



Tratamento térmico para desfosfatização de monazita e recuperação dos elementos das terras raras

Ana Carolina Santos de Souza¹ 
Luiz Rogério Pinho de Andrade Lima^{1*} 

Resumo

O Brasil tem a segunda maior reserva de monazita, que é um dos três principais minerais contendo elementos das terras raras. Neste estudo foi utilizado um concentrado de monazita, oriundo da ocorrência de minerais pesados nas faixas costeiras dos estados da Bahia e do Espírito Santos. Foi avaliada também a melhor forma de análise das soluções aquosas ricas em terras raras por ICP-OES. Neste trabalho as etapas usadas para obter uma solução aquosa rica em terras raras oriundos do concentrado de monazita envolveram as seguintes etapas: adição de NaOH ao concentrado, aquecimento a temperatura de 400 °C por 3 horas, lavagem com água e posterior lixiviação do rejeito com HCl. Foram realizadas caracterizações químicas e mineralógicas nos produtos deste processo e os resultados indicaram que o concentrado inicial é rico em terras raras leves, o produto da fusão alcalina é composto predominantemente por hidróxidos de terras raras e livre de NaOH. O rejeito da lixiviação ácida mostrou-se rico em zirconita, indicando que a dissolução dos hidróxidos de terras raras formados na etapa anterior foi completa. As interferências espectrais nas raias dos elementos predominantes foram consideradas nas análises por ICP-OES usando padrões individuais destes elementos. Foram definidas as seguintes raias para os elementos predominantes: Ce 456,236 nm, Th 283,730 nm, La 384,902 nm, Nd 430,058 nm, Pr 390,844 nm, e Sm 428,079 nm. A lixívia obtida após a lixiviação ácida dos hidróxidos de terras raras foi analisada por este método e as concentrações dos elementos predominantes (em g/L) foram: Ce 32,81, Th 14,76, La 8,58, Nd 3,35, Pr 3,02 e Sm 1,28.

Palavras-chave: Terras raras; Monazita; ICP-OES; Lixiviação.

Thermal treatment for monazite defostatization and rare earth recovery

Abstract

Brazil has the second largest reserve of monazite, which is one of the three main minerals bearing of rare earth elements. In this study, a monazite concentrate, derived from the occurrence of heavy minerals in the coastal strips of the states of Bahia and Espírito Santos, was used. The best way to analyze aqueous solutions rich in rare earths by ICP-OES was also evaluated. In this work, the steps used to obtain an aqueous solution rich in rare earths from the monazite concentrate involved the following steps: addition of NaOH to the concentrate, heating at 400 °C for 3 hours, washing with water and subsequent leaching of the remaining solid phase with HCl. Chemical and mineralogical characterizations were accomplished on the products of this process and the results indicated that the initial concentrate is rich in light rare earths, the alkaline fusion product is predominantly composed of rare earth hydroxides and free of NaOH. The acid leaching tailings showed to be rich in zirconite, indicating that the dissolution of the rare earth hydroxides formed in the previous step was complete. Spectral interferences in the lines of the predominant elements were considered in the ICP-OES analysis using individual patterns of these elements. The following lines were defined for the predominant elements: Ce 456.236 nm, Th 283.730 nm, La 384.902 nm, Nd 430.058 nm, Pr 390.844 nm, and Sm 428,079 nm. The leachate obtained after acid leaching of rare earth hydroxides was analyzed by this method and the concentrations of the predominant elements (in g/L) were: Ce 32.81, Th 14.76, La 8.58, Nd 3.35, Pr 3.02, and Sm 1.28

Keywords: Rare earth; Monazite; ICO-OES; Leaching.

¹Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, BA, Brasil.

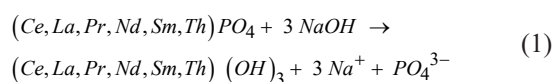
*Autor correspondente: lelo@ufba.br



1. Introdução

Elementos das terras raras são usados em várias aplicações de alta tecnologia, como na produção de dispositivos eletrônicos, na produção de energias renováveis, nos setores automotivo e petroquímico, assim como em aplicações em medicina e em defesa [1,2]. O Brasil tem a segunda maior reserva de monazita, que é um dos três principais minerais destes elementos, em areias encontradas em seu cordão litorâneo. A monazita, que é um fosfato de terras raras leves e tório ((Ce,La,Pr,Nd,Sm,Th)PO₄) é concentrada usando métodos gravimétricos, magnéticos e eletrostáticos [3,4]. As areias monazíticas são inicialmente submetidas à separação gravimétrica para a remoção da sílica e carbonatos. O concentrado gravimétrico passa por uma separação magnética para retirada da ilmenita, usando ímãs com intensidades diferentes, por fim é realizada a separação eletrostática, para a obtenção de um concentrado de monazita de alto teor [3,4]. O concentrado de monazita é tratado por processos piro ou hidrometalúrgicos visando a retirada do tório e a produção de compostos dos elementos das terras raras, sobretudo dos óxidos de alta pureza. A abertura química da monazita contida no concentrado pode ser realizada por digestão ácida ou alcalina, com ácido sulfúrico ou com hidróxido de sódio, em temperatura elevada [3-5].

Na rota alcalina, as condições ideais para lixiviação do concentrado de monazita são: i) temperatura de 140 °C, ii) relação molar NaOH/monazita de 2:1, iii) tempo de lixiviação de 180 minutos, mas deve ser considerado que o concentrado deve ter tamanho de partículas abaixo de 74 µm (200 malhas Tyler), a solução de hidróxido de sódio deve ser concentrada entre 30 e 70%, a temperatura da reação para alguns casos deve ser mantida entre 140 e 200 °C, e o tempo de reação pode ser de 3 a 9 horas. Neste processo, a monazita é transformada em fosfato trissódico, que pode ser usado como um fertilizante, enquanto os elementos das terras raras são transformados em hidróxidos insolúveis, como mostra a reação 1 [3-5]:



A lixiviação alcalina da monazita pode ser feita simultaneamente com a moagem em um moinho-autoclave, o que reduz o tempo de lixiviação [6]. Estudos sobre a desfosfatização (lixiviação alcalina) e lixiviação ácida de monazita sul coreana foram conduzidos recentemente visando otimizar o processo. Foi usado neste processo uma solução de NaOH 50%, uma temperatura de 170 °C, uma relação sólido:líquido de 0,1 e um tempo de reação de 4 h. A conversão de monazita em hidróxidos foi de 99.99%. Os hidróxidos de terras raras foram lixiviados com uma solução de HCl 6 N, numa temperatura de 90 °C, numa relação sólido:líquido de 0,06 e um tempo de reação de 2 h. A extração dos elementos das terras raras foi de 95% [7].

Processos em temperatura elevada, como fusão alcalina, foram propostos para conversão da monazita em compostos mais facilmente lixiviáveis [8-10]. A monazita pode reagir com cloreto de cálcio e carbonato de cálcio em temperaturas de 977 e 1187 °C, respectivamente ou com carbonato de sódio em temperatura de 900 °C, ambas as rotas em atmosfera redutora e sulfetada para formar como produto oxi-sulfetos de terras raras (*i.e.*, M_xO_yS_z, tais como La₂O₂S, Ce₂O₂S, etc), além de óxido rico em tório, fosfato trissódico e uma mistura de fosfato de elemento das terras raras e sódio. Nestes processos o fosfato é separado a partir de uma lixiviação com água em temperatura ambiente por 2 horas. Os elementos das terras raras são extraídos do resíduo por uma lixiviação com ácido clorídrico. Nestes processos a decomposição da monazita é rápida e a separação das terras raras é simples [8,9].

A fusão alcalina da monazita pode ser feita, também, com NaOH em temperatura de 400 °C. Usando uma razão mássica de 1:1, 2 horas de reação, lavagem com água, secagem e posterior lixiviação dos sólidos resultante com uma solução de HCl 6M, temperatura de 80 °C, concentração de sólidos de 30g/L e um tempo de reação de 2 horas. A recuperação dos elementos das terras raras foi superior a 95% [10].

A análise de elementos das terras raras é uma tarefa difícil devido às semelhanças e similaridade entre os elementos, o que ocasiona inúmeras interferências. Um dos métodos analíticos mais usados é a espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), entretanto, esta técnica também apresenta interferências espectrais relacionadas à superposição de raias de emissões, que dependem do tipo do equipamento usado, do sistema de introdução de amostra e fonte de excitação [11,12]. Amostras geológicas apresentam composição química complexa o que aumenta a possibilidade de interferência espectral. Ao longo dos anos, tabelas de comprimentos de onda foram elaboradas para fornecer orientação na seleção de raias analíticas a serem usadas no ICP-OES, entretanto estas tabelas têm limitações pois dificilmente representam a real composição das soluções oriundas de preparação de amostras geológicas, sendo necessário avaliar de forma experimental a região espectral em torno de cada comprimento de onda analítico escolhido a fim de estabelecer as raias espectrais livre de interferências de forma segura [12-15].

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do método de fusão alcalina seguido por lixiviação ácida para o tratamento de um concentrado industrial de monazita e indicar as raias espectrais mais adequadas para uso no ICP-OES visando reduzir o efeito das interferências espectrais na avaliação da composição de elementos das terras raras contidos na lixívia.

2 Materiais e métodos

Neste trabalho foi utilizada uma amostra fornecida pela INB – Indústrias Nucleares do Brasil - Unidade de

Buena, município de São João da Barra - RJ. Oriunda da ocorrência de minerais pesados, nas faixas costeiras do sul dos estados da Bahia e do Espírito Santos e no Norte do Estado do Rio de Janeiro. Nesta usina, as etapas do tratamento físico incluíam a concentração gravimétrica com espirais, para separação das frações pesadas (*i.e.*, monazita, ilmenita, zirconita e rutilo) do rejeito, que retornava para obturação da cava e reconstituição do terreno. A usina de beneficiamento secundário incluía a separação dos minerais pesados por concentração magnética de alta intensidade e concentração eletrostática. Deste processo obtinha-se o concentrado de monazita (*i.e.*, denso, não condutor e fracamente magnético).

Para avaliar a dissolução dos elementos das terras raras contidos no concentrado de monazita foi realizado um ensaio de fusão alcalina. Uma amostra do concentrado foi misturada em um cadinho de níquel com excesso estequiométrico de hidróxido de sódio. Esta mistura foi aquecida em uma mufla a uma temperatura de cerca de 400 °C, uma vez que a fusão do hidróxido de sódio ocorre a 318 °C, e deixado reagir por 3 horas. Após o resfriamento, a mistura foi lavada com água deionizada para a retirada do excesso de hidróxido de sódio e o fosfato de sódio formado. O resíduo desta primeira etapa foi, posteriormente, secado em estufa a 60 °C. Este rejeito foi fragmentado e uma parte usada para análise mineralógica. O restante foi usado para lixiviação com ácido clorídrico concentrado. Posteriormente a solução foi filtrada, a lixívia clorídrica recolhida em um balão volumétrico e o rejeito sólido encaminhado para análise mineralógica.

A composição química do concentrado de monazita foi determinada por fluorescência de raios-X usando o Shimadzu XRF 1800. As análises mineralógicas foram feitas com o difratômetro Shimadzu XRD-6000 com fonte de cobre. A identificação das fases cristalinas foi realizada usando os programas X Powder e X'Pert HighScore e a base de dados PDF-2 (*Powder Diffraction File do International Center for Diffraction Data*).

Para os procedimentos analíticos descritos neste estudo, foi utilizado um ICP-OES, PerkinElmer 3000DV, equipado com um nebulizador de fluxo cruzado, um injetor de alumina de 2,0 mm di e uma câmara de pulverização Rytton Scott. As curvas de calibração foram obtidas a partir de um branco e padrões preparados em laboratório a partir de padrões de 1000 ppm da Specsol. As condições operacionais e os parâmetros instrumentais foram: potência incidente de 650 W, frequência 60 Hz, fluxo de gás de plasma 0,91 L/min, fluxo de gás portador 0,81 min⁻¹, fluxo de gás refrigerante 7,51 L/min, taxa de captação 3,0 L/min, altura de observação acima da bobina de 10 mm, temperatura de aquecimento do nebulizador ultrassônico de 130 °C e temperatura de resfriamento de 3 °C.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização química e mineralógica do concentrado de monazita

A composição química do concentrado industrial de monazita é apresentada na Tabela 1.

Observa-se que os elementos mais abundantes são o Ce, La, Nd, P, Th, Zr e Sm. Cério, lantânio e neodímio correspondem a mais de 60%, caracterizando a amostra como uma fonte de terra rara leve.

As Figuras 1 e 2 apresentam os difratogramas do concentrado de monazita, da monazita tratada por fusão com NaOH e da monazita tratada por fusão com NaOH e lixiviada com HCl.

Nota-se que o concentrado de monazita é rico em cério e apresenta traços de algum silicato, possivelmente vermiculita ((MgFe,Al)₃(Al,Si)₄O₁₀(OH)₂), mas em pequena quantidade. O produto da fusão da monazita com hidróxido

Tabela 1. Composição química do concentrado de monazita

Pseudo-óxidos	Concentração (%)
CeO ₂	34,8
La ₂ O ₃	16,2
Nd ₂ O ₃	13,5
P ₂ O ₅	7,9
ThO ₂	7,5
ZrO ₂	4,9
Sm ₂ O ₃	2,5
Pr ₂ O ₃	2,4
SiO ₂	1,7
Y ₂ O ₃	1,5
NiO	1,4
Gd ₂ O ₃	1,3
TiO ₂	0,8
Fe ₂ O ₃	0,6
Al ₂ O ₃	0,3

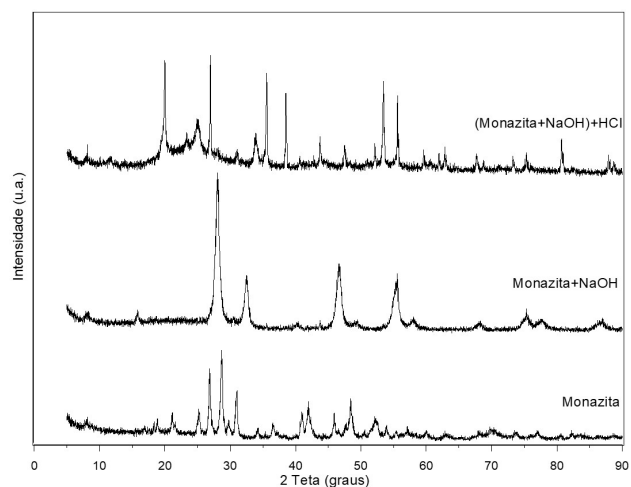
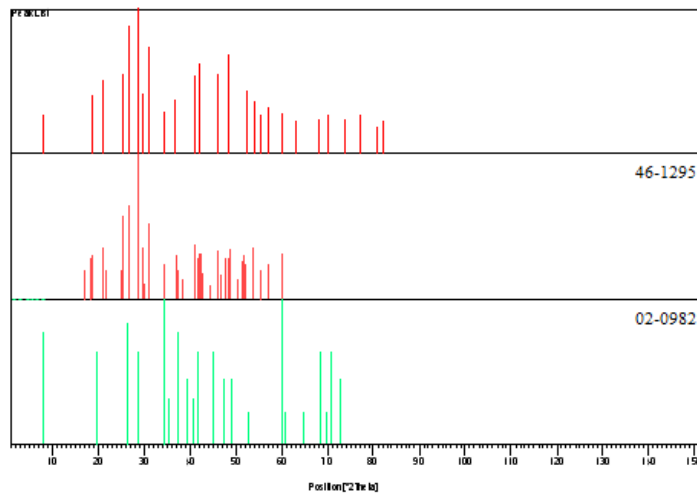
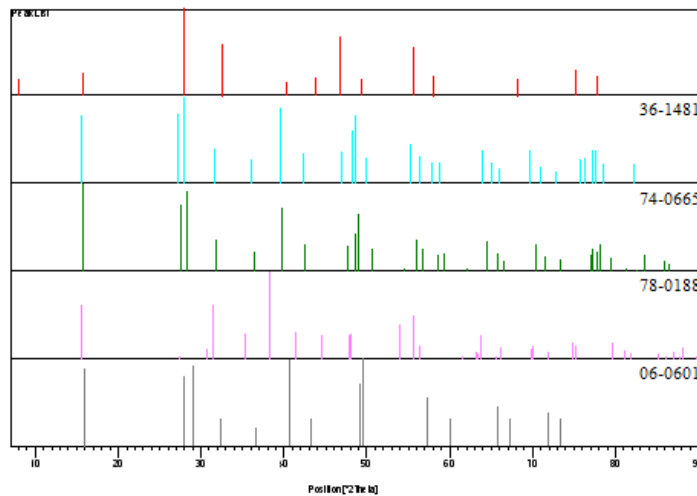


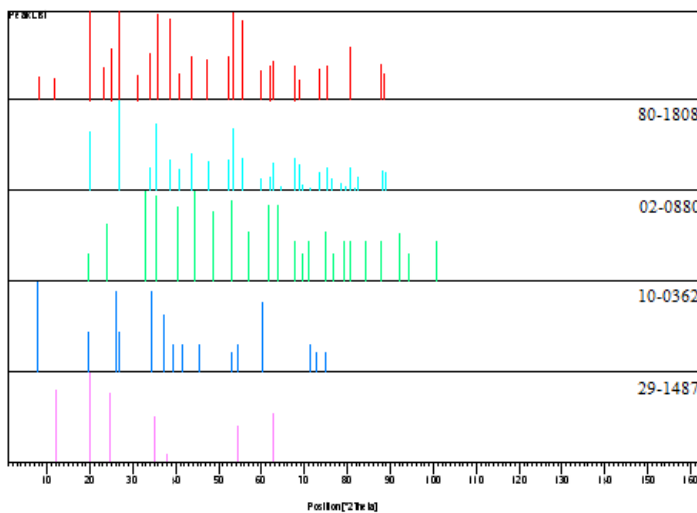
Figura 1. Difração de raios-X do concentrado de monazita, da monazita tratada por fusão com NaOH e da monazita tratada por fusão com NaOH e lixiviada com HCl.



46-1295 Monazita-(Ce), 02-0982 Vermiculita
(a)



36-1481 $\text{La}(\text{OH})_3$, 74-0665 $\text{Ce}(\text{OH})_3$, 78-0188 NaOH, 06-0601 $\text{Nd}(\text{OH})_3$
(b)



80-1808 Zirconita, 02-0880 Ilmenita, 10-0362 Hidrobiotita, 29-1487 Meta-halosita
(c)

Figura 2. Difração de raios-X do: (a) concentrado de monazita; (b) da monazita tratada por fusão com NaOH; e (c) da monazita tratada por fusão com NaOH e lixiviada com HCl.

de sódio, mostra a forte presença de hidróxidos de Ce, La e Nd e a ausência de hidróxido de sódio, originalmente usado na fusão, indicando que seu consumo ou degradação térmica foi total. Nota-se aí a ausência do padrão de difração da monazita, o que indica ter sido a conversão deste fosfato em hidróxidos bem-sucedida na temperatura usada. O resíduo obtido após esta lixiviação ácida é rico em zirconita com alguma ilmenita e biotita, indicando que a lixiviação dos hidróxidos dos elementos das terras raras foi completa. Nota-se, aqui também, a ausência dos padrões de difração da monazita ou dos hidróxidos dos elementos das terras raras.

3.2 Seleção de raias espectrais dos elementos das terras raras para análise por ICP-OES

A análise dos elementos das terras raras contidos na lixívia ácida foi avaliada usando mais de uma linha de emissão do ICP-OES [13-15]. As raias foram pré-selecionadas usando dados da literatura. A Figura 3, por exemplo, mostra a região entre 384,773 e 384,973 nm e a intensidade de emissão das raias espectrais para diversos elementos das terras raras em concentrações entre 100 e 1000 mg/L. Nota-se neste caso em particular que a raia de emissão espectral do lantânio em 384.902 nm tem uma importante sobreposição com uma das raias do disprósio, do samário e do promécio. Entretanto, para amostras com altas concentrações de lantânio e baixas concentrações destes elementos, como ocorre no caso da lixiviação da monazita, estas interferências são desprezíveis e esta raia espectral pode ser usada com segurança para análise de lantânio.

A viabilidade das raias espectrais para análise dos elementos das terras raras foi avaliada individualmente usando soluções padrões separadas e misturadas. Inicialmente procedeu-se a seleção de 4 a 6 raias espectrais mais proeminentes de cada elemento. Estas raias são apresentadas na Tabela 2. As melhores raias espectrais foram selecionadas de acordo com as intensidades apresentadas e a ausência de interferências.

Para o cério foram selecionadas 6 raias comuns neste tipo de estudo: 413,764; 418,660; 413,380; 393,108; 456,236 e 401,239 nm. Analisando as raias 413,764; 418,660; 413,380; 393,108 e 401,239 nm percebeu-se que as mesmas poderiam sofrer interferências espectrais a partir da emissão de outras raias de elementos que poderiam ser encontrados em quantidades relevantes na amostra como o: praseodímio (413,753; 418,948; 414,311 nm), neodímio (418,663; 401,225 nm) e urânio (401,913 nm). Para o cério foi selecionada a linha 456,236 nm, que pode sofrer interferências espectrais a partir da emissão do cério (455,531 nm) e do argônio (458,929 nm), elementos não encontrados na amostra.

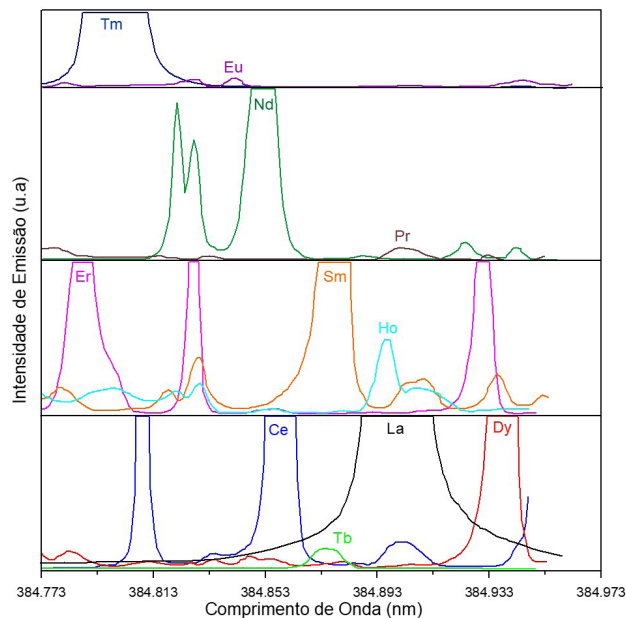


Figura 3. Interferência espectral na região de 384,773 e 384,973 nm. Curvas de intensidade de emissão versus comprimento de onda para solução aquosa com 5 mg/L de Tb, soluções com 1000 mg/L de La, Ce, Sm, Tb, Dy, Ho, e Er e soluções com 100 mg/L de Pr, Nd, Eu, Gd, Tm, Yb, Lu e Y. Adaptado de Huang et al. [15].

Tabela 2. Raias espectrais selecionadas por elemento [12-15]

Elemento	Ce	La	Gd	Nd	Dy	Pr
Comprimento de onda (nm)	413,764	408,672	342,247	406,109	353,170	390,844
	418,660	379,478	336,223	401,225	394,468	414,311
	413,380	407,735	335,047	430,358	396,839	422,293
	393,108	403,169	308,199	424,738	407,796	
	456,236	384,902				
	401,239					
Elemento	U	Y	Th	Sm	Eu	Tb
Comprimento de onda (nm)	385,958	371,029	283,730	381,967	283,730	350,917
	367,007	324,227	401,913	412,970	401,913	384,873
	409,014	360,073	339,204	393,048	339,204	
	393,203			428,079	412,970	
	424,167					
	342,247					
Elemento	Ho	Er	Yb	Lu	Tm	Sc
Comprimento de onda (nm)	345,600	337,271	328,937	261,542	313,126	361,383
	339,898	349,910	369,419	291,139	346,220	357,253
	346,426	339,200	289,138	219,554		

Tabela 3. Raias espectrais e curvas de calibração

Elemento	Raia espectral (nm)	Curva de calibração:	
		Intensidade (cps) = α x Concentração (mg/L) + β	
		α	β
La	384,902	603,556	248,452
Ce	456,236	99,108	43,958
Nd	430,058	650,307	181,227
Pr	390,844	699,459	309,134
Sm	428,079	203,034	7,219
Eu	412,970	12409,758	- 1651,467
Gd	342,247	703,343	102,269
Tb	350,917	246,693	- 8,916
Dy	353,170	1077,476	- 2,596
U	367,007	33,867	- 3,302
Th	283,730	13,595	- 2,879
Ti	334,940	833,626	338,813
P	213,617	5,002	- 0,480
Fe	238,204	149,888	38,026
Ho	345,600	877,796	- 15,588
Er	349,910	479,977	7,944
Y	360,073	2292,020	- 84,072
Yb	289,138	401,865	21,920
Lu	291,139	513,914	95,734
Sc	361,383	9164,640	- 211,150

Na seleção da linha ótima do lantânio, as raias 408,672 e 379,478 nm foram descartadas por apresentarem coincidências espectrais com cério, praseodímio e neodímio. As raias 407,735 e 403,169 nm também foram descartadas porque podem apresentar interferências espectrais a partir da emissão do cério (407,585 nm) e do gadolínio (403,298 nm). Desta forma foi selecionada a linha com menor interferências: a 384,902 nm.

Para o gadolínio foi selecionada a linha 432,247 nm, as demais raias apresentavam coincidência espectral com elementos relevantes da amostra, praseodímio (336,213 nm) e neodímio (335,054 nm). A linha ótima selecionada para o neodímio, foi a de 424,738 nm. As raias 430,358 e 406,109 nm apresentaram coincidências espectrais com o praseodímio (430,350; 406,117 nm) e com o gadolínio (406,126; 430,348 nm). Enquanto a linha 401,225 nm pode vir a apresentar interferências espectrais a partir da emissão de cério (401,239 nm) e do praseodímio (400,869 nm). As raias analíticas identificadas em negrito na Tabela 2, representam as raias mais relevantes observadas na avaliação espectral inicial. As raias selecionadas são apresentadas na Tabela 3, juntamente com as curvas de calibração (Figura 4).

Os elementos não selecionados apresentaram bastante interferência ou não estavam presentes na amostra em concentrações relevantes. A linearidade das curvas de calibração foi estudada em uma faixa de concentração entre 0, 1, 2, 4, 8, 14 e 16 mg/L. As curvas de calibração resultantes confirmam boa linearidade no intervalo de concentração estudada.

A Tabela 4 mostra os resultados analíticos dos principais elementos, contidos na lixívia obtida após a lixiviação ácida dos hidróxidos dos elementos das terras raras resultantes da fusão alcalina da monazita.

Tabela 4. Raias espectrais e resultados analíticos

Elemento	Raias espectrais (nm)	Concentração na lixívia (g/L)
Ce	456,236	32,81
Th	283,730	14,76
La	384,902	8,58
Nd	430,058	3,35
Pr	390,844	3,02
Sm	428,079	1,28
Gd	342,247	0,55
U	367,007	0,46
Y	360,073	0,38
Dy	353,170	0,12
Fe	238,204	0,11
Ti	334,940	0,10
Er	349,910	0,10
Yb	289,138	0,04
P	213,617	0,04
Eu	412,970	0,02
Tb	350,917	0,01
Ho	345,600	0,01
Sc	361,383	0,01
Lu	291,139	<0,02

Nota-se que as concentrações dos elementos predominantes são: Ce 32,81, Th 14,76, La 8,58, Nd 3,35, Pr 3,02 e Sm 1,28 g/L. Estas concentrações relativamente altas indicam que o método de fusão alcalina com hidróxido de sódio seguido por ataque com ácido clorídrico é adequado para tratar monazita e a lixívia gerada pode ser usada para separação de tório e dos elementos das terras raras leves visando a produção de compostos destes elementos.

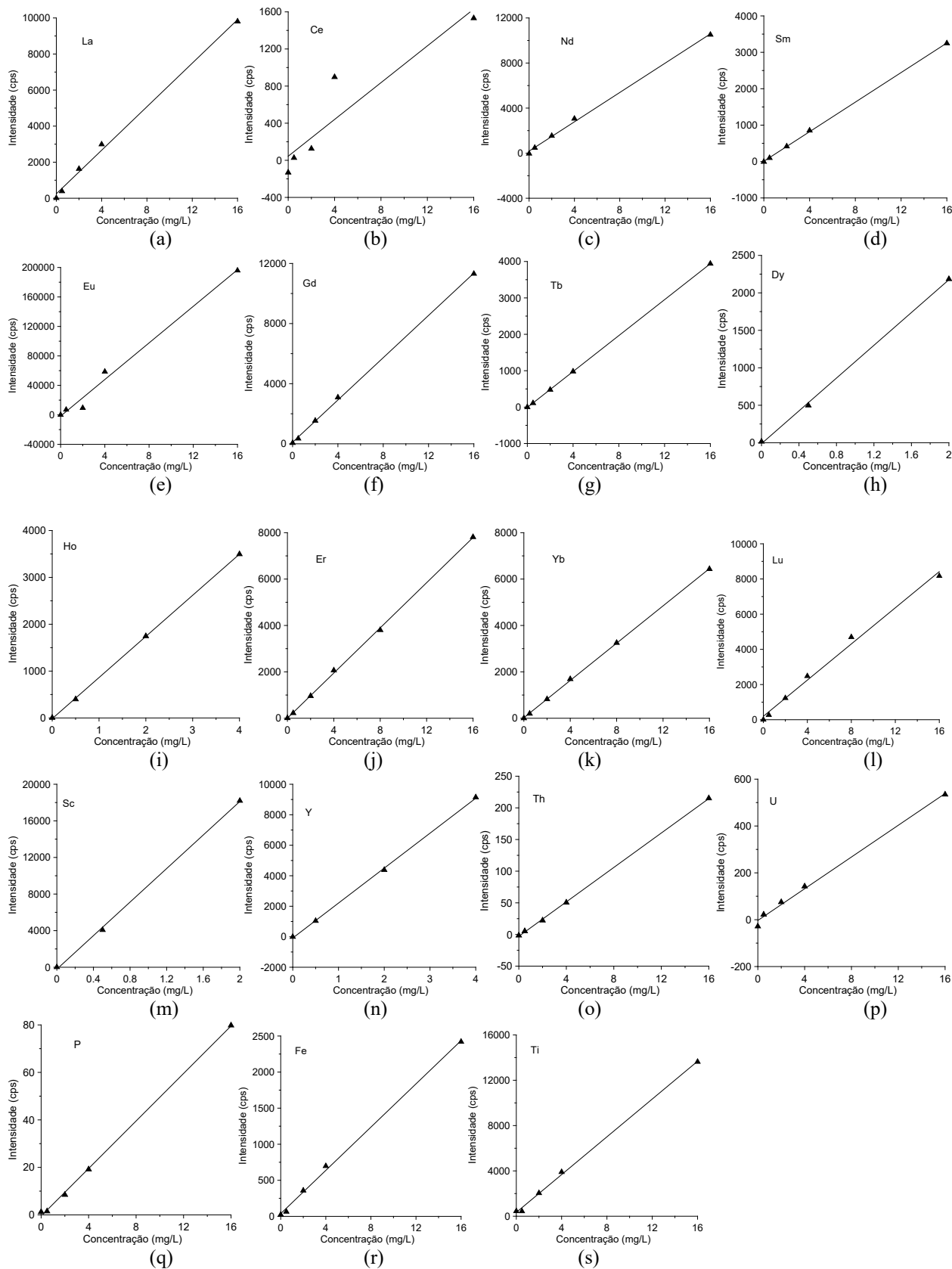


Figura 4. Curvas de calibração para os elementos das terras raras no ICP-OES: (a) La; (b) Ce; (c) Nd; (d) Sm; (e) Eu; (f) Gd; (g) Tb; (h) Dy; (i) Ho; (j) Er; (k) Yb; (l) Lu; (m) Sc; (n) Y; (o) Th; (p) U; (q) P; (r) Fe; (s) Ti.

4 Conclusões

O tratamento de concentrados da monazita geralmente ocorre através de digestão ácida ou alcalina. O presente trabalho apresenta um método alternativo as rotas convencionais, ao realizar a fusão com NaOH. Os testes de lixiviação subsequentes com HCl, se apresentaram eficazes, uma vez que o resíduo obtido após a lixiviação é rico em zirconita. Conclui-se que se trata de um método simples e eficaz, obtendo a abertura da amostra em temperatura moderada, com reagente e equipamentos simples.

O trabalho investigou também as interferências espectrais nas raias dos elementos predominantes usando padrões individuais dos elementos potencialmente presentes, como: terras raras, tório, urânio, ferro, titânio e outros. O estudo forneceu novos dados sobre as interferências espectrais das terras raras e do tório. As melhores linhas de análise são influenciadas não apenas pela intensidade, mas também pela ausência de interferências de outras linhas. O alto nível de

interferência de linha restringe os limites de detecção a níveis significativamente altos, em comparação com os limites de detecção reportados na literatura ou informado pelos fabricantes dos equipamentos analíticos. Foram escolhidas as seguintes raias para os elementos predominantes: Ce 456,236 nm, Th 283,730 nm, La 384,902 nm, Nd 430,058 nm, Pr 390,844 nm, e Sm 428.079 nm. A lixívia obtida após a lixiviação ácida dos hidróxidos de terras raras foi analisada por este método e as concentrações dos elementos predominantes (em g/L) foram: Ce 32,81, Th 14,76, La 8,58, Nd 3,35, Pr 3,02 e Sm 1,28.

Agradecimentos

Este trabalho teve suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projetos ns. 406872/2013-9, 482362/2013-8, 313912/2018-1 e 407784/2021-7. A Indústria Nuclear Brasileira é agradecida pelo fornecimento de amostras usadas neste estudo.

Referências

- 1 Apergis E, Apergis N. The role of rare earth prices in renewable energy consumption: the actual driver for a renewable energy world. *Energy Economics*. 2017;62:33-42.
- 2 Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 2019;10(4):1285-1303.
- 3 Jordens A, Cheng YP, Waters KE. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*. 2013;41:97-114.
- 4 Kumari A, Panda R, Jha MK, Kumar JR, Lee JY. Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: a review. *Minerals Engineering*. 2015;79:102-115.
- 5 Krishnamurthy N, Gupta CK. Extractive metallurgy of rare earths. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2016.
- 6 Abdel-Rehim AM. An innovative method for processing Egyptian monazite. *Hydrometallurgy*. 2002;67(1-3):9-17.
- 7 Panda R, Kumari A, Jha MK, Hait J, Kumar V, Kumar JR, et al. Leaching of rare earth metals from Korean monazite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2014;20(4):2035-2042.
- 8 Merritt RR. High temperature methods for processing monazite: I. Reaction with calcium chloride and calcium carbonate. *Journal of the Less Common Metals*. 1990;166(2):197-210.
- 9 Merritt RR. High temperature methods for processing monazite: II. Reaction with sodium carbonate. *Journal of the Less Common Metals*. 1990;166(2):211-219.
- 10 Kumari A, Panda R, Jha MK, Lee JY, Kumar JR, Kumar V. Thermal treatment for the separation of phosphate and recovery of rare earth metals (REMs) from Korean monazite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015;21:696-703.
- 11 Nölte J. ICP emission spectrometry: a practical guide. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2021. 288 p.
- 12 Zawisza B, Pytlakowska K, Feist B, Polowniak M, Kita A, Sitko R. Determination of rare earth elements by spectroscopic techniques: a review. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2011;26(12):2373-2390.
- 13 Amaral CDB, Machado RC, Barros JAVA, Virgilio A, Schiavo D, Nogueira ARA, et al. Determination of rare earth elements in geological samples using the Agilent SVDV ICP-OES: application note. New York: Agilent Technologies, Inc.; 2016.
- 14 Amaral CDB, Machado RC, Barros JAVA, Virgilio A, Schiavo D, Nogueira ARA, et al. Determination of rare earth elements in geological and agricultural samples by ICP-OES. *Spectroscopy*. 2017;32:32-36.
- 15 Huang B, Wang X, Yang P, Ying H, Gu S, Zhang Z, et al. An atlas of high resolution spectra of rare earth elements for inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. Cambridge: The Royal Society of Chemistry; 2000.

Recebido em: 8 Set. 2021

Accito em: 9 Ago. 2022