

MONAZITA EM GRANULAÇÃO FINA

No Brasil, os minerais estão associados a complexos alcalinos

ABSTRACT TRADE RESTRICTIONS IMPOSED BY CHINA IN 2010 CAUSED A SIGNIFICANT GROWTH IN THE PRICE OF RARE EARTHS IN THE WORLD MARKED, DRIVING THE MINING INDUSTRY TO SEEK OTHER SOURCES OF THIS MINERALS. THE UNDERSTANDING OF PHASE'S ASSOCIATIONS OF MONAZITE ASSOCIATED TO ALKALINE CARBONATITIC COMPLEXES, ONE OF THE MAJOR RARE EARTHS BRAZILIAN RESOURCES, IS FUNDAMENTAL TO THE DEVELOPMENT OF THE FORTHCOMING MINERAL PROCESSING DUE TO THE COMPLEXITY OF TEXTURAL FEATURES, FINE GRAIN SIZE AND DISTRIBUTION IN DIFFERENT BEARING MINERALS.

A China é responsável por mais de 95% da produção mundial de terras raras (ETR - elementos de terras raras). Os minerais portadores estão associados a depósitos lateríticos onde os ETRs encontram-se como íons adsorvidos em argilominerais. As demais ocorrências estão relacionadas, essencialmente, à monazita, xenotima, fluorcarbonatos (bastnaesita - parisita) e ETRs em substituições a outros elementos na estrutura cristalina de minerais (apatita, minerais de Nb, entre outros).

No Brasil, as ocorrências de minerais de terras raras são numerosas e estão principalmente associadas a complexos alcalinos (Catalão, GO; Poços de Caldas, Araxá, MG; Mato Preto e Barra de Itapirapuã, SP/PR, Seis Lagos, AM, entre outros) ocorrendo, essencialmente, na forma de monazita, fluor-

carbonatos e fluoretos de ETRs, além de alumino-fosfatos da série gorceixita-goiazita^[1]. Monazita e xenotima são também minerais acessórios ou traços comuns em depósitos endógenos de várias filiações genéticas e como grãos rolados resultantes da decomposição dessas mesmas rochas, vindo a constituir depósitos de pláceres marinhos particularmente nos Estados do Rio de Janeiro e da Bahia. Adicionalmente, têm-se ainda ETRs como constituintes menores de outros minerais de interesse econômico, como, por exemplo, no Granito Madeira (mina de Pitinga), AM, onde estes estão associados a minerais de Sn, Nb e Zr, além de xenotima^[2,3].

Os depósitos lateríticos mineralizados em terras raras em complexos alcalino-carbonatíticos podem representar a

Henrique Kahn
henrique@lct.poli.usp.br

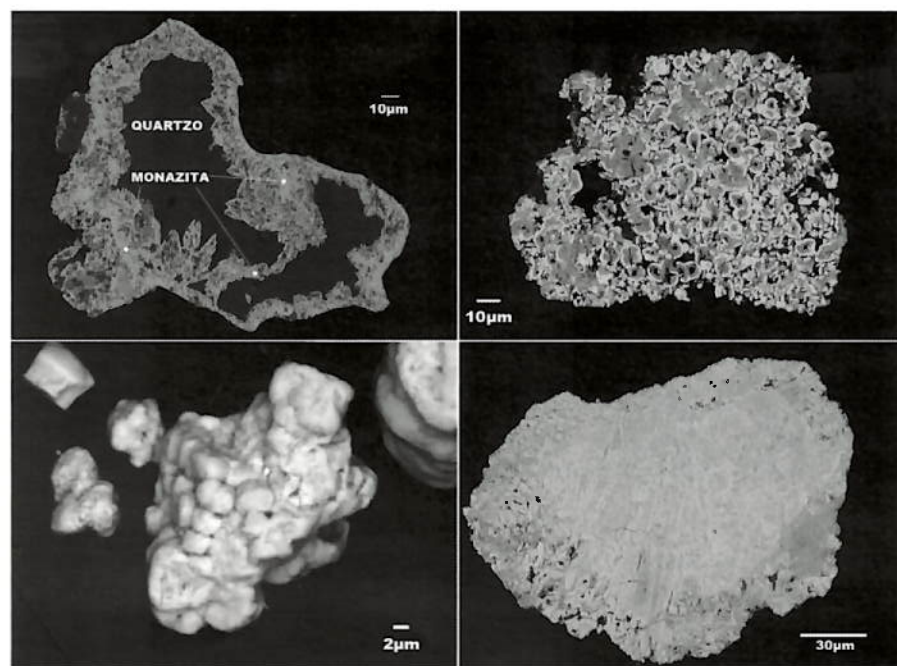
Maria Manuela M.L. Tassinari
manuela@lct.poli.usp.br

Carina Ulsen
carina@lct.poli.usp.br

Daniel Uliana
daniel@lct.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Figura 1 | Feições da monazita em amostras de Catalão, GO, ao MEV/BSE



maior fonte desses elementos, em escala mundial, fazendo-se necessárias, no entanto, inovações tecnológicas para o seu aproveitamento^[4]. Tais depósitos apresentam grande complexidade e diversidade de minerais portadores de ETRs – apatita, gorceixita-goiazita, monazita e minerais de Nb, dentre outros. As maiores concentrações verificadas referem-se à presença de monazita (Catalão, Araxá) e fluorcarbonatos de ETRs (Poços de Caldas e Barra do Itapirapuã,^[5]) apresentando granulação extremamente fina^[6, 7, 8]. A viabilização do aproveitamento dos ETRs depende, essencialmente, de estudos detalhados de caracterização para melhor compreensão das características do minério e do equacionamento da etapa de concentração^[9].

No Brasil, a monazita contida nos complexos alcalino-carbonatíticos representa um importante recurso de ETR comumente ocorrendo em agregados de granulação fina, por vezes porosos e descontínuos.

Algumas das principais feições texturais de monazita de amostras do complexo de Catalão são ilustradas em imagens de elétrons retroespalhados (BSE - contraste de número atômico) ao microscópio eletrônico de varredura, na **figura 1**: monazita em cristais micrométricos de aspecto colóide em agregados concrecionares (globulares) e também com hábito acicular^[7]; agregados de monazita intercrescidos com quartzo e gorceixita-goiazita são também frequentemente observados.

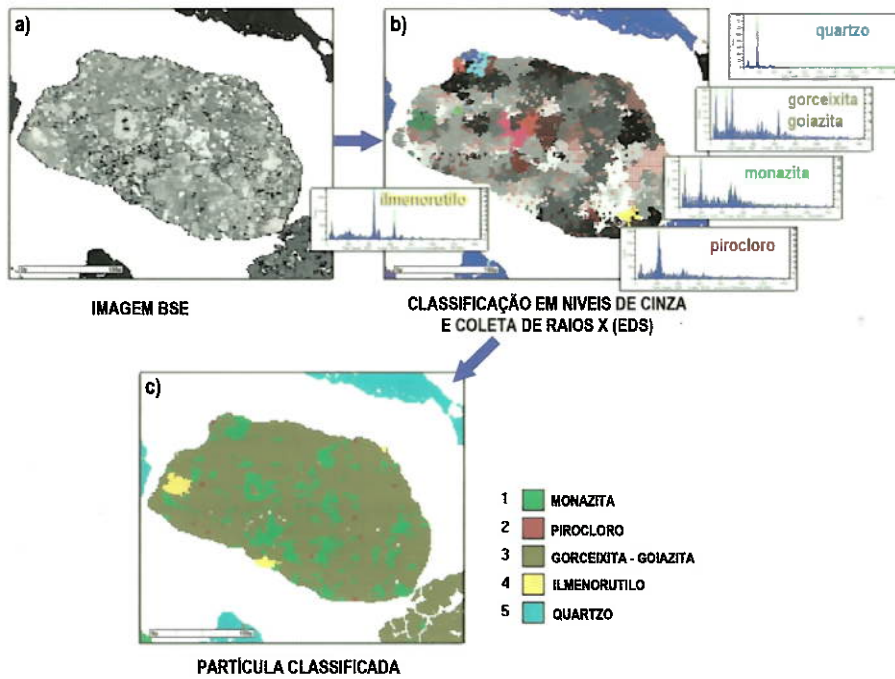
Dado as feições texturais, granulação fina e complexidade das associações dos minerais presentes, a caracterização destes recursos minerais é amplamente facilitada com o emprego de modernas técnicas de mineralogia quantitativa com a conjugação de técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV), microanálise por EDS e análise de imagens, em sistemas automatizados como, por exemplo, o MLA – *Mineral Liberation Analyser*^[10].

Na Escola Politécnica da USP, o Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo vem desenvolvendo estudos de caracterização em amostras de minérios de ETRs em sistema MLA acoplado a MEV de alta resolução (FEG), gerando resultados estatisticamente robustos (análise de milhares a dezenas de milhares de partículas). Os resultados apresentam as proporções mineralógicas, associações das fases presentes, liberação mineral, distribuição dos ETRs dentre os minerais portadores, forma de grãos, recuperação potencial, dentre outros, gerando subsídios e parâmetros para o desenvolvimento de processos de beneficiamento mineral.

Na análise mineralógica quantitativa automatizada utilizando o sistema MLA, as atividades envolvidas incluem uma etapa fundamental de preparação de amostras, que envolve sucessivas etapas de homogeneização e amostragem e a confecção de seções polidas em procedimentos dirigidos para análise de imagens.

A definição da rotina da análise envolve a definição dos parâmetros para coleta de imagens e espectros de raios

Figura 2 | Processo de discriminação/identificação de fases presentes



a) Imagem de BSE com partícula individualizada; b) segmentação em tons de cinza homogêneos e coleta de espectros de raios X (EDS) em cada área segmentada; c) discriminação de fases por comparação com espectros de raios X do banco de dados

X por EDS, a determinação da composição química das fases presentes por microanálise química e a criação de um banco de dados consubstanciando as informações referentes aos minerais presentes (composição química, massa específica e espectros de EDS de cada mineral). Uma vez coletados os dados de cada amostra, cada espectro de raios X por EDS coletado

em menos de 10 ms é comparado com as informações contidas no banco de dados, sendo discriminadas as fases presentes (figura 2). Alternativamente, em casos de grandes semelhanças de espectros de EDS entre fases distintas, a classificação pode ser também efetuada considerando o contraste de número atômico médio (BSE).

A figura 2 detalha o processo de cole-

ta da imagem ao MEV (BSE) e identificação das fases presentes nas partículas considerando sua composição química.

Uma vez identificadas as fases presentes (partículas classificadas), inicia-se o tratamento das imagens, que compreende a deaglomeração das partículas (processo para garantir que as partículas estejam individualizadas) visando à obtenção dos parâmetros de liberação e associações minerais. Feições correspondentes a cortes de regiões polares de partículas na seção polida devem ser desconsideradas. A figura 3 ilustra uma imagem de BSE e a correspondente imagem já classificada.

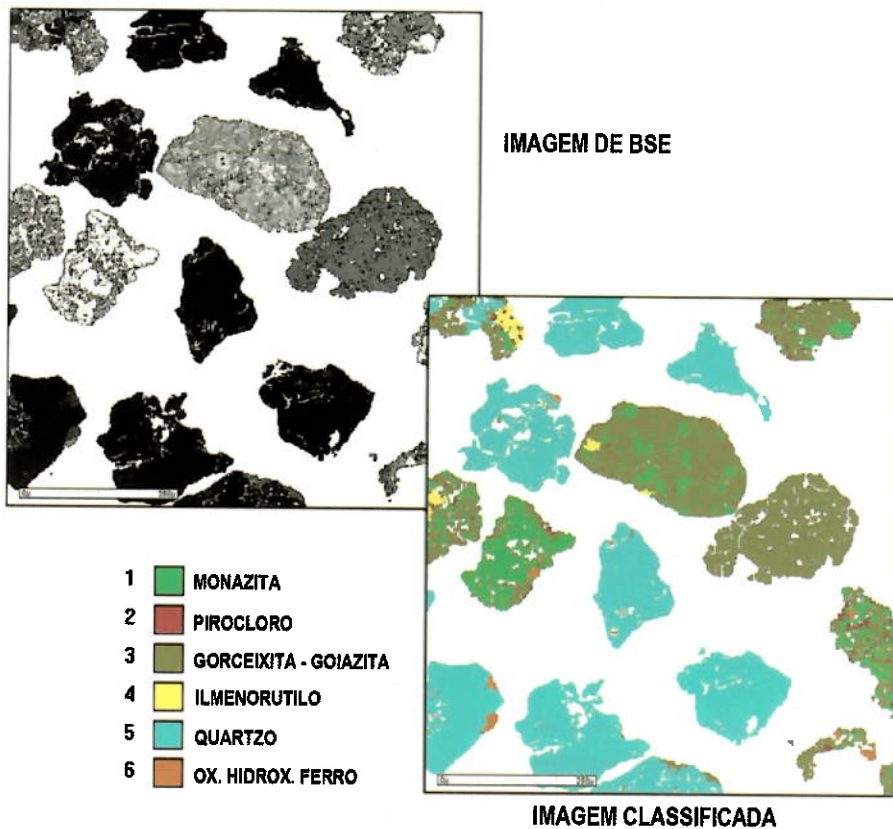
Assim que classificadas todas as imagens de uma seção polida, são aplicadas ferramentas estereológicas e extraídos os dados de interesse, sendo então realizada uma conciliação mediante a comparação entre teores dosados por análises químicas e aqueles calculados a partir do MLA, de modo a avaliar a qualidade e robustez das informações obtidas (tabela 1 - resultados para o estudo de amostra de Catalão).

Validados os resultados, são gerados tabelas e gráficos relativos às informações de interesse, como composição mineralógica por fração e global para a amostra (figura 4a) e a partição dos elementos de interesse dentre os vários minerais (figura 4b). Nas porções mineralizadas em ETRs em comple-

Tabela 1 | Conciliação entre teores dos principais óxidos dosados e calculados pelo MLA

Teores (%)	OTR	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	BaO	PF
análise química	10,2	5,52	2,68	1,53	0,49	1,63	9,92	0,75	40,7	14,0	6,31	3,05	3,73	5,89
calculado MLA	10,3	5,47	2,81	1,55	0,48	1,42	11,0	0,73	39,2	13,4	7,46	3,29	3,58	6,38
análise química	6,77	3,59	1,80	1,04	0,34	1,16	5,62	0,33	32,2	37,2	4,22	2,53	1,46	6,32
calculado MLA	6,72	3,59	1,79	1,03	0,32	1,02	6,82	0,41	30,0	38,8	4,25	2,81	1,74	5,64

Figura 3 | Imagens de BSE e das fases discriminadas após operações de classificação e deaglomeração



xos alcalino-carbonatíticos, a monazita apresenta teores de 5% a 15%, estando associada principalmente a quartzo e alumino-fosfatos de Ba-Sr-ETRs da série gorceixita-goiazita. A assembleia mineralógica é bastante complexa, sendo encontrados mais de vinte minerais distintos. Os elementos de terras raras estão presentes na monazita e, secundariamente, na gorceixita-goiazita, além

de pirocloro e outros minerais menores (cerianita, zirconolita, dentre outros).

As associações da monazita podem ser expressas em termos de proporções de partículas livres e mistas em associações binárias e ternárias (três ou mais minerais), com detalhamento das classes de partículas binárias ou ternárias (figura 5a). O espectro de liberação é outra informação importante que ilus-

tra a distribuição de frequência acumulada do mineral em função da fração deste em cada partícula, seja em termos de área (figura 5b) ou perímetro, apresentando não só o conteúdo de monazita livre como também o comportamento das partículas mistas.

Nos complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros a monazita comumente ocorre em agregados com cristais de granulação micrométrica finamente intercrescidos, principalmente com gorceixita-goiazita e quartzo. A liberação destes agregados de monazita aumenta das frações mais grossas para as frações mais finas e se dá de forma incompleta em granulação bastante fina, em face destes intercrescimentos.

Outro dado relevante refere-se à distribuição acumulada do elemento de interesse versus o seu teor, parâmetro que correlaciona a recuperação potencial versus teor do concentrado, conforme ilustrado na figura 6 para distintas frações granulométricas.

Como decorrência do incremento da liberação, verifica-se um crescimento expressivo dos teores de ETRs para as frações granulométricas mais finas para um determinado valor de distribuição. Teores superiores a 40%-50% de ETRs, aliado a recuperações potenciais superiores a 80%, implicam em processamento de material cominuído abaixo de 0,10 mm.

Figura 4 | Estimativa da composição mineralógica e partição de ETRs, P_2O_5 e Nb_2O_5 .

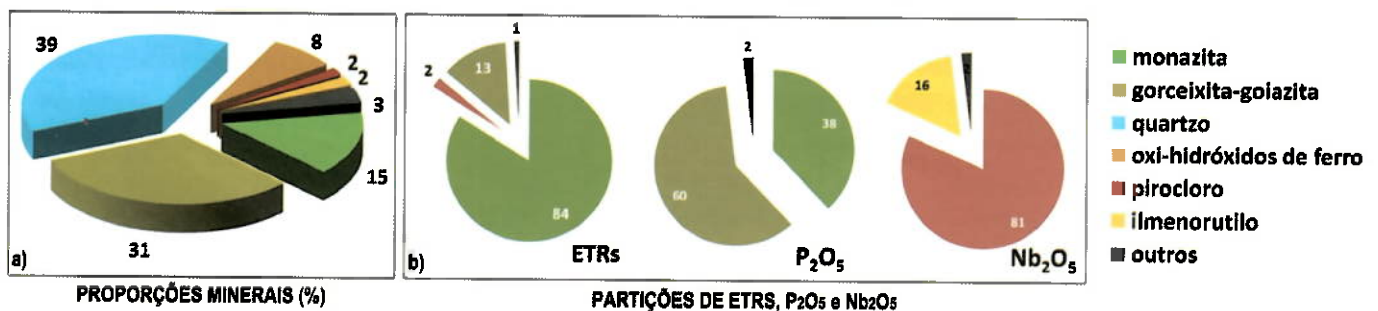
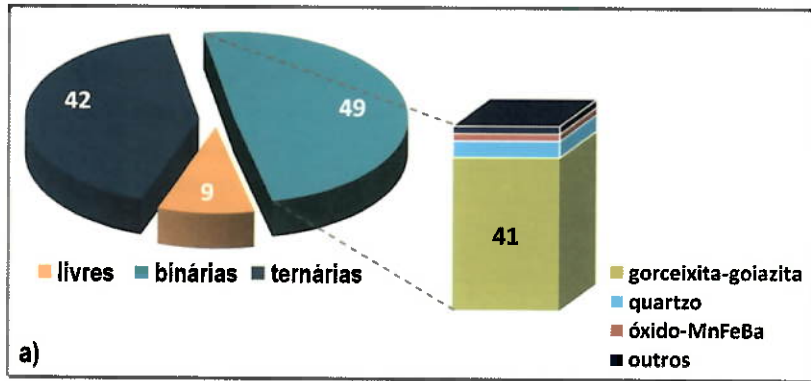
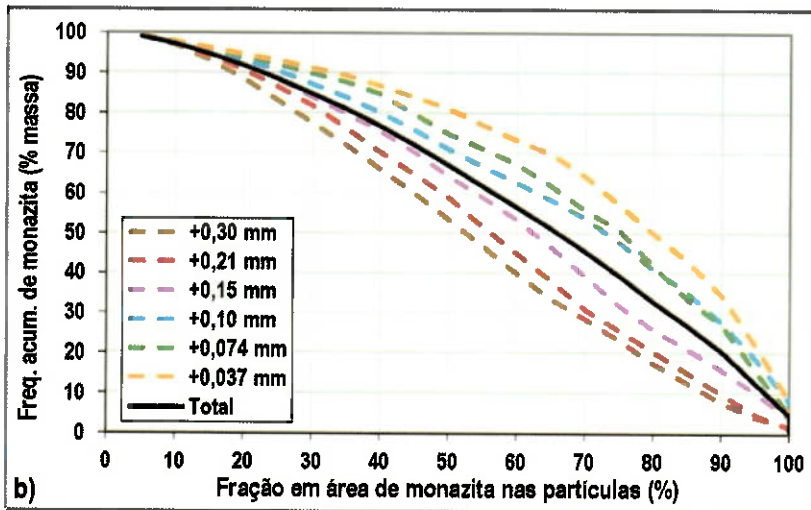


Figura 5 | Formas de associação e espectro de liberação da monazita (fração em área)



LIBERAÇÃO E ASSOCIAÇÕES DA MONAZITA



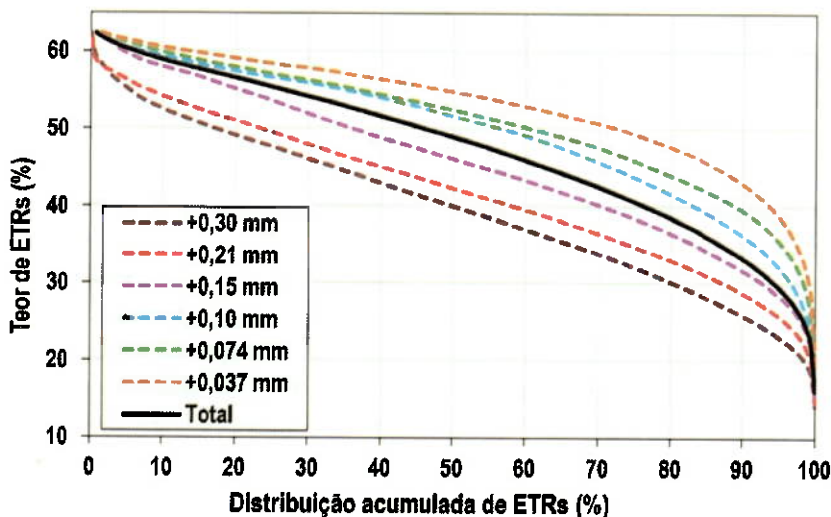
ESPECTRO DE LIBERAÇÃO DA MONAZITA

Dado a granulometria de liberação da monazita de complexos alcalino-carbonáticos, o beneficiamento, por meio de métodos densitários e/ou magnéticos, não é aplicável [9]. As alternativas de processamento hoje consideradas passam por uma desagregação seletiva dos agregados de monazita e posterior classificação, atingindo teores pouco superiores a 20% de óxidos de terras raras em Catalão, área Córrego do Garimpo [8] ou no equacionamento da concentração por flotação, objetivando a produção de concentrados com teores superiores a 40%-50%. ■

REFERÊNCIAS

- [1] Lapido-Loureiro F.E.V. Terras-Raras no Brasil: Depósitos, Recursos Identificados, Reservas. Rio de Janeiro. MCT, CNPq, CETEM, Série Estudos e Documentos 21, 183p, 1994.
- [2] Kahn, H. Caracterização e desenvolvimento de processo de beneficiamento do minério primário de Pitinga, AM - criolita, estanho, zircônio, nióbio, ítrio e terras raras. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991.
- [3] Minuzzi, O.R.R et al. Rare earth element and yttrium geochemistry applied to the genetic study of cryolite ore at the Pitinga Mine (Amazon, Brazil). Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.80, 719-733, 2008.
- [4] Mariano A.N. 1989. Economic Geology of Rare Earth Minerals. In: Lipin & McKay (eds.) Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth elements, Reviews in Mineralogy 21:309-337.
- [5] Kahn, H.; Lorenzi, M.L.B. Caracterização mineralógica do depósito de terras raras no complexo alcalino-carbonático de Barra do Itapirapua (SP/PR) - Área de Detalhe I. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PMI, São Paulo, v. BT-PMI, n. 098, 1-20, 1999.
- [6] Wall, F. & Mariano, A.N. Rare earth minerals in carbonatites: a discussion centred on the Kangankunde Carbonatite, Malawi. In: A.P.Jones, F.Wall & C.T.Williams, (eds.). Rare Earth Minerals: Chemistry, origin and ore deposits. London, Chapman and Hall, p.193-226, 1996.
- [7] Tassinari, M.M.L. Caracterização tecnológica do depósito de terras raras de Catalão I, GO. Áreas: Córrego do Garimpo e Lagoa Seca. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 154p, 2001.
- [8] Tassinari, M.M.L.; H. Kahn, H; Ratti, G. Process mineralogy studies of Corrego do Garimpo REE ore, Catalao-I alkaline complex, Goias, Brazil Minerals Engineering, Vol. 14 (12), 1609-1617, 2002.
- [9] Viera, E. V.; Lins, F.A.F. Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão. CETEM/CNPq, Série Tecnologia Mineral, 73, 53p, 1997.
- [10] Fandrich, R. et al. Modern SEM-based mineral liberation analysis. International Journal of Mineral Processing, v. 84, p. 310-320, 2007.

Figura 6 | Distribuição acumulada de ETRs versus teor de ETRs



ESCOLA POLITÉCNICA

PMT

• TECNOLOGIAS LIMPAS

Siderúrgicas terão que
otimizar processos para
reduzir as emissões de CO₂

- **Concurso universitário**
amplia presença de estudantes
de engenharia em seminários
- **Mineração de terras raras**
coloca o Brasil na disputa
com a China