂O₃, classificadas como tipo *intermediário*;
- amostras com presença de apatita, constituindo o tipo *com apatita*;
- amostras com elevado conteúdo de carbonatos, formando o tipo *carbonatito*.

O tipo predominante é o *silexitó* que corresponde a cerca de 37%, vindo a seguir o tipo *com apatita* (representando 27%); o menos expressivo é o *carbonatito*, que significa aproximadamente 6,5%.

O material *intermediário* é o que apresenta o maior teor de OTR, com valor de 9%, o que significa 12% do total de OTR contido no depósito. Para os demais tipos, esses teores são similares, estando compreendidos entre 7,5 e 8,1%, à exceção do material carbonatito, o mais pobre, com teor de 4,8%. O tipo *silexitó* contém cerca de 37% do total de OTR, vindo a seguir o material *com apatita* (~29%), enquanto que o tipo *carbonatito* contém aproximadamente 4% do total de OTR do depósito.

Com a execução do ensaio padrão, referente ao processo desenvolvido para o material saprolítico nas amostras correspondentes aos tipos acima definidos (exceto o carbonatítico), obtiveram-se os seguintes resultados:

- para o tipo *ferruginoso*, a execução do ensaio padrão (ciclos sucessivos de atrição e deslamagem) gera um produto final com 35,1% da massa, teor de 17,6%, o que significa 73,2% do total de OTR da amostra;
- para o tipo *com apatita* esse produto final significa 32,4% em massa, com teor de 17,5%, recuperando 66,5% do total de OTR da amostra;
- no tipo *silexito*, o produto final corresponde a 25% em massa, com teor de 23,2% e contém 60,4% do total de OTR da amostra;
- no tipo *intermediário*, o produto final significa 32% em massa, com teor de 15,1% e recupera 72,3% do total de OTR da amostra.

Os produtos obtidos a partir da realização do ensaio padrão nos testemunhos de sondagem (por tipo), foram objeto de testes preliminares de tratamento químico da monazita, mediante lixiviação sulfúrica (85%), à temperatura ambiente, em ensaios com duração de 3 horas. Para as amostras correspondentes aos tipos *ferruginoso* e *com apatita*, a recuperação global de terras raras foi superior a 50%. Já para as amostras dos tipos *silexito* e *intermediário*, as recuperações são inferiores, situando-se na faixa de 30%. A maior presença de material silicoso implica, provavelmente, na necessidade da utilização de temperaturas mais elevadas para a sua abertura, de modo a colocar as terras raras em solução.

Conseqüentemente, para as condições adotadas, a recuperação global para os dois tipos de minério com *silexito* situa-se ao redor de 30% e para os outros dois tipos é ao redor de 55%, o que corresponde a uma recuperação total de 42% de OTR.

Estudos hidrometalúrgicos adicionais sobre amostras volumétricas correspondentes aos quatro tipos determinados devem ser realizados, de forma a possibilitar a otimização do processo químico, particularmente para os tipos onde a proporção de material *silexítico* é mais elevada.

Embora os teores de OTR alcançados nos produtos finais que alimentarão o processo químico sejam relativamente baixos (da ordem de 20% OTR), vários fatores devem ser levados em conta, visando a exploração do depósito do Córrego do Garimpo:

⇒ a extensão dos recursos;

- ⇒ os baixos custos de mineração e de processamento físico envolvidos, uma vez que, em boa parte, os mesmos têm que ser obrigatoriamente removidos para a evolução da mina de fosfato (apatita);
- ⇒ a monazita presente contém teores extremamente baixos de urânio e tório, o que lhe confere um caráter não radioativo, não havendo, portanto, a necessidade de etapas e custos adicionais de processamento hidrometalúrgico visando a remoção desses elementos;
- ⇒ o processo hidrometalúrgico desenvolvido requer temperatura relativamente baixa;
- ⇒ há ainda a possibilidade de integração das instalações hidrometalúrgicas com as de ácido sulfúrico e de ácido fosfórico (em construção), minimizando os custos finais.

8.2. Lagoa Seca

As amostras do depósito da Lagoa Seca são constituídas predominantemente por ilmenita, monazita e fosfato secundário (gorceixita) e, secundariamente, por anatásio, quartzo, argilominerais, niobatos (bário pirocloro), zircão e apatita, com quantidades menores de barita e óxidos-hidróxidos de ferro (traços de magnetita, hematita e goethita).

As terras raras ocorrem essencialmente sob a forma de monazita. Estima-se que a monazita represente mais de 90% dos OTR presentes na amostra estudada.

Os fosfatos secundários são basicamente de dois tipos básicos:

- o mais freqüente, representado por um alumino-fosfato de bário, podendo conter pequenas proporções de cálcio e/ou de ferro;
- o mais raro, representado igualmente por um alumino-fosfato de bário, com algum conteúdo ou não de cálcio e/ou de ferro, mas que apresenta pequena parcela de óxidos de terras raras associada.

A monazita presente na área da Lagoa Seca ocorre microscritalina, com cristalitos da ordem de poucos micra; forma agregados, normalmente associada aos fosfatos secundários. Esta monazita apresenta algumas diferenças quando comparada à proveniente do depósito do Córrego do Garimpo. Ela encontra-se melhor cristalizada, formando agregados na forma de concreções; apresenta-se menos friável, o que lhe confere maior resistência à fragmentação ou quebra, motivo pelo qual o processo aplicado a área do Córrego do Garimpo não alcançou os mesmos resultados.

Todos os níveis da mineralização estudados, à exceção do nível *com apatita*, onde o teor de OTR alcançado é inferior a 13% (embora com uma razão de enriquecimento da ordem de 3,1), atingiram teores expressivos de terras raras, porém com recuperações inferiores às observadas para as amostras do Córrego do Garimpo.

9. Lista de referências

- ABRÃO, A. **Química e tecnologia das terras raras**. Rio de Janeiro: CETEM, 1994. 212 p. (Série Tecnologia Mineral, n. 66).
- ABREU, V. A. **Investigação prospectiva na indústria dos terras raras. Subsídios para políticas e gestão em minerais/materiais estratégicos**. 1991. 109 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- AMARAL, G. et al. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 31, p. 117-42, 1967.
- ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO. Brasília: DNPM, v. 19, 1990.
- ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO. Brasília: DNPM, v. 20, 1991.
- AQUINO, J. A.; ALBUQUERQUE, R. O. **Estudo de beneficiamento físico do minério de terras raras da Ultrafértil**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1996. (Relatório Técnico RC-CT5-09/96 CDTN/CNEN)
- ARAÚJO, D.; GASPAR, J. C. Química mineral dos carbonatitos e rochas associadas de Catalão I (GO). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., São Paulo, 1992. **Boletim de resumos expandidos**. São Paulo: SBG, 1992. v. 2, p. 90-1.
- BAECKER, M. L. **A mineralização de nióbio no solo laterítico e a petrografia das rochas ultramáficas-alcálinas do domo de Catalão I, Goiás**. 1983. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- BALASHOV, Y. et al. The effect of climate and facies environment of the fractionation on rare earths during sedimentation. **Geochemistry International**, v. 10, p. 995-1014, 1964.
- BARBOSA, J. P.; ARAÚJO, R. V. V.; CUNHA, O. G. Estudo de dissolução seletiva da sílica do minério de terras raras, Catalão – GO. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 51., Porto Alegre, 1995. **Anais**. São Paulo, ABM, 1995.
- BARBOSA, O. et al. **Geologia da região do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro: DNPM, 1970. (Boletim. Divisão de Fomento da Produção Mineral, 136).
- BARROS, L. A. F.; ROSENTHAL, S. **Estudos de processo – Projeto terras raras do Córrego do Garimpo: complexo de mineração de Catalão**. Catalão: Ultrafértil, 1999. 33 p. (Relatório Interno da Ultrafértil).

BAYLISS, P; LEVINSON, A. A. A system of nomenclature for rare earth mineral species; revision and extension. **American Mineralogist**, v. 73, p. 422-423, 1988.

BENEDETTO, J. S. et al. **Projeto Nuclemon. Fontes alternativas de terras raras – Catalão, GO.** Rio de Janeiro: [s.n.], 1998. 57 p. (Relatório Interno CDTN/CNEN).

BENEDETTO, J. S.; MORAIS, C. A. **Estudo tecnológico do minério de terras raras de Catalão.** Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. 62 p. (Relatório Interno CDTN/CNEN).

BETEJTIN, A. **Curso de mineralogia.** 3.ed. Moscou: Mir, 1970. 739p.

BORGES, J. A. L.; ALMEIDA, S. L. M.; COSTA, L. S. N. **Beneficiamento de minérios de terras raras. Minério do Córrego do Garimpo.** Rio de Janeiro: CETEM/CNPQ, 1995. (Relatório Técnico RT 12/95).

BRITO, O. Urânio - INB implantará nova mina em Lagoa Real. **Brasil Mineral**, n. 136, p. 30-35, nov. 1995.

BURT, D. M. Compositional and phase relations among rare earth element minerals. In: LIPIN, B. R. ; MCKAY, G. A., eds. **Geochemistry and mineralogy of rare earth elements.** Washington: Mineralogical Society of America, 1989. p. 259-308. (Reviews in Mineralogy, v. 21)

CARVALHO, W. T. Aspectos geológicos e petrográficos do complexo ultramáfico - alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. **Anais.** São Paulo: SBG, 1974b. v. 6, p. 107-123.

CARVALHO, W. T. Recursos minerais do complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. **Anais.** São Paulo: SBG, 1974a. v. 6, p. 165-184.

CARVALHO, W. T.; ARAÚJO, P. L. Perspectivas de aproveitamento econômico das depósitos minerais associados ao complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I, GO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. **Anais.** São Paulo: SBG, 1974. v. 6, p. 131-141.

CLARK, A. Mineralogy of the rare earth elements. In: HENDERSEN, P., ed. **Rare earth elements geochemistry.** Amsterdam: Elsevier, 1984. Cap. 2, p. 33-61. (Developments in geochemistry, v. 2)

CULLERS, R. L. ; GRAF, J. L. Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: intermediate and silicic rocks-ore petrogenesis. In: HENDERSEN, P., ed. **Rare earth elements geochemistry**. Amsterdam: Elsevier, 1984. p. 274-316. (Developments in geochemistry, v. 2)

DREW, L. J.; QINGRUN, M.; WEIJUN, S. The Bayan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. **Lithos** 26, p. 43-65, 1990.

FLICOTEAUX, R. et al. Transformation and precipitation of phosphates during weathering: characterization by REE distributions. **Chemical Geology**, v. 84, p. 365-367, 1990. Apresentado ao 2. International Symposium on Geochemistry of the Earth's Surface and of Mineral Formation, Aix-en-Provence, 1990/

FORMOSO, M. L. L.; MELFI, A. J.; KRONBERG, B. I. Comportamento dos elementos terras raras no intemperismo tropical. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOQUÍMICA DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS, Rio de Janeiro, 1989. /Anais/ Rio de Janeiro: CPRM/DNPM-SBGq, 1989. p. 109-120.

FRAYHA, R. **Urânio e tório no Planalto de Poços de Caldas: relatório preliminar**. Rio de Janeiro: DFPM, 1962. (Boletim, n. 116).

GIERTH, E.; LEONARDOS JR, O.H.; BAECKER, M. L. Some mineralogical characteristics of the main constituents of the unweathered section of the carbonatite complex Catalão I, Goiás, Brazil. In: Contribuições à geologia e petrologia. [s.l]: SBG, 1985. p.45-48.

GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N. Extractive metallurgy of rare earths. **International Materials Reviews**, v. 37, n. 5, p. 197-248, 1992.

HEDRICK, J. B. Rare earths, the lantanides, yttrium and scandium. **Mining Engineering**, v. 52, n. 6, p. 55-57, June 2000.

HENDERSON, P. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In: HENDERSON, P., ed. **Rare earth element geochemistry**. Amsterdam: Elsevier, 1974. Cap. 1, p. 1-32.

HENDERSON, P. The rare earth elements: introduction and review. In: JONES, A. P.; WALL, F.; WILLIAMS, T., eds. **Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits**. London: Chapman & Hall, 1996. p. 1-19. (The Mineralogical Society Series, n. 7).

IMBERNON, R. A. L. **Evolução geoquímica e mineralógica dos produtos de alteração intempérica sobre as rochas do Complexo Alcalino-carbonatítico de Catalão I, GO.** 1993. 131p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

International Union of Pure and Applied Chemistry. Commission on nomenclature of inorganic chemistry. **Journal of American Chemical Society**, v. 82, p. 5523, 1960.

JAGER, C. L.; FEITOSA, J. A. O projeto Fosfago. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. **Anais.** São Paulo: SBG, 1978. v. 6, p. 2673-2681.

KAPUSTIN, Y. L. **Mineralogy of carbonatites.** New Delhi: Amerind Publishing, 1980. 259 p.

KLEIN, C.; HURLBUT, C. S. **Manual of mineralogy.** 21 ed. New York. John Wiley, 1994. 681p.

LAPIDO LOUREIRO, F. E.; FIGUEIREDO, C. M. V.; TOREZAN, M. J. Os elementos terras raras nos complexos carbonatíticos brasileiros. In: FORMOSO, M. L. L.; NARDI, L. V. S.; HARTMANN, L. A., orgs. **Geoquímica dos elementos terras raras no Brasil.** Rio de Janeiro: CPRM/DNPM/SBGq, 1989. p. 47-59.

LAPIDO LOUREIRO, F. E.; TAVARES, J. R. Sobre duas novas ocorrências de carbonatitos em Mato Preto (PR) e Barra do Itapirapuã (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. **Resumo das comunicações.** Recife: SBG, 1978. p. 96. (Boletim, n. 1).

LAPIDO LOUREIRO, F.E.V. **A mega província carbonatítica Brasil-Angola e seus recursos minerais:** geologia, petrografia, geoquímica, geologia econômica. 1995.. 305 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V. **Terras-raras no Brasil:** depósitos, recursos identificados, reservas. Rio de Janeiro: CETEM, 1994. 189 p. (Série Estudos e Documentos, 21).

LE BAS, M. J. Diversification of carbonatite. In: BELL, K., ed. **Carbonatites: genesis and evolution.** London: Unwin Hyman, 1989. p. 1-14.

LE MAITRE, R. W. et al. **A classification of igneous rocks and glossary of terms.** Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1989. 193 p.

LENHARO, S. L. R. **Caracterização mineralógica/tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfato.** 1994. 196p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

LEVINSON, A. A. A system of nomenclature for rare-earth minerals. **American Mineralogist**, v. 51, p. 152-158, 1966.

LORENZI, M. L. B. **Caracterização mineralógica do depósito de terras raras no complexo alcalino-carbonatítico de Barra do Itapirapuã (São Paulo/PR) – Área de detalhe I**. 1999. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

LOTTERMOSER, B. G. Carbonatites and ore deposits. **The AusIMM Proceedings**, n. 2, p. 35-41, 1994.

LOUBET, M. et al. Rare earth contents in carbonatites. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 14, p. 226-232, 1972.

MACIEL, A. C.; CRUZ, P. R. **Perfil analítico do tório e terras raras**. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1973. (Boletim, n. 28).

MARIANO, A. N. Economic geology of rare earth elements. In: LIPIN, B. R.; MCKAY, G. A., eds. **Geochemistry and mineralogy of rare earth elements**. Washington: Mineralogical Society of America, 1989a. p. 309-337. (Reviews in Mineralogy, v. 21).

MARIANO, A. N. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. In: BELL, K., ed. **Carbonatites: genesis and evolution**. London: Unwin Hyman, 1989b. p. 149-176.

MARIANO, A. N.; RING, P. J. Europium-activated cathodoluminescence in minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 39, p. 649-660, 1975.

MERKER, G.; LESCH, L.; RICHTER, H. Geological situation and processing possibilities of the rare earth ore of Dong Pao / Vietnam. **Natural Resources and Development**, v. 37, p. 7-17, 1993.

MIYAWAKI, R.; NAKAI, I. Crystal chemical aspects of rare earth minerals. In: JONES, A. P.; WALL, F.; WILLIAMS, T., eds. **Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits**. London: Chapman & Hall, 1996. p. 21-40. (The Mineralogical Society Series, n. 7).

MIYAWAKI, R.; NAKAI, I. Crystal structures of rare-earth minerals. **Rare Earths**, v. 11, p. 1-134, 1987.

MIYAWAKI, R.; NAKAI, I. Crystal structures of rare-earth minerals. In: GSCHNEIDER JR., K. A.; EYRING, L., eds. **Handbook on the physics and chemistry of rare earths**. Amsterdam: North-Holland, 1993. v. 16, p. 249-518.

MORTEANI, G.; PREINFALK, C. REE distribution and REE carriers in laterites formed on the alkaline complexes of Araxá and Catalão (Bazil). In: JONES, A. P.; WALL, F.; WILLIAMS, T., eds. **Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits**. London: Chapman & Hall, 1996. p. 227-255. (The Mineralogical Society Series, n. 7).

NEUMANN, R. **Caracterização tecnológica dos potenciais minérios de terras raras de Catalão I, GO**. 1999. 204p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

NEUMANN, R.; ALMEIDA, S. L. M.; DASSIÉ, M. V. C. Technological characterization of the Córrego do Garimpo rare earth ore, Catalão (GO), Brazil. In: MEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE ON MINERAL TECHNOLOGY, 4., Concepcion, 1994. **Proceedings**. Concepcion,: Department of Metallurgical Engineering of University of Concepcion, 1994. p. 258-269.

NOTHOLT, A. J. G.; HIGHLEY, D. E.; DEANS, T. Economic minerals in carbonatites and associated alkaline igneous rocks. **Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy**. Section B, v. 99, p 59-80, 1990.

OLIVEIRA, S. M. B.; IMBERNON, R. A. L. Weathering and REE concentration in the Catalão I carbonatitic complex, Central Brazil. **Journal of the South American Earth Sciences**, v. 11, n. 4, p. 379-388, 1998.

PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENG, J. **Les minéraux en grains: méthodes d'étude et détermination**. Paris: Masson, 1970. 578 p.

PEREIRA, V. P. **Alteração no maciço alcalino carbonatítico de Catalão I (GO), Brasil. Evolução mineralógica**. 1995. 279 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PERRAULT, G.; MANKER, E. A. Geology and mineralogy of niobium deposits. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NIOBIUM, São Francisco, 1981. **Niobium: proceedings**. Warrendale: The Matallurgical Society, 1984. p. 3-78.

RIBEIRO, C. C. **Maciço de Catalão I, GO**. Catalão: Ultrafértil, 1998. (Relatório interno).

RIBEIRO, C. C. **Projeto Córrego do Garimpo - Relatório final** [S.I.]: Ultrafértil, 1998. (Relatório interno).

ROCHA, P. C. P.; TRINDADE, R. B. E. Extração de terras raras do silexito de Catalão. In: SEMINÁRIO DE METAIS NÃO FERROSOS, 8., São Paulo, 1993. São Paulo: ABM, 1993.

RONOV, A. B.; BALASHOV, Y. A.; MIGDISOV, A. A. Geochemistry of the rare earths in the sedimentary cycle. **Geochemistry International**, v. 4, n. 1, p. 3-19, 1967.

ROSKILL INFORMATION SERVICES. **The economics of rare earths & yttrium**. 10. ed. [s.l.], 1998. 212 p.

SALVI, S.; WILLIAMS-JONES, A. E. The role of hydrothermal processes in the granite-hosted Zr, Y, REE deposit at Strange Lake, Quebec/Labrador: evidence from fluid inclusions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 54, p. 2403-2418, 1990.

SANT'AGOSTINO, L. M. **Caracterização tecnológica de um depósito mineral—um estudo de caso: o nióbio de Catalão I, Goiás**. 1996. 199 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SCHEIBE, L. F. A geoquímica dos elementos terras raras nas rochas alcalinas, carbonatitos e kimberlitos de ocorrências brasileiras. In: FORMOSO, M. L. L.; NARDI, L. V. S.; HARTMANN, L. A., orgs. **Geoquímica dos elementos terras raras no Brasil**. Rio de Janeiro: CPRM/DNPM/SBGq, 1989. p. 37-46.

SEMENOV, E. I. Minerals of cerium. In: VLASOV, K.A., ed. **Geochemistry and mineralogy of rare elements and genetic types of their deposits**. Jerusalem: Israel Program For Scientific Translations, 1966. v. 2, p. 249-328.

SILVA, M. B. F. Terras raras. **Sumário Mineral – 1994**, v. 14, p. 96-97, 1994.

SONOKI, I. K.; GARDA, G. M. Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. **Boletim IG-USP. Série Científica**, v. 19, p. 63-85, 1988.

TASSINARI, M. M. L.; KAHN, H. **Caracterização de amostras de minério de terras raras AMTR-01 e AMTR-02: relatório apresentado a Ultrafértil S.A.** São Paulo: Laboratório de Caracterização Tecnológica, Escola Politécnica da USP, 1988a. 33 p. (Relatório Técnico LCT-FUSP-059/059/98).

TASSINARI, M. M. L.; KAHN, H. **Caracterização tecnológica e desenvolvimento de processos para o minério de terras raras de Catalão I, GO: relatório apresentado a Ultrafértil S.A.** São Paulo: Laboratório de Caracterização Tecnológica, Escola Politécnica da USP, 1998b. 46 p. (Relatório Técnico LCT-FUSP-059/006/98).

TASSINARI, M. M. M. L. et al. Caracterização tecnológica preliminar no saprolito mineralizado a terras raras associado ao domo alcalino de Catalão I, GO. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 17., Águas de São Pedro, 1998. **Anais.** São Paulo:ABM, 1998. v. 1, p. 419-432.

TASSINARI, M. M. M. L et al. Characterization of the rare earth minerals from the saprolitic material, Catalão I alkaline carbonatitic complex, GO. **Acta Microscópica.** Supplement A, v. 8, p. 137-138, Oct. 1999. /Apresentado ao 17. Congresso da Sociedade Brasileira de Microscopia e Microanálise; 10. Congresso da Sociedade Brasileira de Biologia Celular, Santos, 1999/

TASSINARI, M. M. L. et al. REE mineralization from Corrego do Garimpo, Catalão-I alkaline complex, Goiás, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 6., Göttingen, 2000. **Applied mineralogy in research, economy, technology, ecology and culture: proceedings.** Rotterdam: Balkema, 2000. p. 447-450.

TASSINARI, M. M. M. L. et al. Characterization of the rare earth's ore deposit from Córrego do Garimpo, GO, Brazil. In: SOUTHERN HEMISPHERE MEETING ON MINERALS TECHNOLOGY, 6.; ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIO E METALURGIA EXTRATIVA, 18., Rio de Janeiro, 2001. **Proceedings.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. v.1, p.3-8.

TASSINARI, M. M. M. L.; KAHN, H.; RATTI,G. Process mineralogy studies of Corrego do Garimpo REE ore, Catalao-I alkaline complex, Goiás, Brazil. **Minerals Engineering**, n.14, 2001 (prelo).

TOLEDO, M. C. M. **Mineralogia dos principais fosfatos do maciço alcalino-carbonatítico de Catalão I (GO) e sua evolução no perfil laterítico.** 1999. 198p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

TOURRE, J. M. Rare earths. Recent market trends. **Industrial Minerals**, n. 376, p. 37-43, Jan. 1999.

VALARELLI, J. V. **O minério de nióbio, titânio e terras raras de Catalão, GO.** 1971. 104 p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

VIERA, E. V.; LINS, F. A. F. **Concentração de minérios de terras raras – uma revisão.** Rio de Janeiro: CETEM, 1997. 53 p. (Série Tecnologia mineral, 73).

VIERA, E. V.; NEUMANN, R.; LINS, F. A. F. Concentração do minério saprolítico-laterítico de terras raras do Córrego do Garimpo, Catalão-GO. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 17., Águas de São Pedro, 1998. **Anais**. São Paulo :ABM, 1998. v. 2, p. 35-52.

WALL, F.; MARIANO, A. N. Rare earth minerals in carbonatites: a discussion centred on the Kangankunde Carbonatite, Malawi. In: JONES, A. P.; WALL, F.; WILLIAMS, T., eds. **Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits**. London: Chapman & Hall, 1996. p. 193-225. (The Mineralogical Society Series, n. 7).

WEDOW JR., H. The Morro do Ferro thorium and rare-earth ore deposit, Poços de Caldas District, Brazil. **Geological Survey Bulletin**. Washington, n. 1185, 1967.

WILLIAMS-JONES, A.; WOOD, S.A. A preliminary petrogenetic grid for REE fluor-carbonates and associated minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 1, n. 56, p. 725-738, 1991.

WOLLEY, A. R.; KEMPE, D. R. C. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and elements distribution. In: BELL, K., ed. **Carbonatites: genesis and evolution**. London: Unwin Hyman, 1989. p. 1-14.

WU, C.; YUAN, Z.; BAI, G. Rare earth deposits in China. In: JONES, A. P.; WALL, F.; WILLIAMS, T., eds. **Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits**. London: Chapman & Hall, 1996. p. 281-310. (The Mineralogical Society Series, n. 7).

WYLLIE, P. J.; JONES, A. P.; DENG, J. Rare earth elements in carbonate-rich melts from mantle to crust. In: JONES, A. P.; WALL, F.; WILLIAMS, T., eds. **Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits**. London: Chapman & Hall, 1996. p. 77-103. (The Mineralogical Society Series, n. 7).

YANG, Y. C. **Caractéristiques géologiques des dépôts à terres rares du type ion-absorbé de la croûte de altération des granites de Zou - Tong (Province de Jiang-Xi, Chine)**. Baotou: China Rare Earth Information Centre / Baotou Research Institute of Rare Earth, 1986. (PRC.n. 2).

ZHOU, Z. et al. On the geological characteristics and the genesis of the dolomitic carbonatites at Bayan Obo, Inner Mongolia. **Geological Review**, v. 26, n. 1, p. 35-42, 1980.