

73

CETEM

Série Tecnologia Mineral

Concentração de Minérios de Terras- Raras: uma revisão

**Elbert Valdiviezo Viera
Fernando Freitas Lins**

PRESIDENTE DA REPÚBLICA: Fernando Henrique Cardoso

VICE-PRESIDENTE DA REPÚBLICA: Marco Antonio Maciel

MINISTRO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA: José Israel Vargas

PRESIDENTE DO CNPq: José Galízia Tundisi

DIRETOR DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO: Marisa B. Cassim

DIRETOR DE PROGRAMAS ESPECIAIS: Eduardo Moreira da Costa

DIRETOR DE UNIDADES DE PESQUISA: José Ubyrajara Alves

DIRETOR DE ADMINISTRAÇÃO: Edmundo Antonio Taveira Pereira

CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

CONSELHO TÉCNICO-CIENTÍFICO (CTC)

Presidente: Roberto C. Villas Bôas

Vice-presidente: Juliano Peres Barbosa

Membros Internos: Fernando Freitas Lins; Paulo Sérgio M. Soares;
Vicente Paulo de Souza

Membros Externos: Antonio Dias Leite Junior; Arthur Pinto Chaves; Antônio
Eduardo Clark Peres; Celso Pinto Ferraz e Achilles J. Bourdot Dutra (suplente)

DIRETOR: Roberto C. Villas Bôas

DIRETOR ADJUNTO: Juliano Peres Barbosa

DEPTº DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS (DTM): Fernando Freitas Lins

DEPTº DE METALURGIA EXTRATIVA (DME): Ronaldo Luiz C. dos Santos

DEPTº DE QUÍMICA ANALÍTICA E INSTRUMENTAL (DQI): Luis Gonzaga S. Sobral

DEPTº DE ESTUDOS E DESENVOLVIMENTO (DES): Carlos César Peiter

DEPTº DE ADMINISTRAÇÃO (DAD): Antônio Gonçalves Dias

Elbert Valdiviezo Viera

Engenheiro de Minas M.Sc., D.Sc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Bolsista Associado do CNPq. Atua em tratamento de minérios com especial interesse em flotação.

Fernando Freitas Lins

Engenheiro Metalurgista, M.Sc., D.Sc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Pesquisador Titular do CETEM. Especialista em concentração de minérios, com ênfase em flotação e tratamento de minerais ultrafinos.

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

CONSELHO EDITORIAL

Editor

Fernando Freitas Lins

Conselheiros Internos

Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio, Juliano Peres Barbosa,
Luiz Gonzaga Sobral, Paulo Sérgio Moreira Soares, Roberto C. Villas
Bôas, Vicente Paulo de Souza

Conselheiros Externos

Antonio E. Clark Peres (UFMG), Henrique Kahn (USP), João Batista Bruno
(NATRONTEC), José Aury de Aquino (CDTN/CNEN), José Farias de Oliveira
(COPPE/UFRJ), Luiz Alberto Cesar Teixeira (PUC-RJ),
Virgínia Sampaio Ciminelli (UFMG)

A **Série Tecnologia Mineral** publica trabalhos na área minero-metalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

Celso de O. Santos COORDENAÇÃO EDITORIAL E REVISÃO

Vera Lúcia Ribeiro EDITORAÇÃO ELETRÔNICA

Indexado no *Chemical Abstracts* e no *IMM Abstracts*.

Viera, Elbert Valdiviezo

Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão/Elbert Valdiviezo Viera; Fernando Antonio Freitas Lins.
– Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1997.

53p. - (Série Tecnologia Mineral, 73)

1. Terras-raras. 2. Minérios de terras-raras. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Título. III. Série. IV. Lins, F.A.F.

ISBN 85-7227-094-9

ISSN 0103-7382

CDD 669.29

APRESENTAÇÃO

A produção mundial das terras-raras leves é dominada pela bastnaesita de Mountain Pass, na Califórnia e a de Baotou, na Mongólia, como sub-produto da mineração do ferro.

O ytrio e terras-raras pesadas são, predominantemente, originárias de depósitos secundários de xenotima, aluviões, da Malásia e Tailândia, ou como sub-produto da mineração de urânio, como o foi de Elliot Lake, no Canadá, e das “argilas iônicas” do sul da China.

E o Brasil, quais são as suas perspectivas? É esta pergunta que pretendem responder os autores dessa monografia, a qual será de agrado do leitor interessado no assunto.

Rio de Janeiro, agosto de 1997.

Roberto C. Villas Bôas
Diretor

SUMÁRIO

RESUMO/ABSTRACT	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. MINERAIS DE TERRAS-RARAS.....	4
2.1 Classificação dos Elementos	4
2.2 Ocorrência	5
2.3 Minerais de Uso Industrial.....	6
3. RESERVAS.....	9
3.1 Reservas Mundiais.....	9
3.2 Reservas Brasileiras.....	10
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	12
4.1 No Mundo	12
4.2 No Brasil.....	13
4.3 Aplicações	14
5. MERCADO INTERNACIONAL.....	15
6. EXPECTATIVAS PARA O BRASIL.....	17
7. PROCESSOS INDUSTRIAIS DE CONCENTRAÇÃO.....	19
7.1 Concentração da Bastnaesita nos EUA	19
7.2 Concentração da Bastnaesita na China.....	23
7.3 Concentração na Austrália.....	28
7.4 Concentração de Monazita na Índia.....	28
7.5 Concentração em Outros Países.....	29
8. ESTUDOS DE CONCENTRAÇÃO NO BRASIL.....	33
8.1 Depósito de Poços de Caldas	33
8.2 Minério de São Gonçalo do Sapucaí	36

8.3 Minério de Pitinga	37
8.4 Depósito do Córrego do Garimpo.....	38
8.5 Concentração de Monazita na Usina da INB	39
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
AGRADECIMENTOS	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
EXTENDED ABSTRACT.....	49

RESUMO

No início do trabalho são mostrados dados referentes às reservas e produção das terras-raras, em nível nacional e internacional. São descritas as aplicações na indústria e os usos potenciais em novas tecnologias das terras-raras e seus produtos. Também é apresentada e comentada a demanda no mercado internacional e são tratadas, ainda, algumas questões sobre as expectativas para os minérios brasileiros.

A seguir, apresenta-se uma revisão dos métodos industriais de concentração de minérios de terras-raras praticados pelos principais produtores. Geralmente, monazita e xenotímio, de origem marinha e aluvionar, são recuperados industrialmente como subprodutos através da combinação de métodos gravítico, magnético e eletrostático. A flotação é usada primariamente no processamento de minérios de terras-raras de natureza mais complexa contendo principalmente bastnaesita.

Palavras-chave: terras-raras, concentração, flotação.

ABSTRACT

Initially, this work presents information on reserves and production of rare earths and their compounds. The applications in the industry and the potential uses in new technologies of the rare earths are described. Also, it is presented the demand in the international market and some topics are discussed on the expectancy for the Brazilian ores.

Following, it is discussed the methods for the processing of rare earths. Generally, monazite and xenotime than occurs in beach and river sands are recovered industrially as subproduct by a combination of gravity, magnetic and electrostatic methods. Froth flotation is mostly used in rare-earth ores of mineralogy more complex, mainly containing bastnaesite.

Key words: rare earths, concentration, froth flotation

1. INTRODUÇÃO

Prevê-se nos próximos anos um substancial crescimento na utilização de elementos de terras-raras, principalmente neodímio, samário, lantânio, cério e ítrio, para aplicações em altas tecnologias, que incluem a fabricação de supermagnetos, no setor de eletrônica e no desenvolvimento de novos materiais e supercondutores.

O Brasil possui reservas de minérios de terras-raras, em quantidade e teor suficiente que justificam trabalhos de pesquisa adicionais para viabilizar seu aproveitamento econômico [1].

Desde 1992, o país passou a importar integralmente produtos de terras-raras para atender sua demanda, em conseqüência da desestabilização da produção interna.

As razões que entravaram o desenvolvimento da indústria de terras-raras no país foram, principalmente: insuficiência de tecnologia, redução dos preços no mercado internacional, falta de competitividade com outros países produtores e problemas ambientais.

O presente trabalho apresenta uma revisão sobre os métodos de concentração que são utilizados atualmente na indústria mineral, e descreve os estudos que vêm sendo realizados no país. A importância do assunto tratado é justificada, porquanto os minérios brasileiros, normalmente de baixo teor, requerem uma pré-concentração antes da extração química dos elementos terras-raras.

2. MINERAIS DE TERRAS-RARAS

2.1 Classificação dos Elementos [2]

Os elementos de terras-raras pertencem ao grupo III-B da tabela periódica, envolvendo os elementos químicos de número atômico situado entre 57 e 71. O termo “terras-raras” é utilizado, erroneamente, somente porque as terras-raras e seus óxidos (OTR) apresentam aspecto terroso e por terem sido considerados raros na natureza. Os elementos de terras-raras, apesar do nome, encontram-se amplamente distribuídos na crosta terrestre, porém em pequenas concentrações. As terras-raras são classificadas em dois grupos: o primeiro, denominado elementos leves das terras-raras ou grupo do cério, e o segundo referindo-se aos elementos pesados das terras-raras ou grupo do ítrio. Ao primeiro grupo pertencem os elementos químicos com número atômico situado entre 57 e 63. O segundo é constituído pelos elementos com número atômico entre 64 e 71. Essa classificação foi estabelecida em razão das diferenças em suas propriedades químicas.

O grupo dos elementos leves é formado por lantânio-La, cério-Ce, praseodímio-Pr, neodímio-Nd, promécio-Pm, samário-Sm e európio-Eu. No grupo dos elementos pesados, encontram-se gadolínio-Gd, térbio-Tb, disprósio-Dy, hólmio-Ho, érbio-Er, túlio-Tm, itérbio-Yb e lutécio-Lu. O ítrio-Y, de número atômico 39, também é considerado dentro do grupo dos elementos pesados das terras-raras, dado que possui propriedades químicas semelhantes às dos outros elementos do grupo, e também por ocorrer na natureza associado às terras-raras. O escândio-Sc, com número atômico 21, é também incluído na série em virtude de suas propriedades químicas e por encontrar-se associado às terras-raras. Na Tabela 1 são apresentados os 17 elementos que compõem as terras-raras, sua simbologia e seu número atômico.

Tabela 1 - Elementos de terras-raras [3]

	Elementos de terras-raras	Símbolo	Número atômico
	Lantânio	La	57
L	Cério	Ce	58
E	Praseodímio	Pr	59
V	Neodímio	Nd	60
E	Promécio	Pm	61
S	Samário	Sm	62
	Európio	Eu	63
	Gadolínio	Gd	64
P	Térbio	Tb	65
E	Disprósio	Dy	66
S	Hólmio	Ho	67
A	Érbio	Er	68
D	Túlio	Tm	69
O	Itérbio	Yb	70
S	Lutécio	Lu	71
	Ítrio	Y	39
	Escândio	Sc	21

2.2 Ocorrência [3]

Os elementos de terras-raras podem ser encontrados como constituintes das rochas carbonatíticas, granitos, pegmatitos e em rochas silicatadas, em concentrações que variam de 10 a 300 $\mu\text{g/g}$. Podem também ser encontrados formando mais de 250 diferentes espécies minerais. Desse total, 55 minerais são mais ou menos comuns, enquanto que a maioria das espécies é muito escassa. Entre os minerais de terras-raras que apresentam interesse econômico podem ser mencionados: monazita, bastnaesita, xenotímio, gadolinita, allanita, loparita, euxenita e apatita.

2.3 Minerais de Uso Industrial

Aproximadamente 95% dos OTR são obtidos a partir de três minerais: *monazita*, *bastnaesita* e *xenotímio* [4]. Os dois primeiros são os principais portadores dos elementos leves das terras-raras, e o xenotímio é a principal fonte de ítrio e de outros elementos que compõem a fração pesada das terras-raras. Na atualidade, principalmente esses três minerais são aproveitados para a produção de elementos de terras-raras. Na Tabela 2, apresenta-se a composição percentual em terras-raras e tório de cada um deles.

Tabela 2 - Composição percentual de terras-raras e tório dos principais minerais [5]

Elemento	Monazita	Bastnaesita	Xenotímio
Lantânio	23	32	-
Cério	46	50	-
Praseodímio	5	4	-
Neodímio	19	13	-
Promécio	-	-	-
Samário	3	0,5	1,2
Európio	0,1	0,1	0,01
Gadolínio	1,7	0,15	3,6
Térbio	0,16	-	1,0
Disprósio	0,5	0,12	7,5
Hólmio	0,09	-	2,0
Érbio	0,13	-	6,2
Túlio	0,01	-	1,27
Ítérbio	0,06	0,015	6,0
Lutécio	0,006	-	0,63
Ítrio	2	0,1	60
Escândio	-	-	-
Tório	9	0,1	0,5

Alguns outros minerais como perovskita, fluorita e zircão, poderão se tornar no futuro fontes importantes de terras-raras. Atualmente, esses minerais são processados em escala

industrial para a obtenção de outros elementos; não obstante, segundo Abrão [2], os elementos de terras-raras poderiam vir a ser recuperados como subprodutos.

A seguir, são apresentadas mais informações sobre os três principais minerais portadores de terras-raras [2]:

1) Monazita ($R\text{-PO}_4$)

A monazita é um ortofosfato de terras-raras, onde predominam os elementos leves. A fórmula estrutural da monazita é $R\text{-PO}_4$, sendo R o grupo dos elementos de terras-raras Ce, La, Nd e Sm associados ao radical fosfato. A monazita apresenta teores variáveis: 40-50% de cério, 20-36% de lantânio, 8-16% de neodímio, 3-5% de praseodímio, 0,5-3% de samário e 0,1-3% de ítrio. O lantânio, cério, neodímio e praseodímio constituem aproximadamente 90% dos elementos de terras-raras presentes na monazita (Tabela 2). Outros elementos, como o tório e o urânio, também encontram-se no mineral, tornando-o radioativo. O conteúdo de tório é muito variável, podendo oscilar entre 0,1 e 30%. A quantidade de urânio é menor, podendo atingir até 1,5%.

2) Bastnaesita ($R\text{-FCO}_3$)

A bastnaesita, fluorocarbonato de terras-raras, contém majoritariamente os elementos da fração leve das terras-raras. A sua fórmula química é $(\text{Ce,La})(\text{F,OH})\text{CO}_3$. Esse mineral apresenta teores variáveis de elementos de terras-raras: 40-54% de cério, 25-40% de lantânio, 8-16% de neodímio e 3-5% de praseodímio. A bastnaesita apresenta uma distribuição desses elementos similar à monazita; porém, o conteúdo de tório é menor, normalmente inferior a 0,1%. É uma das mais importantes fontes de terras-raras, tanto pelas suas reservas como pelos seus teores.

3) Xenotímio (YPO₄)

O xenotímio é um fosfato de ítrio e outros elementos da fração pesada das terras-raras, apresentando teores variáveis desses elementos, 40-69% de ítrio, 4-19% de itérbio, 4-14% de érbio, 5-14% de disprósio e 1-8% de gadolínio. É a mais importante fonte de ítrio, apresentando em média um teor de 60% (Tabela 2). O xenotímio ocorre associado usualmente à monazita, porém, em quantidades menores que essa. Entre suas mais importantes propriedades físicas, pode-se mencionar que é mais fortemente magnético que a monazita, fato que permite sua separação por métodos magnéticos.

3. RESERVAS

3.1 Reservas Mundiais [6]

Estima-se que as reservas totais de minérios de terras-raras (medidas e indicadas) sejam de 112,6 milhões de toneladas. Desse total, a China possui mais do 40%, sendo que a maior parte encontra-se no depósito de Baiyun Ebo (bastnaesita). A Rússia é apontada como o país que possui a segunda maior reserva (18%), composta em sua maioria por loparita e apatita. Os EUA ocupam o terceiro lugar, com 12,4%, sendo que as maiores reservas de bastnaesita encontram-se em Mountain Pass. Seguem-se depois Austrália (5,1%), Índia (1,2%), Canadá (<1%), África do Sul, Brasil, Malásia, Sri-Lanka, Tailândia, Zaire e outros países. Na Tabela 3 apresentam-se as reservas mundiais expressas em toneladas e sua distribuição percentual.

Tabela 3 - Reservas mundiais de minérios de terras-raras.

Países	Reservas (10 ³) t	%
China	48.000	42,6
Rússia	21.000	18,6
Estados Unidos	14.000	12,4
Austrália	5.800	5,1
Índia	1.300	1,2
Canadá	1.000	0,8
África do Sul	400	0,4
Brasil	93	0,1
Malásia	35	<0,1
Sri-Lanka	13	<0,1
Tailândia	1	-
Zaire	1	-
Outros países	21.000	18,6
TOTAL	112.643	100,0

Fonte: DNPM, 1996 (Ref.6)

3.2 Reservas Brasileiras

De acordo com os dados do DNPM de 1996 [6], as reservas medidas e indicadas são da ordem de 93.000 t. Desse total, a empresa Indústria Nucleares do Brasil S.A. detém 53.597 t, distribuídas nos estados do Rio de Janeiro (São João da Barra, 40.889 t), Espírito Santo (Itapemirim, Anchieta, Guarapari e Aracruz, 4.839 t) e Bahia (Alcobaça, Prado e Porto Seguro, 7.869 t). As reservas da Samitri S.A. - Mineração da Trindade, através da empresa Mineração Alegria, alcançam 39.258 t, localizadas principalmente no município de São Gonçalo do Sapucaí, MG (24.396 t).

O Brasil possui também importantes reservas em Paranaguá, PR, Araxá e Poços de Caldas, MG, Catalão, GO; além de reservas de xenotímio localizadas na província de Pitinga, AM, pertencentes à empresa Paranapanema. Porém, a extensão das reservas desses e de outros depósitos encontrados ainda não foi incorporada oficialmente ao total de reservas brasileiras.

Segundo Lapido-Loureiro [1,7], as maiores reservas de terras-raras são encontradas em solos lateríticos e silixitos associados aos complexos carbonatitos, como pode-se verificar na Tabela 4.

Tabela 4 - Recursos identificados no Brasil e respectivos teores em OTR [1]

Classificação	Recursos, t	OTR (%)
<i>Placers</i>		
1. Marinheiros	39.000	0,1-0,3
2. Fluviais	29.300	-
Carbonatitos		
1. Silixitos	680.000	>10,0
2. Solos lateríticos	29.180.000	0,8-13,5

OTR: óxidos de terras-raras

Conforme mostra a Tabela 4, os recursos identificados de terras-raras, principalmente em solos lateríticos, são significativos (em torno de 29 milhões de toneladas). É importante ressaltar que o termo “recursos identificados” é usado por Lapido-Loureiro [1] para denominar aqueles recursos cujas características, localização, teor e quantidade são estimados com base em evidências geológicas. Portanto, deve ficar claro que, dentre o total, somente 4% são constituídos por reservas medidas e definidas como economicamente viáveis, enquanto 96% são constituídos por reservas potenciais, de enormes volumes, mas ainda sem viabilidade técnica e econômica, como seria o caso dos solos lateríticos e silexitos associados a carbonatitos.

4. PRODUÇÃO

4.1 No Mundo

Os maiores produtores de OTR são os Estados Unidos e a China, cada um com cerca de 30.000 t/ano [6]. Seguem-se, de acordo com sua produção: Rússia, Austrália, Índia, África do Sul, Malásia, Tailândia, Sri-Lanka e Zaire (Tabela 5).

Tabela 5 - Produção de óxidos de terras-raras (OTR)

Países	Produção, t	%
EUA	28.700	35,0
China	30.000	35,0
Rússia	6.000	13,9
Austrália	3.000	7,0
Índia	2.500	4,8
África do Sul	400	1,3
Malásia	250	0,8
Tailândia	150	0,6
Sri Lanka	120	0,2
Zaire	30	0,1
Outros países	5	1,3
TOTAL	71.155	100,0

Fonte: DNPM, 1996 (Ref.6)

Em Baotou encontram-se localizadas as principais usinas de extração de terras-raras da China. Somente em Baotou existem cerca de 10 usinas de processamento que produzem 200 espécies diferentes de produtos de terras-raras. Baotou é considerada a segunda em capacidade no mundo [3]. A maior usina de produção de terras-raras é a da Molycorp, localizada em Mountain Pass (EUA). A Rhône Poulenc, pioneira na extração de terras-raras, conta com duas usinas, La Rochele (França), atualmente fechada, e Freeport (EUA) que produz óxidos de terras-raras com pureza de até 99,999% [2].

4.2 No Brasil [6]

A produção de terras-raras e seus derivados (concentrados, cloretos, óxidos, *mischmetal* e outros compostos) encontra-se parcialmente suspensa desde 1993.

A usina de tratamento físico de minérios, pertencente à empresa Indústrias Nucleares do Brasil, foi modernizada em 1995, com pré-operação iniciada em meados de 1996. As instalações da usina de extração foram transferidas de São Paulo para Buena, distrito de São João da Barra-RJ. Nessa localidade, está operando uma unidade experimental de extração por solvente que produz cerca de 26 t de óxidos de samário e alguns carbonatos, dentre eles o carbonato de lantânio.

A Cia. Industrial Fluminense - CIF, do grupo Metallurg, apresentou uma drástica redução na produção de *mischmetal* em relação a 1994. Atualmente, a CIF estuda algumas alternativas de paralisação total, devido aos baixos preços praticados pela China. Na Tabela 6, apresenta-se a produção de compostos de terras-raras no Brasil entre 1992 e 1995.

Tabela 6 - Produção de compostos de terras-raras no Brasil

PRODUÇÃO, t	1992	1993	1994	1995
Cloreto de Terras-Raras	116	-	-	-
Outros compostos	52	-	-	26
<i>Mischmetal</i> *	228	270	256	77

* *mischmetal* é uma liga obtida pela eletrólise em sais fundidos de cloretos de terras-raras.

Fonte: DNPM, 1996 (Ref.6).

4.3 Aplicações

Seria necessária a elaboração de um tratado especial para mencionar as inúmeras aplicações das terras-raras. Os elementos de terras-raras são amplamente utilizados na obtenção de produtos de alta tecnologia, indústrias metalúrgicas, cerâmicas, vidros, iluminação, eletrônica, química, fabricação de supermagnetos, dispositivos nucleares, indústria automotiva, entre outras [2].

Para suas diversas aplicações, somente uma pequena parte das indústrias é grande consumidora de terras-raras. A grande maioria consome pequenas quantidades. O maior consumo (99%) é para terras-raras não separadas, e somente 1% do total é usado como elementos individuais. A distribuição percentual dos setores industriais que consomem terras-raras são: catalisadores para petróleo (36%), metalurgia (31%), vidro/cerâmica (30%) e outros usos (3%) [3].

5. MERCADO INTERNACIONAL

No âmbito internacional, a produção de terras-raras e seus derivados tem despertado enorme interesse comercial em diversas empresas do setor, fato concretizado através do investimento de capitais para a posta em operação de várias usinas de extração por solvente, embora as tendências demonstrem uma diminuição dos preços, provocadas pelo aumento da produção. Por causa dos baixos preços praticados por parte da China, a maior produtora de terras-raras e possuidora dos maiores depósitos do mundo, os principais produtores se uniram com esse país para manter o controle dos preços. Os países produtores formaram uma espécie de cartel, logrando a equiparação dos preços no mercado internacional[3].

Contudo, observa-se que, dentro desse contexto, a demanda de alguns compostos de terras-raras tem crescido nos últimos anos. O consumo de cério, por exemplo, tem aumentado. Por causa disso, algumas usinas, como a Molycorp, têm expandido suas instalações e duplicado sua produção de cério puro, triplicado sua produção de neodímio e duplicado a produção de óxido de ítrio puro e ítrio metálico. A Rhône Poulenc instalou uma terceira usina, na Austrália, para obtenção de elementos de terras-raras de elevada pureza [2].

A expectativa é de que nos próximos anos exista um crescente aumento, em nível mundial, na demanda de terras-raras, paralelamente ao surgimento de novas aplicações em altas tecnologias. Essa tendência está de fato sendo concretizada em diversos setores industriais. A General Motors Co. construiu uma usina em Indiana (EUA), que vem operando desde 1985, para a fabricação de magnetos do tipo Nd-Fe-B, utilizados em motores de automóveis. Assim, também o cério, na forma de óxido, está sendo utilizado como catalisador antipolvente. Estudos estavam sendo realizados para a indústria de catalisadores, no sentido de obter um óxido de cério com características especiais, tal como elevada área superficial [3].

Um mercado que continua crescendo é o de magnetos permanentes à base de samário e neodímio utilizados na fabricação de ímãs permanentes para uso em motores miniaturizados, sensores de geração de microondas e de ressonância magnética nuclear [2]. O európio, considerado o elemento mais raro do seu grupo, apresenta um mercado em fase de crescimento, devido ao seu uso em tubos de TV coloridas e em telas de raios-X. A demanda de ítrio também deve crescer (ainda é pequena) nos próximos anos para uso na fabricação de fósforos à base de ítrio [2].

O Japão é o maior comprador dessa matéria prima, sendo a China o seu principal fornecedor. Os Estados Unidos, um dos maiores produtores e exportadores de produtos de terras-raras, perderam uma parte desse mercado para a China. Por outro lado, a tendência é que o Japão mantenha sua posição de maior mercado importador, devendo inclusive aumentar sua demanda, em função do crescimento de sua indústria eletrônica[1].

Segundo dados estatísticos de 1989 [3], 96% da produção de terras-raras eram destinadas a atender a indústria de catalisadores (zeólitas), metalúrgica e vidro/cerâmica, e apenas 4% às indústrias fabricantes de fósforos, magnetos, vidros especiais e cerâmicas finas. O maior uso dos cloretos de terras-raras ainda continua sendo no craqueamento de petróleo.

Atualmente, existe um enorme interesse nos compostos de terras-raras para fabricação de células de combustível, segundo apontado por Abreu [8]. A expectativa nos próximos anos é que as células de combustível revolucionem a geração de energia elétrica. Prevê-se que, no início do próximo século, 7% do total da energia elétrica do mundo sejam geradas pelas células de combustível. Em poucos anos esse campo poderá ser um importante mercado para as terras-raras, principalmente os óxidos de ítrio e lantânio.

6. EXPECTATIVAS PARA O BRASIL

O Brasil apresenta um grande volume de recursos de terras-raras, segundo estimativas de Lapido-Loureiro [1], podendo ocupar no futuro uma posição importante na produção mundial de terras-raras.

Do total de recursos avaliados, em torno de 29 milhões de toneladas, aproximadamente 4% correspondem às jazidas definidas como economicamente viáveis, enquanto que a maior parte permanece como reservas potenciais ou recursos.

Entre as reservas viáveis, encontram-se os *placers* de origem marinha do litoral do estado do Rio de Janeiro (monazita) e os de origem fluvial como Pitinga (AM) e São Gonçalo do Sapucaí (MG), nos quais os minerais de terras-raras são, respectivamente, xenotímio e monazita. Os órgãos de proteção ao meio ambiente impedem, até o presente, a exploração do minério de São Gonçalo do Sapucaí, pela possível degradação de áreas superficiais [1].

Entre os recursos potenciais, podem mencionar-se: silixito de Catalão (GO), Morro do Ferro (MG), fosfatos de Araxá (MG), fosfatos de Catalão, minério de nióbio de Araxá e Catalão, e minério fluorítico de Mato Preto (PR) [1].

O minério do Córrego do Garimpo (GO) é um depósito muito promissor de monazita pelo seus teores, reservas (680.000 t de OTR) e baixa radioatividade (0,46% ThO₂) [1].

O minério do Morro do Ferro, em Poços de Caldas (MG), devido à sua complexidade mineralógica, e pelo seu alto teor de tório (4,9% ThO₂), apresenta-se como de difícil beneficiamento [1].

Na atual conjuntura, a grande maioria das reservas não é aproveitada; porém, a longo prazo, elas podem transformar-se em importantes fontes para extração de terras-raras, desde que métodos específicos de processamento sejam desenvolvidos

para cada um desses minérios e depois de um detalhado estudo de viabilidade técnico-econômica.

Atualmente, poucas jazidas teriam condições de entrar em atividade para produção comercial de terras-raras, com rentabilidade. No entanto, as empresas detentoras dos direitos minerais deverão ajustar-se às atuais tendências impostas pelo mercado, que exige maior eficiência, para poder competir com os produtores internacionais, tradicionalmente a China e os Estados Unidos.

Vislumbra-se que, além do consumo das terras-raras em setores/ usos industriais consagrados (catálise, vidros, metalurgia, magnetos, cerâmicas, fósforos etc.), devem abrir-se novas aplicações: na agricultura como nutriente, na pecuária como aditivo nas rações do gado ovino para melhorar a qualidade da lã, em ligas de alumínio/terras-raras, nas cerâmicas avançadas, em ligas metálicas e aços como inibidores de corrosão [2].

7. PROCESSOS INDUSTRIAIS DE CONCENTRAÇÃO

Muitos dos processos industriais utilizam concentração gravítica, separação magnética e separação eletrostática como estágios de pré-concentração dos minerais portadores de terras-raras. Na prática industrial, esses métodos são freqüentemente utilizados no beneficiamento de *placers* de origem marinha e fluvial.

A flotação seletiva é primariamente utilizada sobretudo no processamento de minérios de terras-raras de mineralogia mais complexa, como aqueles de origem hidrotermal ou magmáticos. Os únicos casos relatados na literatura, onde se aplica a flotação seletiva em escala industrial para separação dos minerais de terras-raras, são o minério de ferro de Baiyun Ebo, China, que contém bastnaesita e monazita; e o minério de Mountain Pass, EUA, que contém bastnaesita [5].

7.1 Concentração da Bastnaesita nos EUA

O depósito de bastnaesita de Mountain Pass, descoberto em 1949, tornou os EUA um dos maiores fornecedores de elementos de terras-raras. As dimensões da jazida são 800 m de comprimento, 170 m de largura e 100 m de profundidade; o método de lavra utilizada é a céu aberto. A partir de 1965, a bastnaesita substituiu a monazita como a principal fonte de terras-raras, sendo responsável em 1978 por mais da metade da produção mundial de minerais de terras-raras [9].

A bastnaesita de Mountain Pass foi descrita em 1982 como ocorrendo em um minério do tipo carbonatito, associado com carbonatos e sulfatos como os principais minerais de ganga [10]. O minério de origem magmática era constituído, em média, por 60% de carbonatos, principalmente calcita, 20% de barita-celestita, 10% de bastnaesita e o restante por outros minerais como quartzo [5,11].

A distribuição percentual de OTR é a seguinte: 53% CeO₂, 30% La₂O₃, 11,2% Nd₂O₃, 4,2% Pr₆O₁₁, 0,66% Eu₂O₃, 0,62% Sm₂O₃, 0,21% Y₂O₃ e 0,13% Gd₂O₃. A composição química do minério, segundo Morrice e Wong [9], é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do minério de Mountain Pass [9]

Constituinte	%
OTR	7,5
BaSO ₄	21,2
SiO ₂	12,6
CaO	18,5
SrO	4,5
MgO	2,7
Fe ₂ O ₃	2,2
CO ₂	19,6
P ₂ O ₅	0,5
S	3,9
Pb	0,3
Th	0,02
Outras	1,0

O esquema de concentração empregado na usina de Mountain Pass, processo desenvolvido pela Molycorp Inc. (Molybdenium Corporation), é apresentado na Figura 1. A usina de beneficiamento processava 1.700 t/dia de minério, produzindo 17.000 t/ano de OTR. Conforme é mostrado no fluxograma, o minério *run of mine* (ROM) passava por estágios de cominuição (britagens primária, secundária, terciária e moagem a úmido), classificação e flotação. A britagem primária, era realizada em um britador de mandíbula, resultando em um produto com granulometria abaixo de 100 mm. Esse produto é submetido a uma britagem secundária em britador cônico, sendo a fração grossa do classificador rebitada em britador de impacto. O material produzido na britagem secundária, com granulometria abaixo de 13 mm, era alimentado no circuito convencional de moagem a úmido, barras e bolas, operando em circuito fechado com hidrociclones. O produto final da moagem apresenta uma granulometria com P₈₀ igual a 147 µm que alimenta o sistema de condicionamento [11].

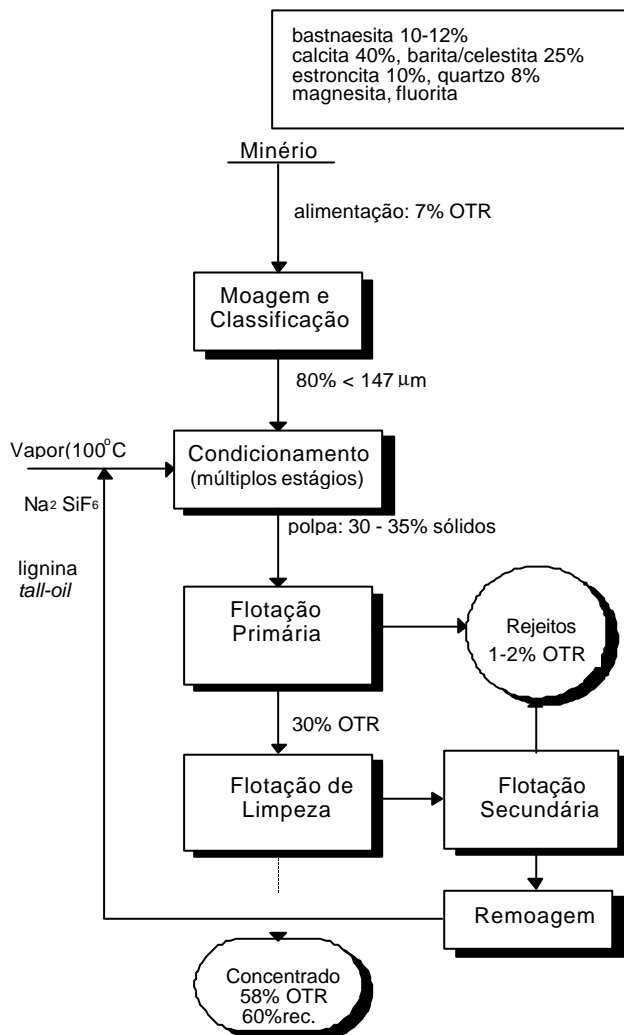


Figura 1 - Fluxograma de concentração do minério de Mountain Pass, EUA, usina da Molycorp Inc. [9], segundo dados de 1982

O condicionamento da polpa em múltiplos estágios era realizado em tanques de 1,8 m de diâmetro x 2,7 m de altura. No primeiro estágio, é adicionado carbonato de sódio (3 kg/t) e fluorossilicato de sódio (0,4 kg/t). No segundo estágio, é introduzido vapor nos tanques para aquecimento e condicionamento da polpa. O terceiro estágio envolve a adição de lignino-sulfonato de amônia (2,8 kg/t), também com injeção de vapor. No quarto, quinto e sexto estágios, sempre injetando vapor, é adicionado o *tall-oil* comercial (0,3 kg/t). Após o último estágio de condicionamento, o pH da polpa é de 8,8. A polpa contendo 30-35% de sólidos em peso era conduzida ao circuito de flotação [9,11].

A flotação primária era realizada em um circuito convencional constituído por 12 células Galligher, cada uma com 1,7 m³ de capacidade. A alimentação da flotação continha 10% de bastnaesita e 7,5% de OTR. O concentrado primário, com um teor de 30% de OTR, alimentava o circuito de limpeza que operava com uma percentagem de sólidos de 50% em peso. O rejeito da flotação primária, contendo apenas 1-2% de OTR, era descartado. No total, quatro estágios sucessivos de limpeza eram realizados, obtendo-se um concentrado final que apresentava um teor de 60-63% de OTR e 65-70% de recuperação. Com exceção do rejeito da última limpeza, os demais rejeitos eram recirculados. O rejeito do quarto estágio de limpeza era conduzido ao circuito de flotação *scavenger*, cujo concentrado era submetido à remoagem antes de ser recirculado ao tanque de condicionamento, sendo o rejeito descartado. O concentrado final obtido era, a seguir, submetido às operações de espessamento, filtração, secagem e empacotamento [5,11].

A usina de Mountain Pass possuía também instalações de lixiviação e calcinação para tratamento do concentrado proveniente da etapa de flotação. Parte desse concentrado era comercializada diretamente, enquanto que outra parte era conduzida à etapa de lixiviação. O concentrado era lixiviado com ácido clorídrico 10% (pH \approx 1,0) em tanques de 1,8 m de diâmetro x 2,7 m de altura, para dissolução da ganga carbonatada, não separada na etapa de flotação. Com a lixiviação, consegue-se

um incremento adicional do teor de OTR de 60% para 68-72%. O produto da lixiviação era conduzido a um espessador, onde foi obtido um líquido clarificado, que era eliminado como rejeito, e um material com alta concentração de sólidos que era filtrado e secado para ser submetido à etapa de calcinação. Com a calcinação do concentrado, era obtido uma redução do conteúdo de fluorocarbonatos, elevando-se o teor de OTR acima de 90%. O produto obtido era comercializado diretamente ou era enviado à usina de separação dos elementos de terras-raras [5,11].

Na década de 80 foram realizados estudos [11,12] visando ao melhoramento do processo de concentração da usina de Mountain Pass. Ensaios de microflotação e em escala de bancada, realizados por Fuerstenau et al. [11], mostraram que os reagentes do tipo hidroxamato apresentam maior seletividade que os ácidos graxos, principalmente com relação à calcita e à barita.

O Bureau of Mines [12] realizou ensaios de flotação em escala de bancada em $\text{pH} \approx 10,0$, utilizando como coletor o reagente comercial Westvaco L-5, que é uma mistura de ácido oléico e linoléico (em proporções iguais) e 1% de ácido linolênico. O propósito da pesquisa foi diminuir o consumo de energia, requerida para aquecimento da polpa utilizando um ácido graxo. Com esse coletor, a temperatura de aquecimento da polpa pode ser reduzida para a faixa de 40° a 45°C , e ainda obtendo-se um concentrado com 58% de OTR e 67% de recuperação.

7.2 Concentração da Bastnaesita na China

A jazida de Baiyun Ebo, localizada no interior da República da China, é a maior mineralização de terras-raras do mundo. O depósito é resultado de um processo de metamorfismo que deu origem a uma complexa mineralização, composta por uma diversidade de espécies minerais [13]. O minério era constituído por mais de 100 minerais, sendo a bastnaesita e a monazita os portadores de terras-raras, encontrados na proporção de 2:1. Os outros minerais associados ao minério são martita, principal

mineral de ferro, hematita, magnetita e limonita em menor quantidade. Entre os minerais parcialmente solúveis podem ser mencionados fluorita, barita e calcita. Alguns minerais de nióbio são também encontrados, como columbita, rutilo, aeschinita e pirocloro. Quartzo e aegirina ($\text{NaFeSiO}_2\text{O}_6$) também estavam presentes, sendo o quartzo a principal ganga silicatada. Outros minerais de ganga, como augita e riebeckita, são também encontrados no minério [14].

A composição química do minério de Baiyun Ebo é mostrada na Tabela 8 [13]. Em média, o minério contém 5-7% de OTR e 28-32% Fe.

Tabela 8 - Composição química do minério de Baiyun Ebo, China, segundo dados de 1984

Constituinte	%
OTR	7,00
Fe (total)	30,80
FeS	28,30
FeO	2,48
F	9,13
P	1,02
SiO ₂	13,62
Mn	0,15
CaO	17,02
MgO	0,48
Al ₂ O ₃	0,40
K ₂ O	0,12
Na ₂ O	1,53
BaO	2,08
S	0,78
TiO ₂	0,51

O processo de concentração do minério de Baiyun Ebo é mais complicado em relação àquele aplicado ao minério de Mountain Pass, devido à grande variedade de espécies minerais, liberação fina dos minerais portadores de terras-raras e associação com outros minerais. O grau de liberação da bastnaesita e da monazita ocorre em granulometria muito fina,

abaixo de 40 μm . Após moagem, a uma granulometria com 95% abaixo de 74 μm , o minério era submetido a cinco diferentes etapas de concentração. Essas etapas consistem de separação magnética de baixa intensidade, flotação coletiva, separação magnética de alta intensidade, flotação e concentração gravítica. Na primeira etapa era retirada a magnetita. A segunda etapa consistia de uma flotação coletiva, que tinha por finalidade separar os minerais fluorita, calcita e barita (concentrado coletivo) dos óxidos de ferro (rejeito). Como reagentes, eram utilizados carbonato de sódio para regular o pH em 10,3, silicato de sódio como depressor dos óxidos de ferro e silicatos e sulfonato de petróleo como coletor. Os minerais bastnaesita e monazita encontram-se no rejeito junto com os óxidos de ferro. Esse produto passa por uma separação magnética de alta intensidade, a fim de retirar a hematita. A seguir, o produto não-magnético era submetido à flotação [13].

Na etapa de flotação, o condicionamento da polpa era realizado com o reagente de nome comercial Aquamollin (depressor dos óxidos de ferro) e com o coletor HOE-F1415, que é um derivado do ácido fosfônico desenvolvido para esse minério. No concentrado, era obtido um misto de bastnaesita-monazita com menos de 56% de OTR [13].

Em uma última etapa, o concentrado misto de terras-raras alimentava as mesas oscilatórias para uma separação adicional dos óxidos de ferro, visando um aumento do teor de OTR. O produto final apresenta um teor em torno de 60% de OTR; porém a recuperação não é satisfatória. A usina de Baiyun Ebo operou com esse processo desde meados de 1970. A Figura 2 apresenta o fluxograma simplificado.

Estudos realizados por Jiake e Xiangyong [14] apontaram que o decréscimo da recuperação é causado pela baixa seletividade do coletor utilizado na flotação coletiva, isto é, parte da bastnaesita e da monazita seria flotada junto com fluorita, calcita e barita. Os pesquisadores propuseram uma rota alternativa para a concentração do minério, que permitiria obter um concentrado com teor de 68% de OTR e recuperação de 72,5% (Figura 3).

Não se têm informações sobre sua aplicação no processo industrial.

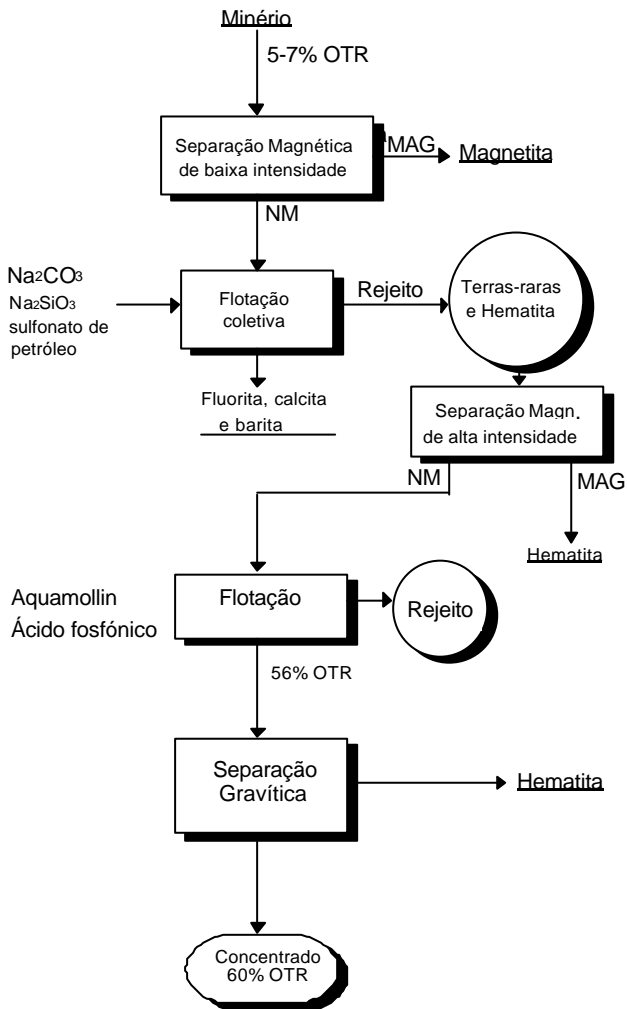


Figura 2 - Fluxograma simplificado de concentração em escala industrial do minério de Baiyun Ebo, China [13], em 1985

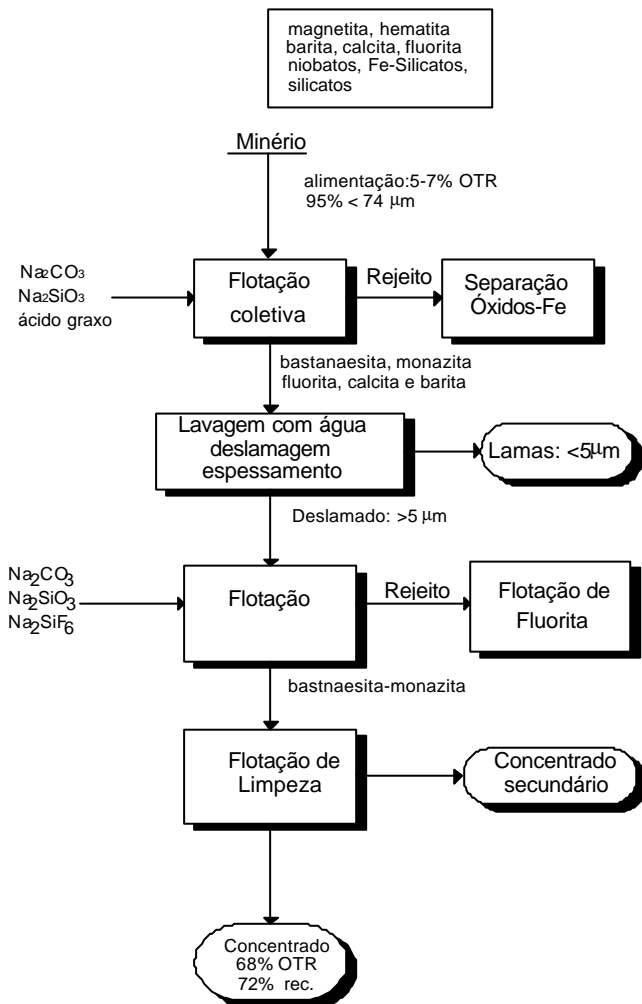


Figura 3 - Fluxograma de flotação proposto por Jiake e Xiangyong [14] para o minério de Baiyun Ebo, China, em 1985

7.3 Concentração na Austrália

Na Austrália, os minerais portadores de terras-raras aproveitáveis industrialmente são a monazita e o xenotímio. A ocorrência desses minerais dá-se como depósitos aluvionares em areias de praias e rios. Aproveitando suas propriedades magnéticas, condutoras e alto peso específico, a monazita é concentrada através de uma combinação de métodos: gravítico, magnético e eletrostático. O concentrado de monazita é obtido como subproduto do processamento de areias contendo, além de monazita, ilmenita, rutilo e zircão [15].

Há referência na literatura a uma usina que utilizava a flotação em combinação com concentração gravítica para o beneficiamento de um depósito de areias monazíticas, localizado no leste da Austrália [16]. Uma vez que o artigo foi publicado há mais de 30 anos, não se sabe se o processo ainda é utilizado.

Lottermoser [17] relatou recentemente a existência de um enorme depósito laterítico, Mt Weld, localizado ao oeste da Austrália, contendo monazita e churchita como os principais minerais de terras-raras. Os minerais associados são: zircão, pirocloro, baddeleyita, rutilo, ilmenita, apatita, goethita, hematita, florencita, rabdofânio e cerianita. Por causa da complexa mineralogia, alto grau de intemperização e existência de uma apreciável quantidade de monazita em granulometria fina, menor que 10 μm , a sua concentração por métodos gravíticos e/ou flotação não é viável [18]. Uma possível rota sugerida para o beneficiamento do minério de Mt Weld consistiria de uma etapa prévia de floculação, seguida de flotação seletiva [17].

7.4 Concentração de Monazita na Índia

A Índia mantém atualmente uma produção razoável de minerais de terras-raras [6]. O maior depósito de areias monazíticas do país localiza-se em Madras. O minério é constituído por ilmenita (60%), rutilo (1,2%), zircão (5,7%), monazita (5,0%), granada (6,4%), silimanita (4,0%), quartzo (16,0%) e matéria orgânica (1,7%). A recuperação industrial de

monazita é efetuada através de uma combinação de métodos: gravítico, magnético e eletrostático [15]. Não se conhece se esse fluxograma de beneficiamento é ainda utilizado.

Um estudo realizado por Viswanathan et al. [16] com o minério proveniente de Madras mostrou que a flotação seria um excelente método para a separação seletiva da monazita. Os resultados indicaram que teores em torno de 72,4% de OTR e recuperação de 93,8% podem ser obtidos ajustando o pH de flotação em 11,5, utilizando silicato de sódio como depressor e Acintol FA (reagente comercial) como coletor. O silicato de sódio é usado como depressor de ilmenita, rutilo, zircão e silimanita. O Acintol FA, que é uma mistura de ácido oléico, linoléico e linolênico mostrou melhor desempenho que o oleato de sódio e o laurato de sódio, respectivamente. Como o artigo foi publicado há mais de 3 décadas, não se sabe se a flotação foi incorporada na rota de beneficiamento desse minério.

7.5 Concentração em Outros Países

Depósitos aluvionares de areias monazíticas encontram-se disseminados em diversos países, como África do Sul, Brasil, Canadá, China, CEI, Malásia, Sri-Lanka e Zaire. Na maioria desses países, o aproveitamento industrial da monazita é obtido como subproduto de processamento de ilmenita, rutilo e zircão, através de métodos gravíticos, magnéticos e eletrostáticos [5].

Na China, além do minério de Baiyun Ebo, cujo beneficiamento foi descrito anteriormente, há imensos depósitos aluvionares de monazita, localizados no leste e sul do litoral da China. São processados através de métodos convencionais (não inclui flotação) para separação de monazita, rutilo, ilmenita e zircão. Porém, o processo apresenta diversas complicações e desvantagens: é complexo, requer muitos equipamentos, há problemas de produtos mistos, baixas recuperações e baixos teores nos concentrados. Estudos realizados na China por Jiaying et al. [19] visaram ao desenvolvimento de um processo alternativo, principalmente na separação de zircão do rutilo. A

flotação apresentou-se como uma boa opção para separação seletiva desses minerais. Contudo, o processo envolve a necessidade de aquecimento da polpa e a manutenção de um pH fortemente ácido, que provoca, conseqüentemente, alto consumo de energia, problemas ambientais e problemas de corrosão no equipamento. O processo de flotação foi melhorado com a utilização de uma mistura de coletores catiônico e aniônico, temperatura ambiente e pH da polpa em torno de 7,0. Esse método é empregado com sucesso em combinação com separação eletrostática numa usina de beneficiamento localizada na província de Guangdong, China.

A Malásia também produz concentrados de monazita e xenotímio, embora em pequena quantidade, e o método empregado para a concentração é geralmente físico. Dificuldades na separação da monazita e do xenotímio por métodos físicos têm levado alguns pesquisadores [20] a estudar a possibilidade de aplicar a flotação na separação desses minerais portadores de terras-raras. Contudo, não foram encontradas condições favoráveis à obtenção de boa seletividade para o processo.

Nos últimos anos, foi descoberto um depósito de bastnaesita, de origem hidrotermal, localizado ao oeste de Ankara, na região central da Turquia [21]. O minério, com 7% de OTR, é constituído principalmente por fluorita (51,5%), barita (24,4%) e bastnaesita. As características mineralógicas do depósito são semelhantes às do minério de Mountain Pass; porém, o minério da Turquia é intensamente alterado e a bastnaesita encontra-se em uma granulometria muito fina. Os estudos realizados por Ciccù et al. [21] mostraram que métodos convencionais de separação magnética, separação gravítica e flotação são inadequados à recuperação da bastnaesita.

Com base nos resultados obtidos em escala de laboratório, Ciccù et al. [21] desenvolveram um esquema de beneficiamento para o minério da Turquia, com ênfase na recuperação de bastnaesita. Segundo esse esquema, o minério bruto é inicialmente deslamado. O material fino é classificado em hidrociclone e o *overflow* é submetido novamente a uma

hidroclassificação. O *overflow* dessa operação representa o primeiro concentrado com 34,1% de OTR e 24,4% de recuperação. Por outro lado, o material deslamado é britado a -5 mm e submetido a intensa agitação em uma célula de atrição, mantendo-se uma percentagem de sólidos de 50% e velocidade de agitação de 1.500 rpm. O material resultante é classificado por peneiramento para separar a fração -0,2 mm, que por sua vez é classificada em hidrociclone. O produto *overflow* representa o segundo concentrado de bastnaesita. O concentrado final apresenta um teor de 31,2% de OTR e 43,3% de recuperação. Além da possibilidade de concentrar a bastnaesita, distribuída preferencialmente nas frações finas, a flotação pode ser utilizada como estágio opcional para obter-se barita e fluorita como subprodutos.

Merker, Schulz e Richter [22] relatam que no Vietnã (do Norte) encontra-se um depósito de bastnaesita, que apresenta características similares ao minério da Turquia. O minério é fortemente intemperizado, e além de bastnaesita apresenta fluorita, barita, quartzo e óxidos de ferro. O teor de OTR varia de 5 a 14%. O beneficiamento é particularmente difícil, considerando-se que a bastnaesita encontra-se amplamente distribuída em granulometrias muito finas. Ensaios em escala de laboratório e em escala piloto, realizados por esses pesquisadores, permitiram o desenvolvimento de um esquema adequado de concentração do minério, que consiste basicamente de deslamagem, flotação e separação magnética.

Conforme o esquema de beneficiamento, o minério ROM é classificado a úmido em uma peneira vibratória de 40 mm de abertura. O material retido na peneira é lavado com água sob intensa agitação, a fim de liberar a bastnaesita. Após lavagem, o material é classificado em uma peneira rotatória de 2,5 mm de abertura. A fração passante é por sua vez conduzida a um classificador espiral. O produto *overflow* desse estágio é enviado a um circuito de hidrociclones e o *underflow* é recirculado à peneira rotatória. O material *overflow* produzido pelos hidrociclones constitui o primeiro concentrado de bastnaesita. A esse material é adicionado floculante antes de ser submetido às operações de

desaguamento, filtração e secagem. O produto seco apresenta um teor de OTR de 31% e 63% de recuperação [22].

Por outro lado, o material retido na peneira tem granulometria acima de 2,5 mm, sendo moído e enviado ao circuito de flotação para recuperação da barita. O concentrado obtido apresenta um teor de 94% de barita e recuperação de 71,3%. Como o rejeito de flotação apresenta em torno de 15% de bastnaesita, esse produto é tratado através de separação magnética de alta intensidade, obtendo-se um segundo concentrado de terras-raras, que apresenta um teor de OTR de 38,7%. Esse produto é misturado com o primeiro concentrado para produzir um concentrado final com 86% de recuperação.

Como na etapa de beneficiamento foi obtido um concentrado com apenas 38,7% de OTR, valor inferior ao requerido para os subseqüentes processos metalúrgicos, os pesquisadores [22] realizaram ainda ensaios de lixiviação com ácido sulfúrico à temperatura entre 200°C a 300°C, com resultados favoráveis.

Estudos realizados na Comunidade dos Estados Independentes (CEI), terceira na produção mundial de OTR, viabilizaram a extração comercial de terras-raras e aproveitamento de seus grandes depósitos de loparita e apatita. Desses minerais, a mais importante fonte para a extração de terras-raras é a loparita. O tratamento desses minérios é complexo. A CEI desenvolveu uma tecnologia inédita para a obtenção de elementos individuais de terras-raras. Parte dessa produção é destinada ao consumo interno, e outra parte é exportada. Não são conhecidos os processos utilizados para concentração de loparita. No entanto, o tratamento químico realizado, usando como matéria prima concentrado de loparita, consiste de cloração seguida de dissolução com ácido sulfúrico [23,24].

8. ESTUDOS DE CONCENTRAÇÃO NO BRASIL

Poucos estudos têm sido realizados no Brasil visando ao aproveitamento dos depósitos de terras-raras, embora o país detenha grandes reservas potenciais. O Brasil não pode, ainda, contar com um nível de produção compatível ao crescimento de importantes setores de sua economia, devido principalmente à insuficiência de tecnologia.

Os principais depósitos de terras-raras, constituídos de bastnaesita, monazita e xenotímio, encontram-se localizados nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Minas Gerais, Paraná, Amazonas e Goiás. Entre os principais depósitos podem mencionar-se: Poços de Caldas e São Gonçalo do Sapucaí em Minas Gerais, Pitinga no Amazonas, e Córrego do Garimpo em Goiás.

8.1 Depósito de Poços de Caldas

O depósito do Morro do Ferro, pertencente à empresa Minegral S.A., encontra-se localizado no planalto de Poços de Caldas, MG. O minério, de complexa mineralogia, apresenta bastnaesita (12%) como o principal mineral portador de terras-raras, e outros minerais como hematita (18%), goethita (12%), magnetita (15%), gibbsita (20%), caulinita (7%), muscovita (5%), quartzo (10%), biotita e torita constituem a ganga. Segundo estudos realizados por Sampaio et al. [25], a bastnaesita ocorre em partículas muito finas, formando microaglomerados, os quais estão superficialmente impregnados com óxidos de ferro. O teor de OTR no minério é de 3 a 5% [26]. A composição química do minério é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química do minério de Poços de Caldas [25]

Constituinte	%
OTR	3,19
SiO ₂	32,00
Al ₂ O ₃	26,32
ZrO ₂	0,38
P ₂ O ₅	0,41
F	0,30
K ₂ O	3,78
Na ₂ O	2,30
Fe	14,90
ThO ₂	0,79*
U ₃ O ₈	46 ppm

* Teor no minério. O teor de ThO₂ no mineral é 4,9%. (Ref. 1)

Os estudos de concentração do minério de Poços de Caldas, realizados por Sampaio et al. [25], visaram à obtenção de concentrados com teores comerciais, em torno de 50% de OTR. Esses estudos envolveram flotação, separação magnética e concentração gravítica. O esquema de beneficiamento consistiu, primeiramente, na moagem do minério a uma granulometria com P₈₀ abaixo de 74 µm. Os estágios de flotação, realizados em uma célula Denver D12, consistiram de uma flotação primária, três estágios de limpeza e uma flotação secundária. As condições dos ensaios foram: pH da polpa 7,5 a 8,0 ajustado com carbonato de sódio (2 kg/t), adição de silicato de sódio (1 kg/t) e do coletor, condicionamento da polpa por 10 minutos a 80°C, percentagem de sólidos de 18%. Os coletores testados e suas dosagens foram: ácido oléico (0,2 kg/t), *tall oil* (0,5 kg/t), óleo de arroz (2,0 kg/t) e genagen (0,2 kg/t).

Os melhores resultados obtidos foram com a utilização de ácido oléico e condicionamento da polpa a 80°C. No entanto, foram necessários dois a três estágios de limpeza para obter um concentrado com teor de apenas 20% de OTR. A baixa seletividade deveu-se, em parte, à presença de excesso de finos gerados durante a cominuição e ao efeito coletor do ácido oléico

sobre os óxidos de ferro na faixa de pH entre 6 e 8. Procurando otimizar o processo, procederam à separação dos óxidos de ferro, através de separação magnética e gravítica, como estágios prévios à flotação. Com essa finalidade, realizaram ensaios de separação magnética em campo de baixa intensidade 0,3 T (Tesla) conseguindo descartar de 30 a 40% de ferro presente no minério. Em um separador Mozley, realizaram ensaios de concentração gravítica, objetivando separar a ganga leve da bastnaesita (densidade 4,5), e obtiveram um aumento do teor de OTR. Contudo, em ambas as operações de separação, houve um significativo decréscimo da recuperação.

Uma continuação do trabalho de Sampaio et al. [25] foi realizado por Borges et al. [27]. Em vista de que uma significativa proporção de OTR, mais de 50%, encontra-se em uma granulometria muito fina, o minério foi separado em duas frações: maior e menor que 37 μm . A fração +37 μm contém 4,5% OTR e a fração -37 μm , 3,0% OTR. Ensaios de flotação em escala de bancada foram realizados, com ambas as frações, mantendo-se as mesmas condições experimentais do trabalho anterior [25]. Os testes consistiram de uma flotação primária, dois estágios de limpeza e uma flotação secundária. Com a fração +37 μm , obtiveram um concentrado com teor de 23% de OTR e 55,4% de recuperação, enquanto que, com a fração -37 μm , o concentrado apresentou um teor de 7,6% de OTR e 47,7% de recuperação. No entanto, esses resultados não foram satisfatórios, em termos de teor e recuperação, em relação aos padrões comerciais requeridos. Outra dificuldade de aproveitamento desse depósito é alto teor de ThO_2 (4,9%) na bastnaesita, tornando seu nível de radioatividade um inibidor à sua comercialização.

8.2 Minério de São Gonçalo do Sapucaí

O depósito localizado no município de São Gonçalo do Sapucaí, MG, pertence à empresa Samitri S.A. - Mineração da Trindade (Grupo Belgo-Mineira), e é uma das maiores reservas de monazita de origem aluvionar do Brasil [15]. Os principais minerais que compõem o minério são: monazita (4%), zircão (10,8%), rutilo, ilmenita (85,3%) e quartzo. O minério apresenta a seguinte composição química: 3% OTR, 36,7% TiO_2 , 7,7% ZrO_2 , 15,7% SiO_2 e 24,6% Fe. Alguns trabalhos desenvolvidos por Pavez e Peres [15,28,29,30] objetivaram a separação de monazita através de flotação seletiva como uma alternativa aos métodos físicos (gravíticos, magnéticos e eletrostáticos) de concentração.

Estudos de microflotação [15,29] foram realizados utilizando amostras naturais dos minerais; como coletores foram empregados oleato de sódio comercial, octil-hidroxamato de potássio e um hidroxamato comercial fabricado pela Hoechst sob o nome de Flotinor V3759. Os resultados mostraram que em $pH \approx 10,0$ o metassilicato de sódio ($Na_2O:SiO_2$) 1:1 é um excelente depressor de zircão e rutilo, afetando ligeiramente a flotabilidade da monazita. Para esse valor de pH, o hidroxamato comercial apresentou maior eficiência na coleta de monazita em comparação ao oleato de sódio e ao octil-hidroxamato de potássio. O aumento da temperatura de condicionamento favoreceu a seletividade na presença de oleato de sódio, enquanto que com hidroxamato comercial a seletividade não foi alterada pela variação da temperatura.

Com base nos estudos de microflotação, Pavez e Peres [28] efetuaram ensaios de flotação em escala de bancada utilizando os mesmos reagentes mencionados anteriormente. Os ensaios, realizados em uma célula Denver, consistiram de flotação primária e um estágio de limpeza, nas seguintes condições: 30% de sólidos, pH da polpa ajustado em 10,0 com KOH, depressor silicato de sódio (1,2 kg/t), condicionamento por 5 min, adição do coletor e ajuste do pH, condicionamento por 5 min, adição de espumante MIBC (50 g/t) e 1 min de condicionamento. Os

coletores empregados e suas dosagens foram: oleato de sódio (0,525 kg/t) e hidroxamato comercial (0,14 kg/t). Com qualquer um desses coletores, o concentrado final apresentou um teor de OTR acima de 65% e a recuperação foi maior que 75%. Esses resultados, considerados satisfatórios, forneceram uma rota alternativa de beneficiamento, além dos tradicionais métodos físicos de concentração. Atualmente, a empresa Samitri aguarda autorização dos órgãos governamentais vinculados ao meio ambiente para iniciar a exploração do minério em escala industrial.

8.3 Minério de Pitinga

A mina de Pitinga localizada na Província de Presidente Figueiredo (AM), explorada desde 1982 pela Mineração Taboca S.A., empresa do Grupo Paranapanema, é um dos maiores depósitos de cassiterita do mundo. O depósito, de origem primária, com formação de depósitos secundários, apresenta cassiterita, zircão, columbita-tantalita, torita, pirocloro e xenotímio como os principais minerais que compõem o minério. Estudos realizados por Kahn [31] mencionam que o depósito apresenta também conteúdos de criolita, mineral de importante interesse econômico.

O beneficiamento do minério de Pitinga é realizado através de métodos físicos, envolvendo classificação e concentração gravítica em jiques e espirais [31]. Ensaios de concentração em escala piloto, efetuados pela Mineração Taboca S.A., mostraram a possibilidade de se obter concentrados de xenotímio, com um teor de 20% de ítrio, como subproduto da produção de cassiterita. Além de xenotímio, outros minerais também podem ser obtidos, como subprodutos: zircão (40% Zr), niobato-tantalatos (40% Nb₂O₅ e 4% Ta₂O₅) e um misto contendo 90% de xenotímio e 10% de zircão [32].

A Mineração Taboca procurou desenvolver um método adequado que permitisse a separação do produto misto de xenotímio-zircão. No entanto, essa separação tem se mostrado

difícil, uma vez que ambos minerais apresentam propriedades similares, físicas e superficiais. Com tal objetivo, um estudo de separação de xenotímio do zircão foi realizado por Torem e Scorzelli [32,33]. Os resultados de ensaios de microflotação permitiram concluir que na faixa de pH entre 2 e 3, os minerais em questão, tratados previamente com HCl ou com HNO₃, apresentavam alguma seletividade na presença de ácido oléico ou de um ácido graxo denominado comercialmente de DP1-6256; no entanto, os teores dos produtos obtidos não foram considerados satisfatórios.

8.4 Depósito do Córrego do Garimpo

O depósito encontra-se localizado em Catalão, GO, e pertence à empresa Fosfértil S.A., sendo adjacente à jazida de fosfato atualmente explotada. O minério, de complexa mineralogia, apresenta características tipológicas que variam drasticamente com a profundidade. O depósito é constituído de três tipos principais de minérios: silexito, saprolito (laterítico) e carbonatito. O minério saprolítico representa em torno de 75% do total de reservas avaliadas. No silexito, predomina quartzo e outros minerais silicatados de elevada dureza. Por outro lado, o saprolito, que apresenta alto grau de laterização, é de natureza mais frágil.

Estudos de caracterização, realizados por Neumann et al.[34], mostraram que o silexito é constituído por quartzo (70%), monazita (18%), goethita, magnetita e hematita (que no total somam 11%), pirrotita (1%) e outros minerais como piritita, barita, calcita, pirocloro, vermiculita, rabdofânio, ilmenita e martita. O teor de OTR no minério é de 10%. A monazita é o principal mineral portador de terras-raras, porém, encontra-se em faixas granulométricas muito finas (-10 µm). Devido a esse fato, o beneficiamento através de métodos gravíticos e/ou magnéticos é difícil. Por outro lado, o consumo de energia a ser gasto na moagem para a liberação da monazita seria elevado [35]. Além de terras-raras, o minério de Catalão apresenta interesse econômico para o aproveitamento de fosfatos, nióbio e titânio. No

entanto, até o presente não existem estudos orientados ao aproveitamento industrial desses recursos.

8.5 Concentração de Monazita na Usina da INB

A Nuclemon - Mínero Química Ltda. dedicou-se, até 1993, às atividades de prospecção, lavra, beneficiamento e industrialização de minerais pesados que ocorrem em jazidas de origem marinha, nas faixas costeiras dos estados da Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro. A Nuclemon foi incorporada desde 1994 pela empresa Indústrias Nucleares do Brasil - INB. A usina de tratamento físico de minerais pesados, modernizada em 1995, reiniciou a operação em meados de 1996 [6].

Nessa usina central de beneficiamento, na localidade de Buena, município de São João da Barra-RJ, a 70 km de Campos, são obtidos concentrados de zircão, rutilo, monazita e ilmenita. Em São Paulo encontrava-se localizada a usina de Santo Amaro, responsável pelo tratamento químico da monazita, de onde foram obtidos até 1992 cloretos e outros compostos de terras-raras. O tratamento químico deverá ser realizado em São João da Barra-RJ. Atualmente, os concentrados de rutilo, zircão e ilmenita são comercializados, enquanto o concentrado de monazita é estocado para tratamento químico futuro.

As principais etapas de concentração da usina de São João da Barra, mostradas na Figura 4, consistem de secagem, separação eletrostática, separação magnética e separação gravítica [36]. Após classificação do material, a fração -6 mm é submetida a um estágio de pré-concentração em 72 espirais Humphrey e o produto secado a 120°C em um forno rotativo. Antes de seguir para a separação eletrostática, o material é classificado, sendo rejeitada a fração com granulometria acima de 0,6 mm.

Na separação eletrostática primária em alta tensão, o minério seco é separado em dois produtos: não-condutores "NC" (zircão, monazita e quartzo) e condutores "C" (ilmenita e rutilo). Ambas as frações são submetidas à separação eletrostática, sendo os

produtos obtidos conduzidos à separação magnética, e os produtos intermediários recirculados (Figura 4).

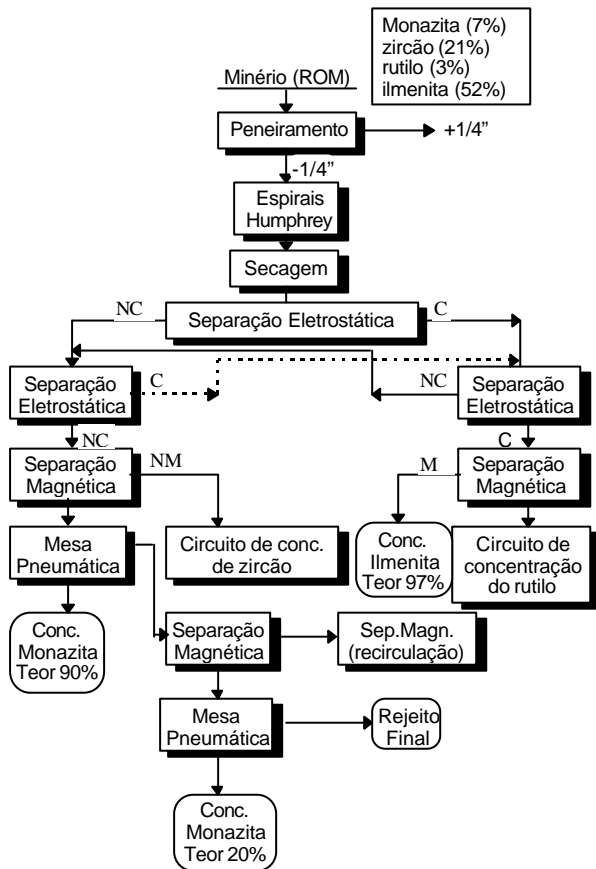


Figura 4 - Fluxograma simplificado da concentração de monazita da usina de São João da Barra-RJ [36]

A separação magnética dos condutores (ilmenita, rutilo) em campo de baixa intensidade, em torno de 0,6 T, permite a obtenção de um concentrado com 97% de ilmenita e um concentrado com 50% de rutilo que por sua vez é conduzido ao circuito de separação eletrostática onde era obtido um produto final com teor de 75%. A separação dos não-condutores (monazita, zircão e quartzo) em campo de alta intensidade, cerca de 1,6 T, permite obter um concentrado magnético "M", contendo monazita, ilmenita e outros minerais magnéticos, e um concentrado não-magnético "NM" que é enviado ao circuito de concentração do zircão.

A separação gravítica do produto magnético é realizada em mesas vibratórias pneumáticas. O teor de monazita na alimentação das mesas é de 40%, sendo obtido um concentrado com teor de 90% de monazita. O rejeito dessa separação gravítica é tratado em separadores magnéticos e em mesas pneumáticas, onde é obtido um segundo concentrado com 20% de teor de monazita.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na atualidade, os principais minerais aproveitados industrialmente para a obtenção de elementos de terras-raras são: monazita, bastnaesita e xenotímio.

Para jazidas de origem marinha e fluvial, como as areias monazíticas associadas ao rutilo, à ilmenita e ao zircão, em geral, o processo de concentração utilizado consiste de uma combinação de métodos físicos: concentração gravítica, separação magnética e separação eletrostática. A monazita é concentrada como subproduto, aproveitando suas diferentes propriedades magnéticas, condutoras e de peso específico em relação aos minerais de ganga. Processos alternativos para a concentração de monazita por flotação foram desenvolvidos. O xenotímio de origem aluvionar também é concentrado por métodos físicos e obtido como subproduto do processamento da cassiterita.

Para jazidas de mineralogia mais complexa, como seria o caso do minério de ferro de Baiyun Ebo e de Mountain Pass, a flotação seletiva é o processo utilizado para a separação da bastnaesita dos minerais de ganga (carbonatos, silicatos e óxidos de ferro). Em ambos os casos, o concentrado de bastnaesita é obtido como produto principal.

Para o caso das terras-raras associadas a solos lateríticos, a minérios fosfáticos, a minérios de nióbio e a minérios fluoríticos, que representam consideráveis volumes de reservas potenciais, no momento, nenhum desses depósitos é aproveitado em escala industrial. No entanto, a longo prazo, podem vir a tornar-se importantes fontes para extração de elementos de terras-raras, desde que sejam desenvolvidos métodos específicos de processamento e estudos de viabilidade técnico-econômica.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fomentado pelo CETEM/CNPq. Um dos autores (Elbert Valdiviezo) agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq pela bolsa de Pesquisador Associado concedida (processo N° 300104/96-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LAPIDO-LOUREIRO, F.E.V. Terras-raras no Brasil: Depósitos, recursos identificados, reservas. *Série Estudos e Documentos* 21, CETEM/CNPq, 189 p, 1994 .
2. ABRÃO, A. Química e tecnologia das terras-raras. *Série Tecnologia Mineral* Nº66. CETEM/CNPQ, 212p, 1994.
3. VIJAYAN, S., MELNYK, A.J., SINGH , R.D. e NUTTALL, K. Rare earths: Their mining, processing, and growing industrial usage. *Mining Engineering*, vol.41, Nº1, p.13-18, 1989.
4. SCORZELLI, I.B., TOREM, M.L. e ANTONELLO, L.L. Flotação de minerais de terras-raras: Uma revisão da literatura. 48º Congresso Anual *ABM*, vol.I, p.29-45, 1993.
5. PRADIP e FUERSTENAU, D.W. The role of inorganic and organic reagents in the flotation separation of rare earth ores. *International Journal of Mineral Processing*, vol.32, p.1-22, 1991.
6. DNPM, Sumário Mineral, Ministério das Minas e Energia, 1996.
7. LAPIDO-LOUREIRO, F.E.V. e NEUMANN, R. Terras-raras no Brasil: revisão dos conceitos de minérios, depósitos e reservas associados a complexos carbonatíticos. In: *Anais do 4º Congresso Brasileiro de Geoquímica*, p.142-143, 1993.
8. ABREU, L.S.P. A crescente importância das células de combustível. *TEMA Tecnologia e Materiais*, Ano II - 3/4, 1996.
9. MORRICE , E. e WONG, M.M. Flotation of rare earths from bastnaesite ore. *Bureau of Mines R.I.* 8689, 13p, 1982.
10. PRADIP e FUERSTENAU, D.W. The adsorption of hydroxamate on semi-soluble minerals. Part I.:

Adsorption on barite, calcite and bastnaesite. *Colloids and Surfaces*, vol. 8, p.103-119, 1983.

11. FUERSTENAU, D.W., PRADIP, KHAN, L.A. e RAGHAVAN, S. An alternate reagent scheme for the flotation of Mountain Pass rare earths. In: *Proceedings of the XIV Int. Min. Processing Congress*, Toronto Oct.17-23, p.IV-61-IV-6.12, 1982.
12. BUREAU OF MINES. Flotation of rare-earths from bastnaesite ore. *Report of Investigations* 8689, 13p, 1982.
13. JIAKE, L. e XIANGYONG, C. Research into the recovery of high-grade rare earth concentrate from Baotou complex iron ore, China. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. M.J. Jones and P.Gill Editors, IMM, p.663-675, 1984.
14. JIAKE, L. e XIANGYONG, C. A new development of mineral processing flowsheet for the treatment of a complex ore containing Fe, rare earths, Nb and F. In: *Proceedings of the XV Int. Min. Processing Congress*, Cannes June 2-9, vol.III, p.474-485, 1985
15. PAVEZ, O. e PERES, A.E.C. Flotation of monazite-zircon-rutile with sodium oleate and hydroxamates. In: *Proceedings of the XVIII Int. Min. Processing Congress*, Sydney May 23-28, p.1007-1012, 1993.
16. VISWANATHAN, K.V., MADHAVAN, T.R. e MAJUMDAR, K.K. Selective flotation of beach sand monazite. *Mining Magazine*, vol.113, N°1, p.17-23, 1965.
17. LOTTERMOSER, B.G. Ore minerals of Mt Weld rare earth element deposit, Western Australia. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy.*, vol.104, p.B157-210, 1995.
18. CHENG, T.W., HOLTHAM, P.N. e TRAN, T. Froth flotation of monazite and xenotime. *Minerals Engineering*, vol 6. N°4, p.341-351, 1993.

19. JIAYING, T., BAOQI, S., ZHENGBING, C. e WENGUANG, L. Study on a new technology of separating seabeach placer with mixed collectors. In: *Proceedings of the XVIII Int. Min. Processing Congress, Sydney May 23-28*, p.1025-1030, 1993.
20. HARADA, T., OWADA, S., TAKIUCHI, T. e KURITA, M. A flotation study for effective separation of the heavy minerals sands. In: *Proceedings of the XVIII Int. Min. Processing Congress, Sydney May 23-28*, p.1017-1024, 1993.
21. CICCUCO, R., CURRELI, L. GHIANI, M. e FUGANTI, A. Beneficiation of a Turkish bastnaesite ore with associated fluospar and barite. In: *Proceedings of the XVIII Int. Min. Processing Congress, Sydney May 23-28*, p.1083-1088, 1993.
22. MERKER, G., SCHULZ, G. e RICHTER, H. A processing technology for heavily weathered rare earth ores of Dong Pao-Vietnam. In: *Proceedings of the XVII Int. Min. Processing Congress, Dresden Sept.23-28*, vol.IV, 1991.
23. KOSYNKIN, V.D., MOISEEV, S. D., PETERSON, C. H. e NIKIPELOV, B. V. Rare earths industry of today in the Commonwealth of Independent States, *Journal of Alloys and Compounds*, 192, p.118-120, 1993.
24. SKOROVAROV, J. I., KOSYNKIN, V. D., MOISEEV, S. D. e RURA, N. N. Recovery of rare earth elements from phosphorites in the USSR, *Journal of Alloys and Compounds*, 180, p.71-76, 1992.
25. SAMPAIO, J.A., LINS, F.F. e PORPHIRIO, N.H. Concentração do minério de terras-raras de Poços de Caldas-MG. In: *Anais do XIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Salvador (BA) 9-12 set.*, 1990.

26. PAVEZ, O., LOPEZ CANÇADO, R.A. e PERES, A.E.C. Caracterización tecnológica de una mena de tierras-raras de Morro do Ferro, In: *Anais do IV Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral*, vol. IV, Concepción, Chile, 20-23 nov., 1994.
27. BORGES, J.A.L., ALMEIDA, S.L.M., COSTA, L.S.N., SAMPAIO, J.A. e CHAVES, A.A.P. Studies on the flotation of rare-earths ore from Poços de Caldas (MG)-Brazil. In: *Proceedings of the IV Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology*, vol.II, Chile nov. 20-23, 1994.
28. PAVEZ, O. e PERES, A.E.C. Bench scale flotation of a Brazilian monazite ore. *Minerals Engineering*, vol.7, n.12, p.1561-1564, 1994.
29. PAVEZ, O.F. e PERES, A.E.C. Microflotação de monazita, zirconita e rutilo utilizando metassilicato de sódio como depressor. In: *Anais do XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*, São Lourenço, 13-16 set., Vol. Flotação, p.232-247, 1992.
30. PAVEZ, O., BRANDÃO, P. R. G. e PERES, A. E. C. Adsorption of oleate and octyl-hydroxamate on to rare-earths minerals, *Minerals Engineering*, vol.9, Nº3, p.357-366, 1996
31. KAHN, H. Concentração dos minerais pesados do minério primário de Pitinga, AM. In: *Anais do XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*, São Lourenço 13-16 set., vol. 1, Parte A, p.409-439, 1992.
32. SCORZELLI, I.B. e TOREM, M.L. Studies on the flotation of xenotime and zircon from a typical Brazilian cassiterite ore. In: *Proceedings of the XIX Int. Min. Processing Congress*, San Francisco (EUA), vol. 3, 1995.
33. TOREM, M.L. e SCORZELLI, I.B. Influência do pré-tratamento com HF na flotabilidade de xenotima e

- zirconita. In: *Anais do XVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*, Rio de Janeiro 3-6 set., vol.I , p.295-307, 1995.
34. NEUMANN, R., ALMEIDA, S.L.M. e DASSIÉ, M.V.C. Technological characterization of the Córrego do Garimpo (Catalão, GO-Brazil) rare earth ore. In: *Proceedings IV Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology*, vol.I, Chile 20-23 nov., 1994.
 35. BORGES, J.A.L., ALMEIDA, S.L.M. e COSTA, L.N. Beneficiamento de Minérios de Terras-raras: Minério do Córrego do Garimpo. RT12/95, CETEM/CNPq. 45p.
 36. LUZ, A.B. e ALMEIDA, S.L.M. Manual de Usinas de Beneficiamento, Rio de Janeiro, CETEM/CNPq, 1989, 201p.

EXTENDED ABSTRACT

The industrial importance of rare earth elements lies in the numerous applications where they are employed as essential components in alloys, oxides and various compounds. The areas involved are more than 150, among which the most important ones are the metallurgical, ceramics, glasses, electronics, chemicals, optical, nuclear, magnets, illumination and miscellaneous uses.

Despite the wide range of industrial applications, only a few are large volume consumers of rare earths. Most rare earth users consume only small amounts. The largest consumption (99%) is as rare earths non separated and only 1% is used as individual elements. In 1990, the pattern of rare earths consumption was catalysis (36%), metallurgy (31%), glass/ ceramics (30%) and other uses (3%).

For conventional applications, there is limited demand for rare earth elements. But the demand for specific rare earths such as lanthanum, cerium, neodymium, samarium, yttrium and scandium is expected to increase rapidly in the near future because of recent developments in the use of these elements in high-technology applications including high intensity supermagnets, lasers and superconducting materials.

More than 95% of the world's rare earth elements occurs in the form of three minerals: monazite and bastnaesite, containing predominantly light rare earths, and xenotime consisting of the heavy rare earths and yttrium. Apatite and loparite are also commercial sources of the lanthanides and yttrium.

Brazil has large reserves of rare earth ores. Although more than 99% of Brazilian identified rare earth resources are related to carbonatitic and lateritic environment. From the total reserves (about 29 millions t), approximately 4% are considered viable economically.

Among the viable reserves, should be mentioned the placers than occurs in beach sands of the deposits litoral of Rio de

Janeiro state and the river sands localized in Pitinga (Amazonas) and São Gonçalo do Sapucaí (Minas Gerais).

Among the potential resources should be mentioned the deposits of Córrego do Garimpo, Catalão (Goiás), Morro do Ferro (Minas Gerais) and Mato Preto (Paraná).

At present, the majority of brazilian reserves are not processed, however, in the long term these can be transformed in important sources for the rare earths extraction, if specific methods of treatment are developed.

The purpose of the present work is to discuss the processing methods for the recovery of rare earths. Normally, monazite and xenotime that occur in beach and river sands are recovered industrially by a combination of gravity, magnetic and electrostatic methods. In most cases, monazite and xenotime are a by-product in the processing of sands for ilmenite, rutile, cassiterite and zircon.

Froth flotation is a concentration method mostly used in rare earths processing of ores of more complex mineralogy such as the bastnaesite of Mountain Pass ore in California, USA, and the Baotou deposit in China.

In Brazil, concentration studies were performed on Morro do Ferro, São Gonçalo do Sapucaí, Pitinga and Córrego do Garimpo ores. Concentration tests involving froth flotation and gravitic and magnetic separation were performed by CETEM with the ore from Morro do Ferro. However, the results were not satisfactory due to the complex mineralogy and high grade of thorium (4.9%) in the ore which made difficult to get a concentrate of commercial grade.

The concentration studies, at bench scale, performed with the ore from São Gonçalo do Sapucaí indicated that it is possible to produce a high purity concentrate (> 60% REO and 75% recovery). These results using froth flotation give an alternative route to physical methods. At present, SAMITRI company is waiting for a permission from the state government environmental agency to proceed with exploration.

The processing of Pitinga ore is performed through physical methods involving gravity concentration. Taboca Mining produce a middling concentrate of xenotime (90%) and zircon (10%). Other subproducts are also obtained in the cassiterite beneficiation plant at Pitinga Mine such as zircon and xenotime (20%) concentrates.

The Córrego do Garimpo is a very promising deposit of rare earth due to the grade, reserves (about 680.000 t REO) and relatively slow grade of thorium. The deposit is formed for three types of ores: silixite, saprolitic (lateritic) and carbonatitic. The concentration of silixite ore was studied at CETEM and the results showing that the monazite due the fine size of liberation (less than 10 μm) excludes the possibility of an economic feasible physical treatment. The intense grinding needed for liberation of the rare earth mineral in this silixite, an extremely hard rock, involve high consumption of energy.