JULIANA LÍVI ANTONIASSI

**Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em
complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos do Brasil**

São Paulo

2017

JULIANA LÍVI ANTONIASSI

**Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em
complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos do Brasil**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Doutor em Ciências

São Paulo

2017

JULIANA LÍVI ANTONIASSI

**Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em
complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos do Brasil**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Doutor em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de outubro de 2017.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Antoniassi, Juliana Lívi

Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos do Brasil / J. L. Antoniassi -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
207 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINÉRIOS 2.TERRAS RARAS
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Henrique Kahn pela oportunidade de trabalho e orientação.

À agência de fomento CAPES pela bolsa de doutorado.

À equipe técnica do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica da USP, envolvida na execução deste trabalho.

A Simone Paz e José Ramalho, pela colaboração com o planejamento dos experimentos estatísticos.

Aos amigos da pós-graduação em Engenharia Mineral da USP pelos momentos de discussão acadêmica e descontração.

À minha família, pelo apoio incondicional (Alice, Marcos, Daniela, Fábio).

E a todas as pessoas e instituições que direta ou indiretamente participaram deste desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

Este trabalho enfocou o levantamento de informações químicas e mineralógicas de detalhe em amostras de depósitos alcalinos e alcalino-carbonatíticos brasileiros contendo terras raras, de modo a fornecer subsídios para o desenvolvimento de processos de aproveitamento. Estes depósitos apresentam elevados volumes de recursos, baixos teores de elementos de terras raras (essencialmente terras raras leves) e elevada complexidade mineralógica.

As amostras estudadas são provenientes de depósitos lateríticos, com teor total de óxidos de terras raras entre 1,27 e 6,45%, sendo a monazita o principal mineral portador desses elementos, exceto em uma das amostras, onde é predominante a bastnaesita; como minerais traços estão presentes cerianita, xenotima e um fosfato de escândio. Os minerais de terras raras tendem a concentrar-se em direção às frações granulométricas mais finas, mostram d_{50} de 15 μm nas frações acima de 0,008 mm e chegam a valores inferiores a 0,1 μm abaixo da mesma. Esses minerais ocorrem preferencialmente em íntimas associações com a ganga, sendo que valores superiores a 60% de liberação (em área) são observados apenas nas frações menores que 0,020 mm.

O potencial de concentração desses minerais foi avaliado por separações físicas e extração hidrometalúrgica. Separações físicas em líquidos densos e magnéticas não possibilitaram a obtenção de produtos enriquecidos em terras raras. O resultado mais promissor refere-se à possibilidade de remoção de um produto contaminante magnético nas frações retidas em 0,020 mm e que responde por 30% do total de Fe_2O_3 contido nas amostras (em média), sem perdas significativas das terras raras.

A condição experimental otimizada para a dissolução seletiva dos minerais de terras raras em meio ácido foi estabelecida a partir de um planejamento experimental baseado em princípios estatísticos. Para o material cominuído abaixo de 0,30 mm, a solubilização dos óxidos de terra raras é de 77%, considerando-se ácido sulfúrico concentrado, reduzida porcentagem de sólidos, temperatura ambiente e tempo de 4 horas. Maiores níveis de solubilização das terras raras podem ser alcançados, mas juntamente com elevação da solubilização da ganga.

Palavras-chave: Minerais de terras raras. Monazita. Bastnaesita. Depósitos brasileiros. Caracterização tecnológica. Dissolução seletiva.

ABSTRACT

This work focused on the acquisition of chemical and mineralogical detailed information in samples from Brazilian alkaline and alkaline-carbonatitic deposits containing rare earths, in order to provide subsidies for process development. These deposits present high volumes of resources, low contents of rare earth elements (essentially light rare earths) and high mineralogical complexity.

The studied samples are lateritic materials, with a total content of rare earth oxides between 1.27 and 6.45%, being monazite the main rare earth bearing mineral, except in one of the samples, where bastnaesite is predominant; cerianite, xenotime and a scandium-phosphate occur as trace. Rare earth minerals tend to enrich toward the finest sieve fractions with an medium grain size of 15 μm in the fractions greater than 0.008 mm and decreasing below 0.1 μm in finer fractions. These minerals occur preferentially in intimate associations with the gangue; liberation greater than 60% (in area) are observed under 0.020 mm fractions.

The concentration potential of these minerals was evaluated through physical separation and hydrometallurgical extraction. Physical separations (heavy liquid and magnetic) did not succeed in obtaining products enriched in rare earths. The most promising result were the possibility of removing magnetic phases above 0.020 mm (responsible for 30%, on average, of the total Fe_2O_3 contained in the samples) without significant losses of rare earths.

The rare earths acid leaching protocols and conditions were established by statistical experimental design. For samples comminuted below 0.30 mm, the best rare earths solubilization (77%) and with minimum gangue leaching was obtained in concentrate sulfuric acid, low solids concentration, environmental temperature and four hours of reaction. Higher levels of rare earths solubilization can be achieved, however accompanied by higher gangue solubilization.

Keywords: Rare earths minerals. Monazite. Bastnaesite. Brazilian deposits. Technological characterization. Selective leaching.

SUMÁRIO

	pag.
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivos	9
1.2 Inovação tecnológica e justificativas	10
1.3 Relevância do tema frente a comunidade científica mundial.....	11
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 Elementos e minerais de terras raras	13
2.1.1 Elementos de terras raras, propriedades e aplicações	13
2.1.2 Minerais portadores e ocorrência geológica.....	16
2.1.3 Recursos e produção no Brasil e no mundo.....	21
2.1.4 Breve histórico da produção mundial e economia atual	27
2.2 Exploração do minério de terras raras	29
2.2.1 Beneficiamento da bastnaesita nas principais minas do mundo ..	30
2.2.2 Beneficiamento da monazita em depósitos inconsolidados	31
2.2.3 Beneficiamento das argilas iônicas	32
2.2.4 Métodos de concentração física.....	32
2.2.5 Processamento hidrometalúrgico	37
2.2.5.1 Digestão seletiva em minérios de baixo teor	41
2.2.5.2 Biolixiviação	44
2.2.5.3 Reciclagem	44
2.3 Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos no Brasil	45
2.3.1 Resultados de estudos anteriores	45
2.3.2 Procedimentos de análises químicas e mineralógicas	47
2.3.3 Projetos de pesquisa em andamento	50

3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	Amostras estudadas	52
3.2	Procedimento experimental	53
3.2.1	Caracterização química e mineralógica de detalhe	54
3.2.2	Separabilidade física (separações minerais)	56
3.2.3	Lixiviação seletiva em meio ácido	57
4	RESULTADOS	61
4.1	Características químicas e mineralógicas de detalhe	61
4.1.1	Composição química global das amostras	61
4.1.2	Classificação granuloquímica (amostras bulk e após moagem)	64
4.1.3	Mineralogia global e por frações granulométricas	71
4.1.4	Características físico-químicas dos minerais de terras raras	79
4.1.5	Partição das terras raras entre os minerais portadores	86
4.1.6	Associação e liberação dos minerais de terras raras	94
4.2	Comportamento dos minerais em separações físicas	103
4.2.1	Ensaio de atrição	103
4.2.2	Separações em líquidos densos e magnéticas	107
4.3	Comportamento dos minerais na lixiviação seletiva ácida	114
4.3.1	Composição química dos resíduos dos ensaios de lixiviação	114
4.3.2	Efeitos principais e interações das variáveis	116
4.3.3	Curvas de solubilização e condição ótima de recuperação	119
4.3.4	Solubilização dos minerais e terras raras remanescentes	127
5	DISCUSSÕES	132
5.1	Peculiaridades mineralógicas dos depósitos estudados	132
5.2	Contribuições tecnológicas ao aproveitamento dos recursos	136
5.3	Contribuições tecnológicas aos estudos de caracterização	138

6 CONCLUSÕES.....	141
--------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
--	------------

APÊNDICES

APÊNDICE A - Granuloquímica das amostras bulk e após cominuição

APÊNDICE B - Dados de composição mineralógica

APÊNDICE C - Composição química média dos minerais adotada pelo MLA

APÊNDICE D - Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores

APÊNDICE E - Resultados das separações minerais

APÊNDICE F - Ensaio de lixiviação: matriz de respostas e análises de variância

APÊNDICE G - Análise de tamanho de partículas à laser

1 INTRODUÇÃO

As ocorrências de minerais de terras raras no Brasil são numerosas, existindo recursos geológicos importantes associados a complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos em que os elementos de terras raras (ETR) ocorrem como componentes principais ou são subprodutos potenciais de outros bens minerais (MARIANO, 1989).

Nos complexos alcalino-carbonatíticos, a concentração de minerais de terras raras resultou preferencialmente de processos metassomáticos pós-magmáticos, seguidos de um enriquecimento residual associado ao intemperismo, paralelamente à dispersão de ETR em minerais secundários. Embora tais depósitos possuam recursos significativos, não apresentam até o momento um equacionamento tecnológico satisfatório para o seu aproveitamento econômico (LIMA, 2012; SOUSA FILHO; SERRA, 2014).

Os maiores recursos mundiais de terras raras encontram-se na China, no Brasil, na Comunidade dos Estados Independentes (CEI), na Austrália, na Índia e nos Estados Unidos da América (EUA). A China controla 83% da oferta mundial de terras raras, cerca de 100 mil toneladas anuais, e é responsável por praticamente toda a oferta de terras raras pesadas. A produção brasileira de monazita é insignificante e foi nula em 2014, quando as importações de compostos químicos e produtos manufaturados de terras raras somaram US\$ 13 milhões (FOB) e as exportações US\$ 383 mil (FOB) (ANDRADE, 2016; USGS, 2017).

A demanda por terras raras vem se intensificando em setores de alta tecnologia, no entanto, as restrições comerciais impostas pela China a partir de 2010, que limitaram naquele momento suas exportações ao máximo de 35 mil toneladas anuais de óxidos de terras raras, impulsionaram governos e a indústria mineral mundial a buscar outras fontes para fazer frente à perspectiva crescente de consumo (CHEN, 2011; WÜBBEKE, 2013).

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia incluiu os elementos de terras raras dentre os bens minerais estratégicos ao país no Plano Nacional de Mineração 2030 (MME, 2010). Tanto os órgãos de governo como as mineradoras têm procurado aprofundar o conhecimento de seus recursos minerais associados a terras raras, com a implementação de estudos de caracterização tecnológica para o

entendimento das características intrínsecas dos minerais de interesse presentes, visando o equacionamento das etapas necessárias para sua concentração.

Estudos realizados em alguns depósitos associados a complexos alcalino-carbonatíticos demonstram que os minerais de terras raras ocorrem, usualmente, na forma de agregados de cristais de granulação micrométrica, com tendência natural de concentração junto às frações finas e ultrafinas, o que dificulta significativamente as possíveis etapas de concentração física (VIERA; LINS, 1997; KAHN et al., 2012; NEUMANN; MEDEIROS, 2015).

Permanece, portanto, um desafio tecnológico para o aproveitamento dos ETR associados a esses complexos no Brasil. A viabilização desse aproveitamento depende, essencialmente, do equacionamento da etapa de concentração física para a elevação dos teores de ETR no produto que constituirá a alimentação do processo químico ou a redução do conteúdo de minerais contaminantes (consumidores dos reagentes aí utilizados), ou ainda o desenvolvimento de processo de lixiviação direta (seletiva).

Neste contexto, foram desenvolvidos estudos detalhados de caracterização tecnológica em amostras portadoras de terras raras de quatro complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos brasileiros visando à verificação do potencial de concentração desses elementos através de separação física e extração hidrometalúrgica.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é gerar informações mineralógicas a partir estudos de caracterização tecnológica efetuados em amostras contendo terras raras, referentes a quatro dos principais depósitos alcalinos e alcalino-carbonatíticos brasileiros, localizados nos estados de Minas Gerais e Goiás, no que tange à caracterização dos minerais portadores de elementos de terras raras (ETR), ao potencial de concentração por separação física e de dissolução seletiva em meio ácido.

Desta forma, pretende-se avaliar os parâmetros mineralógicos que interferem no comportamento desses minerais frente aos processos de concentração, ampliando o conhecimento científico e metodológico para tal e propiciando subsídios para superar os desafios tecnológicos para o aproveitamento destes importantes recursos.

Serão basicamente focados:

- caracterização química e mineralógica de detalhe;
- separabilidade mineral em subsídio à concentração/pré-concentração física;
- estudos de cinética de dissolução em meio ácido para o entendimento das condições adequadas à solubilização seletiva dos minerais portadores de ETR e à verificação das possíveis recuperações das terras raras (unicamente na etapa de dissolução do minério no processo hidrometalúrgico).

1.2 Inovação tecnológica e justificativas

Estudos de caracterização tecnológica em amostras contendo terras raras vêm sendo desenvolvidos no Brasil e no mundo há muitos anos. A monazita é o principal mineral portador de terras raras nos depósitos alcalino-carbonatíticos brasileiros e ocorre geralmente na forma de agregados de cristais micrométricos, em associações bastante complexas com a ganga, restringindo sobremaneira a aplicação de processos de concentração física (MARIANO, 1989; VIERA; LINS, 1997; KAHN et al., 2012; NEUMANN; MEDEIROS, 2015).

A literatura disponível sobre o beneficiamento de minérios alcalino-carbonatíticos de terras raras é limitada e baseada em depósitos específicos, com características mineralógicas particulares, onde a bastnaesita é geralmente o principal mineral de interesse. O processamento físico desses minérios é principalmente focado em separações densitárias, magnéticas e flotação. Processos de beneficiamento e, especificamente, a flotação da monazita em complexos alcalino-carbonatíticos não foram ainda amplamente explorados. Tal tema aumenta em importância a medida que novas fontes de monazita estão sendo descobertas em novos e complexos depósitos de terras raras, como o caso do Brasil (JORDENS et al., 2013).

No que se refere ao entendimento dos procedimentos hidrometalúrgicos de aproveitamento desses minérios, poucos dados são divulgados e as informações geradas são, muitas vezes, de acesso restrito. Sabe-se que algumas companhias mineradoras já estão desenvolvendo procedimentos hidrometalúrgicos específicos, tal como a CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração) e a Mineração Serra Verde, mas nenhum fluxograma de processamento foi divulgado até o momento.

Pretende-se, dessa forma, contribuir com a elevação do conhecimento científico, metodológico e de inovação em caracterização tecnológica, análises químicas e mineralógicas de recursos minerais contendo elementos de terras raras, com enfoque no entendimento do comportamento destes minerais e da ganga presente, frente à cinética de lixiviação ácida.

O projeto justifica-se pela acentuada importância dos recursos brasileiros de terras raras no atual contexto político-econômico mundial, o que inclusive motivou o governo brasileiro a incentivar a pesquisa e desenvolvimento de projetos aplicados ao referido minério, uma vez que possibilitará o aprofundamento do conhecimento dos recursos associados a complexos alcalinos, contribuindo para a sustentabilidade e competitividade da cadeia produtiva desses elementos no Brasil (MME, 2010; LAPIDO-LOUREIRO, 2013; FORMOSO et al., 2016).

1.3 Relevância do tema frente a comunidade científica mundial

A visualização integrada da base de dados do sistema Scopus (SCOPUS, 2017), de resumos e citações de literaturas mundiais, permite compreender, em caráter exploratório, a relevância do tema desta pesquisa frente à comunidade científica e as linhas de pesquisa atualmente abordadas.

Filtros de busca aplicados para o direcionamento da pesquisa considerando as combinações das palavras e expressões: (“rare earth” **ou** REE) **e** (“process mineralogy” **ou** “technological characterization” **ou** “ore dressing” **ou** “beneficiation” **ou** “leaching”), unicamente constantes do título, abstract ou das palavras-chave nos documentos, identificam um total de 1.542 trabalhos (Figura 1).

Nos últimos anos, o número de publicações cresceu significativamente, sendo que a China é responsável pela maior parte dessas publicações, com estudos preferencialmente focados em hidrometalurgia.

Figura 1 – Base de dados do Scopus, considerando palavras-chave relevantes a este trabalho. Número de trabalhos identificados (a), países de origem das publicações (b) e principais meios de publicação (c).

Fonte: (SCOPUS, 2017). Obs: ☆ = principais meios de publicação desconsiderando a palavra-chave “leaching”.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Elementos e minerais de terras raras

2.1.1 Elementos de terras raras, propriedades e aplicações

As terras raras (TR) ou elementos de terras raras (ETR) correspondem a um total de 15 elementos químicos denominados lantanídeos, que possuem número atômico (Z) compreendido entre 57 (lantânio) e 71 (lutécio). Adicionalmente, os elementos escândio (Z=21) e ítrio (Z=39) mostram propriedades químicas semelhantes e, geralmente, ocorrem associados aos lantanídeos no ponto de vista mineralógico, sendo com frequência também designados terras raras, inclusive pela IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) (LAPIDO-LOUREIRO, 1994; IUPAC, 2017).

A denominação “terras raras” vem do final do século 18, quando estes elementos começaram a ser descobertos, e está relacionada ao aspecto terroso dos seus óxidos insolúveis e à suposição equivocada de que seriam escassos na natureza. Como se apresentam muito dispersos e raramente se encontram na forma de ricos depósitos de minerais portadores, a abundância relativa dos ETR só foi reconhecida após aperfeiçoamento dos métodos de análises químicas, progresso no conhecimento de sua geoquímica e avanço da prospecção e pesquisa de seus minerais (VLASOV, 1966; LAPIDO-LOUREIRO, 1994).

Na crosta terrestre, os elementos de terras raras totalizam cerca de 250 ppm, sendo mais abundantes que vários outros elementos considerados “elementos comuns”. O cério é o mais abundante dentre os ETR, com 67 ppm, e tão frequente quanto, por exemplo, o zinco (70 ppm) e o cobre (60 ppm), enquanto o mais raro, o túlio (0,5 ppm), ocorre em maior concentração que elementos como a prata e o mercúrio (<0,5 ppm cada). Abrão (1994) especifica ainda que os ETR de números atômicos pares são mais abundantes que aqueles de números atômicos ímpares, por serem mais estáveis quimicamente.

Na Figura 2 é destacada a localização dos elementos de terras raras na Tabela Periódica: lantanídeos, escândio e ítrio. Os lantanídeos são ainda divididos entre leves (ETRL; ou “grupo do cério”) e pesados (ETRP; ou “grupo do ítrio”), de acordo com o valor de seu número atômico, sendo que números atômicos superiores aos do európio (Z=63) são considerados pesados. O ítrio faz parte deste

último grupo por apresentar propriedades químicas semelhantes, apesar de seu baixo peso atômico. O promécio (ETRL) não ocorre naturalmente na natureza, mas somente a partir do decaimento radioativo de elementos como neodímio e urânio.

Figura 2 – Tabela periódica com destaque para os elementos de terras raras.

1

1

H

hydrogen

1.00794(7)

2

2

He

helium

4.002602(2)

3

3

Li

lithium

6.941(1)

4

4

Be

beryllium

9.012182(2)

11

11

Na

sodium

22.98976928(2)

12

12

Mg

magnesium

24.304(6)

19

19

K

potassium

39.0983(1)

20

20

Ca

calcium

40.078(4)

27

27

Co

cobalt

58.933194(8)

28

28

Ni

nickel

58.6934(4)

33

33

As

arsenic

74.9216(3)

34

34

Se

selenium

78.9718(8)

39

39

Y

yttrium

88.90584(2)

40

40

Zr

zirconium

91.224(2)

45

45

Rh

rhodium

102.9055(2)

46

46

Pd

palladium

106.42(1)

51

51

Sb

antimony

121.757(3)

52

52

Te

tellurium

127.603(3)

57-71

57-71

Lanthanoids

72

72

Hf

hafnium

178.49(2)

81

81

Tl

thallium

204.38(3)

82

82

Pb

lead

207.2(1)

87

87

Fr

francium

[223]

88

88

Ra

radium

[226]

93

93

Pr

praseodymium

140.90765(3)

94

94

Pu

plutonium

[244]

99

99

Es

einsteinium

[252]

100

100

Fm

fermium

[257]

105

105

Db

dubnium

[262]

106

106

Sg

seaborgium

[266]

111

111

Rg

roentgenium

[272]

112

112

Cn

copernicium

[285]

117

117

Ts

tennessine

[294]

118

118

Og

oganesson

[294]

21

21

Sc

scandium

44.955912(2)

22

22

Ti

titanium

47.867(1)

29

29

Cu

copper

63.546(3)

30

30

Zn

zinc

65.38(2)

35

35

Br

bromine

79.904(1)

36

36

Kr

krypton

83.798(2)

41

41

Nb

niobium

92.90638(2)

42

42

Mo

molybdenum

95.94(1)

47

47

Ag

silver

107.8682(1)

48

48

Cd

cadmium

112.411(8)

53

53

I

iodine

126.905(5)

54

54

Xe

xenon

131.29(4)

59

59

Pr

praseodymium

140.90765(3)

60

60

Nd

neodymium

144.24(1)

65

65

Tb

terbium

158.925(3)

66

66

Dy

dysprosium

162.50(3)

71

71

Lu

lutetium

174.967(1)

72

72

Hf

hafnium

178.49(2)

77

77

Ir

iridium

192.222(1)

78

78

Pt

platinum

195.084(8)

83

83

Bi

bismuth

208.9804(1)

84

84

Po

polonium

209

89

89

Ac

actinium

[227]

90

90

Th

thorium

232.0377(4)

95

95

Am

americium

[243]

96

96

Cm

curium

[247]

101

101

Md

mendelevium

[258]

102

102

No

nobelium

[259]

107

107

Bh

bohrium

[264]

108

108

Hs

hassium

[277]

113

113

Nh

nihonium

[284]

114

114

Fl

flerovium

[289]

119

119

Uut

ununtrium

[288]

120

120

Uuq

ununquadium

[291]

125

125

Uup

ununpentium

[288]

126

126

Uuh

ununhexium

[291]

131

131

Uus

ununseptium

[286]

132

132

Uuo

ununoctium

[289]

13

13

B

boron

10.811(7)

14

14

C

carbon

12.0107(8)

15

15

N

nitrogen

14.00643(4)

16

16

O

oxygen

15.999(7)

17

17

F

fluorine

18.9984032(3)

18

18

Ne

neon

20.1797(6)

23

23

Al

aluminum

26.9815386(8)

24

24

Si

silicon

28.0855(8)

25

25

P

phosphorus

30.97376199(5)

26

26

S

sulfur

32.059(5)

31

31

Ga

gallium

69.723(1)

32

32

Ge

germanium

72.630(8)

37

37

Rb

rubidium

85.468(4)

38

38

Sr

strontium

87.62(1)

43

43

Tc

technetium

98.9062(1)

44

44

Ru

ruthenium

101.07(2)

49

49

In

indium

114.818(1)

50

50

Sn

tin

118.710(7)

55

55

Cs

caesium

132.90545196(3)

56

56

Ba

barium

137.327(7)

61

61

Pm

promethium

[145]

62

62

Sm

samarium

150.36(2)

67

67

Ho

holmium

164.93032(2)

68

68

Er

erbium

167.259(7)

73

73

Ta

tantalum

180.94788(2)

74

74

W

tungsten

183.84(1)

79

79

Au

gold

196.966569(5)

80

80

Hg

mercury

200.59(2)

85

85

At

astatine

210

86

86

Rn

radon

222

91

91

Pa

protactinium

231.03688(2)

92

92

U

uranium

238.02891(3)

97

97

Bk

berkelium

[247]

98

98

Cf

californium

[251]

103

103

Lr

lawrencium

[262]

104

104

Rf

rutherfordium

[261]

109

109

Mt

meitnerium

[268]

110

110

Ds

darmstadtium

[271]

115

115

Mc

moscovium

[288]

116

116

Lv

livermorium

[293]

121

121

Ubu

ununbium

[284]

122

122

Ubd

ununduim

[287]

127

127

Uhs

ununheptium

[284]

128

128

Uht

ununhexium

[287]

133

133

Uts

ununseptium

[286]

134

134

Utu

ununoctium

[289]

1

1

H

hydrogen

1.00794(7)

2

2

He

helium

4.002602(2)

3

3

Li

lithium

6.941(1)

4

4

Be

beryllium

9.012182(2)

11

11

Na

sodium

22.98976928(2)

12

12

Mg

magnesium

24.304(6)

19

19

K

potassium

39.0983(1)

20

20

Ca

calcium

40.078(4)

27

27

Co

cobalt

58.933194(8)

28

28

Ni

nickel

58.6934(4)

33

33

As

arsenic

74.9216(3)

34

34

Se

selenium

78.9718(8)

39

39

Y

yttrium

88.90584(2)

40

40

Zr

zirconium

91.224(2)

45

45

Rh

rhodium

102.9055(2)

46

46

Pd

palladium

106.42(1)

51

51

Sb

antimony

121.757(3)

52

52

Te

tellurium

127.603(3)

57-71

57-71

Lanthanoids

72

72

Hf

hafnium

178.49(2)

81

81

Tl

thallium

204.38(3)

82

82

Pb

lead

207.2(1)

87

87

Fr

francium

[223]

88

88

Ra

radium

[226]

93

93

Pr

praseodymium

140.90765(3)

94

94

Pu

plutonium

[244]

99

99

Es

einsteinium

[252]

100

100

Fm

fermium

[257]

105

105

Db

dubnium

[262]

106

106

Sg

seaborgium

[266]

111

111

Rg

roentgenium

[272]

112

112

Cn

copernicium

[285]

117

117

Ts

tennessine

[294]

118

118

Og

oganesson

[294]

21

21

Sc

scandium

44.955912(2)

22

22

Ti

titanium

47.867(1)

29

29

Cu

copper

63.546(3)

30

30

Zn

zinc

65.38(2)

35

35

Br

bromine

79.904(1)

36

36

Kr

krypton

83.798(2)

41

41

Nb

niobium

92.90638(2)

42

42

Mo

molybdenum

95.94(1)

47

47

Ag

silver

107.8682(1)

48

48

Cd

cadmium

112.411(8)

53

53

I

iodine

126.905(5)

54

54

Xe

xenon

131.29(4)

59

59

Pr

praseodymium

140.90765(3)

60

60

Nd

neodymium

144.24(1)

65

65

Tb

terbium

158.925(3)

66

66

Dy

dysprosium

162.50(3)

71

71

Lu

lutetium

174.967(1)

72

72

Hf

hafnium

178.49(2)

77

77

Ir

iridium

192.222(1)

78

78

Pt

platinum

195.084(8)

83

83

Bi

bismuth

208.9804(1)

84

84

Po

polonium

209

89

89

Ac

actinium

[227]

90

90

Th

thorium

232.0377(4)

95

95

Am

americium

[243]

96

96

Cm

curium

[247]

101

101

Md

mendelevium

[258]

102

102

No

nobelium

[259]

107

107

Bh

bohrium

[264]

108

108

Hs

hassium

[277]

113

113

Nh

nihonium

[284]

114

114

Fl

flerovium

[289]

119

119

Uut

ununtrium

[288]

120

120

Uuq

ununquadium

[291]

125

125

Uup

ununpentium

[288]

126

126

Uuh

ununhexium

[291]

131

131

Uus

ununseptium

[286]

132

132

Uuo

ununoctium

[289]

13

13

B

boron

10.811(7)

14

14

C

carbon

12.0107(8)

15

15

N

nitrogen

14.00643(4)

16

16

O

oxygen

15.999(7)

17

17

F

fluorine

18.9984032(3)

18

18

Ne

neon

20.1797(6)

23

23

Al

aluminum

26.9815386(8)

24

24

Si

silicon

28.0855(8)

25

25

P

phosphorus

30.97376199(5)

26

26

S

sulfur

32.059(5)

31

31

Ga

gallium

69.723(1)

32

32

Ge

germanium

72.630(8)

37

37

Rb

rubidium

85.468(4)

38

38

Sr

strontium

87.62(1)

43

43

Tc

technetium

98.9062(1)

44

44

Ru

ruthenium

101.07(2)

49

49

In

indium

114.818(1)

50

50

Sn

tin

118.710(7)

55

55

Cs

caesium

132.90545196(3)

56

56

Ba

barium

137.327(7)

61

61

Pm

promethium

[145]

62

62

Sm

samarium

150.36(2)

67

67

Ho

holmium

164.93032(2)

68

68

Er

erbium

167.259(7)

73

73

Ta

tantalum

180.94788(2)

74

74

W

tungsten

183.84(1)

79

79

Au

gold

196.966569(5)

80

80

Hg

mercury

200.59(2)

85

85

At

astatine

210

86

86

Rn

radon

222

91

91

Pa

protactinium

231.03688(2)

92

92

U

uranium

238.02891(3)

97

97

Bk

berkelium

[247]

98

98

Cf

californium

[251]

103

103

Lr

lawrencium

[262]

104

104

Rf

rutherfordium

[261]

109

109

Mt

meitnerium

[268]

110

110

Ds

darmstadtium

[271]

115

115

Mc

moscovium

[288]

116

116

Lv

livermorium

[293]

121

121

Ubu

ununbium

[284]

122

122

Ubd

ununduim

[287]

127

127

Uhs

ununheptium

[284]

128

128

Uht

ununhexium

[287]

133

133

Uts

ununseptium

[286]

134

134

Utu

ununoctium

[289]

1

1

H

hydrogen

1.00794(7)

2

2

He

helium

4.002602(2)

3

3

Li

lithium

6.941(1)

4

4

Be

beryllium

9.012182(2)

11

11

Na

sodium

22.98976928(2)

12

12

Mg

magnesium

24.304(6)

19

19

K

potassium

39.0983(1)

20

20

Ca

calcium

40.078(4)

27

27

Co

cobalt

58.933194(8)

28

28

Ni

nickel

58.6934(4)

33

33

As

arsenic

74.9216(3)

34

34

Se

selenium

78.9718(8)

39

39

Y

yttrium

88.90584(2)

40

40

Zr

zirconium

91.224(2)

45

45

Rh

rhodium

102.9055(2)

46

46

Pd

palladium

106.42(1)

51

51

Sb

antimony

121.757(3)

52

52

Te

tellurium

127.603(3)

57-71

57-71

Lanthanoids

72

72

Hf

hafnium

178.49(2)

81

81

Tl

thallium

204.38(3)

82

82

Pb

lead

207.2(1)

87

87

Fr

francium

[223]

88

88

Ra

radium

[226]

93

93

Pr

praseodymium

140.90765(3)

94

94

Pu

plutonium

[244]

99

99

Es

einsteinium

[252]

100

100

Fm

fermium

[257]

105

105

Db

dubnium

[262]

106

106

Sg

seaborgium

[266]

111

111

Rg

roentgenium

[272]

112

112

Cn

copernicium

[285]

117

117

Ts

tennessine

[294]

118

118

Og

oganesson

[294]

21

21

Sc

scandium

44.95

Fonte: (IUPAC, 2017).

Em termos de valência de configuração eletrônica, os elementos de terras raras mostram $4f^n 5s^2 5p^6 5d^x 6s^2$ ($0 < n < 14$; $x=1$ para La, Ce, Gd e Lu; $x=0$ para os demais) e, preferencialmente, se diferenciam quanto ao preenchimento progressivo da camada interna $4f$ ao longo dos elementos, desde o cério ao lutécio (os demais elementos não apresentam elétrons em f). A adição de elétrons em uma camada interna resulta no aumento da carga nuclear e, portanto, na redução do tamanho do raio iônico, conforme o aumento do número atômico. Esta propriedade é denominada “contração lantanídica” (ABRÃO, 1994; HENDERSON, 1996; SOUSA FILHO; SERRA, 2014). Os ETRP, especificamente, mostram contração suficiente para reduzir o raio iônico à dimensão próxima ao ítrio, justificando as propriedades químicas semelhantes e a conjunta ocorrência desses elementos (GUPTA; KRISHNAMURTHY, 2005).

O fato da variação na configuração eletrônica dos elementos de terras raras estar preferencialmente confinada em uma camada interna confere aos mesmos um comportamento químico bastante semelhante entre eles e estável. Os lantanídeos

apresentam relativamente baixo potencial de ionização, eletropositividade alta e caráter iônico. Mostram raio iônico relativamente grande, diminuindo assim as forças eletrostáticas de atração, de modo que reações de substituição são frequentes e, geralmente, envolvem cátions também grandes, como o cálcio, sódio, estrôncio e o tório.

O estado de oxidação dos ETR é preferencialmente trivalente, com exceção daqueles que mostram configuração eletrônica especificamente em f^0 , f^7 ou f^{14} , com estados também estáveis 2+ e 4+ (menos estáveis que o trivalente) a depender das condições de temperatura, pressão, composição e redução do sistema (HENDERSON, 1996). Os elementos que existem no estado bivalente são o samário (Sm), o európio (Eu) e o itérbio (Yb), enquanto no estado tetravalente estão o cério (Ce), o praseodímio (Pr) e o térbio (Tb) (GUPTA; KRISHNAMURTHY, 2005).

A basicidade dos elementos de terras raras também está relacionada ao tamanho do raio iônico. Uma espécie denominada básica tende a perder ânions e elétrons, e, portanto, cátions com menor atração por ânions ou elétrons (maior raio iônico) são considerados mais básicos do que aqueles fortemente atraídos. Deste modo, a sequência de basicidade dos ETR é decrescente desde o lantânio ao lutécio (bem como a solubilidade), com o ítrio e o escândio mostrando também baixos valores. A basicidade diminui também com o aumento do estado de oxidação das espécies: $2+ > 3+ > 4+$, e é uma característica extremamente relevante aos procedimentos extrativos metalúrgicos de separação desses elementos, determinando as possibilidades de hidrólise/solubilidade dos cátions, de cristalizações/precipitações fracionadas, trocas iônicas, oxidação seletiva etc. (GUPTA; KRISHNAMURTHY, 2005).

Na forma elementar, os elementos de terras raras são maleáveis e usualmente reativos, especialmente em elevadas temperaturas ou quando na forma pura. Apresentam tendência de elevação do ponto de fusão ao longo da série, assim como intensificam-se suas propriedades elásticas. São pouco condutores elétricos, fortemente paramagnéticos (tornando-se ferromagnéticos quando em baixas temperaturas ou na presença de fortes campos magnéticos) e mostram bandas de absorção nas regiões do visível e ultravioleta quando no estado trivalente (com exceção do Ce^{3+} e o Yb^{3+}).

Em termos de reatividade, os metais de terras raras são rapidamente oxidados quando em altas temperaturas e na presença de umidade. Por outro lado, podem ser dissolvidos na presença de ácidos minerais, ácidos orgânicos ou em bases fortes (exemplo, hidróxido de sódio).

De maneira geral, a versatilidade e especificidade dessas propriedades químicas dos elementos de terras raras atribuem aos mesmos, quando na forma elementar, características mecânicas, metalúrgicas, magnéticas, químicas, catalíticas, ópticas, elétricas, térmicas e radioativas com importância tecnológica, ambiental e econômica consideravelmente elevadas (HAXEL et al., 2002; MASSARI; RUBERTI, 2013).

As aplicações variam desde usos bastante simples (pedras de isqueiro, polimento de vidros, corantes para vidros e cerâmicas), até em indústrias de tecnologias limpas (veículos elétricos e híbridos, geradores de energia eólica, lâmpadas fluorescentes, tratamento de emissões gasosas e rejeitos líquidos, processos de craqueamento de petróleo, já que aumentam propriedades de seletividade e estabilidade térmica), aplicações biológicas (propriedades espectroscópicas e magnéticas, interação com materiais biológicos, fornecendo informações estruturais e dos processos químicos ocorridos com as biomoléculas, atuando também como agentes de contraste), indústrias de alta tecnologia (lasers, ímãs permanentes, baterias, circuitos eletrônicos, refrigeração magnética, indústria bélica e nuclear) ou mesmo futuristas (superligas, supercondutividade de alta temperatura, armazenamentos de alta segurança, entre outros) (HAXEL et al., 2002; MARTINS; ISOLANI, 2005).

2.1.2 Minerais portadores e ocorrência geológica

Segundo Abrão (1994), os diversos minerais constituintes de rochas podem ser classificados em relação ao conteúdo de elementos de terras raras, como:

- minerais comuns nas rochas, com raras concentrações de ETR;
- minerais contendo ETR, mas não como constituinte essencial, sendo conhecidas mais de 200 dessas espécies, com proporções de ETR muitas vezes superiores a 0,01%;
- minerais nos quais os ETR são representativos ou essenciais (não menos que 70 espécies; também definidas como “minerais de terras raras” em algumas literaturas).

Esses elementos podem ocorrer em uma ampla variedade de classes de minerais e de tipos estruturais, mas se mostram preferencialmente na forma de carbonatos, fosfatos, silicatos, fluoretos e óxidos (VLASOV, 1966; MIYAWAKI; NAKAI, 1996). A Tabela 1 apresenta alguns dos principais minerais portadores de ETR, com as respectivas fórmulas químicas e conteúdo médio de óxidos de terras raras (OTR) associados.

Tabela 1 – Alguns dos principais minerais portadores de terras raras.

Mineral	Fórmula química teórica	% peso aproximada de OTR
Carbonatos/fluorcarbonatos		
Ancilita	$\text{Sr(ETR)(CO}_3)_2\text{OH H}_2\text{O}$	43
Bastnaesita	$(\text{ETR})(\text{CO}_3)\text{F}$	75
Parisita	$\text{Ca(ETR)}_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$	60
Sinchisita	$\text{Ca(ETR)(CO}_3)_2\text{F}$	51
Fosfatos		
Britholita	$(\text{ETR,Ca})_5(\text{SiO}_4)_3(\text{OH,F})$	32
Churchita	$\text{YPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	51
Florencita	$(\text{ETR})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	32
Monazita	$(\text{ETR,Th})\text{PO}_4$	65
Rabdofanita	$(\text{ETR})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	65
Xenotima	YPO_4	61
Silicatos		
Allanita	$(\text{ETR,Ca}_2(\text{Al,Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH}))$	37
Cerita	$\text{ETR}_9\text{Fe}^{3+}(\text{SiO}_2)_6[(\text{SiO}_3)(\text{OH})](\text{OH})_3$	70
Cheralita	$(\text{Ca,ETR,Th})(\text{P,Si})\text{O}_4$	31
Chevkinita	$(\text{Ca,ETR,Th})_4(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_2(\text{Ti,Fe}^{3+})_3\text{Si}_4\text{O}_{22}$	42
Eudialita	$\text{Na}_4(\text{Ca,ETR})_2(\text{Fe}^{2+},\text{Mn}^{2+},\text{Y})\text{ZrSi}_8\text{O}_{22}(\text{OH,Cl})_2$	9
Gadolinita	$(\text{ETR})_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$	54
Fluoretos		
Fluocerita	$(\text{ETR})\text{F}_3$	83
Gagarinita	NaCaY(F,Cl)_6	38
Óxidos		
Brannerita	$(\text{U,Ca,ETR})(\text{Ti,Fe})_2\text{O}_6$	9
Cerianita	$(\text{Ce}^{4+},\text{Th})\text{O}_2$	63
Euxenita	$(\text{Ca,ETR,U,Th})(\text{Nb,Ta,Ti})_2\text{O}_6$	24
Fergusonita	$(\text{ETR})\text{NbO}_4$	47
Loparita	$(\text{ETR,Na,Ca})(\text{Ti,Nb})\text{O}_3$	30
Samarskita	$(\text{Y,Fe}^{3+},\text{U})(\text{Nb,Ta})_5\text{O}_4$	24

Fonte: (MINDAT, 2017). Obs: OTR = óxidos de terras raras.

Atualmente, apenas três dos ditos “minerais de terras raras” são importantes formadores de depósitos de terras raras e respondem por quase todo o

abastecimento de ETR da indústria de transformação mundial: a bastnaesita, a monazita e a xenotima (MARIANO, 1989; JORDENS et al., 2013). Além desses, a indústria chinesa tem também aproveitado economicamente os ETR adsorvidos em argilas iônicas, desde a década de 1990 (WU et al., 1996).

Alguns outros minerais, como apatita, perovskita, pirocloro, zircão e goiazita, embora não sejam tipicamente "minerais de terras raras", podem naturalmente concentrar teores significativos de ETR e são também considerados fontes potenciais desses elementos (GUPTA; KRISHNAMURTHY, 2005).

A bastnaesita e a monazita são importantes fontes principalmente de elementos de terras raras leves (ETRL), enquanto que na xenotima e nas argilas iônicas são predominantes as variedades pesadas (ETRP). Kanazawa e Kamitani (2006) correlacionam as diferenças de raio iônico e número de coordenação dos ETRL e ETRP com as classes de minerais. Os ETRL ocupam sítios maiores (NC - número de coordenação geralmente entre 8-10) e ocorrem principalmente na forma de carbonatos e fosfatos, enquanto os ETRP, ocupando sítios menores (NC - número de coordenação entre 6-8), são frequentes na forma de óxidos e em fosfatos quando NC = 8. Já as estruturas dos silicatos são bastante variadas e, portanto, aceitam tanto os ETRL como os ETRP.

A bastnaesita é um fluorcarbonato de terras raras que contém aproximadamente 75% de óxidos de terras raras (OTR) em sua composição, sendo predominantes os elementos cério (Ce), lantânio (La), neodímio (Nd) e, em menor quantidade, praseodímio (Pr). Já a monazita é um ortofosfato, com conteúdo total de OTR bastante semelhante à bastnaesita, e que pode apresentar teores muitas vezes significativos de tório (0 e 20%) e urânio (0 a 16%) associados, tornando-a radioativa (ABRÃO, 1994; JORDENS et al., 2013).

A xenotima (ou xenotímio) é um fosfato de terras raras com teor de OTR da ordem de 60%, sendo predominantes os elementos pesados, com destaque para o conteúdo de Y_2O_3 . Os teores contidos de Ce, La, Nd e Pr são inferiores àqueles observados na bastnaesita e na monazita, totalizando cerca de 8%. A xenotima é considerada a principal fonte de ETRP, juntamente com as argilas iônicas.

As chamadas argilas iônicas são uma importante fonte de elementos de terras raras pesados, mas apresentam teores de OTR bastante baixos, entre 0,05 e 0,50% (preferencialmente ETRP), na forma de íons adsorvidos às camadas externas de

filossilicatos (principalmente caulinita e haloisita), gerados pelo intemperismo de rochas magmáticas de origem primária, portadoras de terras raras. A relativa abundância dessas argilas, assim como a facilidade de exploração, tornam esse tipo de depósito uma fonte viável para aproveitamento econômico (CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012; MOLDOVEANU; PAPANGELAKIS, 2012).

Quanto à ocorrência geológica, os minerais portadores de elementos de terras raras são encontrados em ambientes geológicos bastante variados e em baixas concentrações, sendo que os principais depósitos são classificados geneticamente em tipos ígneos, sedimentares ou secundários (KANAZAWA; KAMITANI, 2006; CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012). A Figura 3 ilustra os possíveis ambientes geológicos/geotectônicos formadores de depósitos de terras raras e as rochas que se encontram associadas.

Figura 3 – Ambientes geológicos onde ocorrem depósitos de terras raras.

Fonte: (modificado de CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012)

Os depósitos ígneos de terras raras estão associados preferencialmente a rochas alcalinas e carbonatíticas, onde processos como fusão parcial da crosta, cristalização fracionada e/ou mistura de magmas estão envolvidos. Muitas vezes, os altos conteúdos de ETR são relacionados, além dos processos magmáticos, a outras fontes de enriquecimento, tais como estágios metassomáticos tardios de remobilização por fluidos hidrotermais (KANAZAWA; KAMITANI, 2006; CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012).

Os maiores recursos mundiais de bastnaesita ocorrem em complexos alcalino-carbonatíticos, enquanto uma pequena quantidade de minerais portadores de terras raras acompanha também granitos, alcali-granitos e suítes alcalinas, assim

como pegmatitos e escarnitos, embora não sejam considerados recursos econômicos.

Fleischer e Altschuler (1969) abordam as variações na geoquímica de minerais portadores de terras raras em diferentes ambientes geológicos de formação. A composição da monazita, por exemplo, apesar da predominância de elementos leves (ETRL, preferencialmente de La e Ce), mostra discretas e sistemáticas diferenças de conteúdos entre rochas graníticas e pegmatíticas em relação às alcalino-carbonatíticas; em média, as primeiras apresentam maiores conteúdos de Nd e maior ocorrência de ETRP.

Em relação aos depósitos sedimentares, são representativos basicamente placers e conglomerados, formados a partir de minerais detríticos provindos de uma ampla variedade de rochas primárias, desde simples veios de quartzo até complexos ígneos e metamórficos. Os depósitos de placers são amplamente espalhados pelo mundo, concentrando-se em rios, deltas e cordões litorâneos, e a monazita é o principal mineral de terras raras presente, seguida pela xenotima.

Em regiões tropicais e subtropicais, os processos intempéricos (clima úmido, moderada a alta precipitação pluviométrica, relevo que favoreça a drenagem das águas etc.) são também poderosos mecanismos de concentração residual de minerais portadores de terras raras, a partir da alteração de rochas originalmente portadoras. O denominado intemperismo químico atua na solubilização de minerais primários como carbonatos e apatita (típicos portadores de ETR em alguns desses depósitos), que liberam ETR, CO_3^{2-} e PO_4^{3-} para a formação de monazita secundária ou bastnaesita secundária, por exemplo, como também acontece quando da percolação dos fluidos hidrotermais (MARIANO, 1989). Durante o intemperismo ocorre ainda uma variação na partição dos ETR, resultando na incorporação de ETRL e ETRP em espécies minerais separadas, já que a estabilidade dos mesmos é elevada desde o lantânio ao lutécio (ETRP são mais estáveis e demoram mais para serem reprecipitados). Particularmente, as denominadas argilas iônicas explotadas na China referem-se aos elementos de terras raras lixiviados de rochas graníticas ou vulcânicas enriquecidas em ETR, incorporados à superfície de argilominerais na forma de íons adsorvidos. O conteúdo e a distribuição desses elementos são dependentes de fatores ambientais, sendo que sob condições de pH neutro a alcalino, os lantanídeos se acumulam por adsorção nos argilominerais, e em pH

ácido esses íons adsorvidos são removidos (MARIANO, 1989; BAO; ZHAO, 2008; LONG et al., 2010).

Berbert (1984), Gomes et al. (1990), Biondi (2005) e Takehara et al. (2015) descrevem os aspectos geológicos/geotectônicos dos vários ambientes com ocorrência e concentração de terras raras no Brasil.

Vlasov (1966) destaca ainda que os diversos minerais que contenham terras raras, mesmo que em teores insignificantes para seu o aproveitamento industrial, são ainda de grande interesse em estudos geoquímicos, mineralógicos e petrogenéticos de rochas devido a sua estabilidade. A presença desses elementos em pequenas quantidades (traços) traz informações relevantes ao entendimento da formação das rochas, possibilitando, por exemplo, o estabelecimento de relações genéticas, tendências de proveniência e diferenciação de magmas, definição de áreas fonte e a natureza das rochas sedimentares de acordo com a distribuição dos ETR, assim como o entendimento de fatores geológicos e físico-químicos que condicionam a concentração ou dispersão de determinadas substâncias. São utilizados também na datação de rochas e de minerais (granadas, por exemplo), considerando a abundância relativa do samário/neodímio.

2.1.3 Recursos e produção no Brasil e no mundo

Os recursos mundiais de terras raras totalizam 120 milhões de toneladas (USGS, 2017), sendo que a China responde por cerca de 40% dos mesmos e o Brasil por 18%. Essa distribuição foi significativamente modificada nos últimos anos (a partir de 2013), quando os dados atualizados pelo governo brasileiro colocaram o país como o segundo maior detentor desses recursos. Até então, o Brasil vinha ano a ano representando valores sempre inferiores a 1%.

Além da China e do Brasil, são importantes os recursos da Austrália, da Índia, dos Estados Unidos e da Malásia, além de alguns países da CEI (Comunidade dos Estados Independentes). A Tabela 2 apresenta os dados atualizados de recursos mundiais, assim como os principais países produtores (USGS, 2017).

A China, além de detentora das maiores reservas, é também o principal produtor de terras raras e, atualmente, controla 83% da oferta mundial.

Bayan Obo, localizado na província da Mongólia Interior (China), é o maior depósito de minerais de terras raras do mundo e ocorre em rochas carbonatíticas expostas a processos hidrotermais, com a formação do depósito poliminerálico de

Fe-ETR-Nb. Deste minério é extraída a bastnaesita (mineral primário) e, secundariamente, a monazita (baixo conteúdo de tório), como subprodutos da exploração do minério de ferro, além da fluorita e minerais de nióbio que também estão presentes. O teor médio de OTR nesse depósito é de 6% (HAXEL et al., 2002; KANAZAWA; KAMITANI, 2006; KYNICKY et al., 2012). Outros relevantes depósitos de bastnaesita na China estão nas províncias de Gansu e Sichuan (HUANG et al., 2006; XIE et al., 2009).

Tabela 2 – Recursos estimados e produção mundial de terras raras.

Recursos (10³ toneladas)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	% 2016
Estados Unidos	13.000	13.000	13.000	1.800	1.800	1.400	1
Austrália	1.600	1.600	2.100	3.200	3.200	3.400	3
Brasil	48	36	22.000	22.000	22.000	22.000	18
China	55.000	55.000	55.000	55.000	55.000	44.000	37
Índia	3.100	3.100	3.100	3.100	3.100	6.900	9
Malásia	30	30	30	30	30	30	<1
Outros	41.000	41.000	41.000	41.000	41.000	42.500	35
Total	115.000	115.000	140.000	130.000	130.000	120.000	100
Produção (toneladas)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	% 2016
Estados Unidos	-	800	5.500	5.400	5.900	-	-
Austrália	2.200	3.200	2.000	8.000	12.000	14.000	11
Brasil	250	140	330	-	880	1.100	1
China	105.000	100.000	95.000	105.000	105.000	105.000	83
Índia	2.800	2.900	2.900	-	1.700	1.700	1
Malásia	280	100	180	240	500	300	<1
Outros	-	2.400	2.500	2.500	3.800	4.100	3
Total	110.000	110.000	110.000	123.000	130.000	126.000	100

Fonte: (USGS, 2017). Obs: - = dados não disponíveis.

A segunda maior fonte de extração de elementos de terras raras na China está relacionada às argilas iônicas originadas das crostas lateríticas desenvolvidas sobre rochas graníticas e sieníticas no sul do país (províncias de Guang-dong, Hunan, Jiangxi e Jiangsu). Nessas argilas, o conteúdo de OTR é bastante baixo (entre 0,05 e 0,20%) e, essencialmente, na forma de elementos pesados.

Mountain Pass nos Estados Unidos é o segundo maior depósito de bastnaesita do mundo, logo após Bayan Obo, e também ocorre em rochas carbonatíticas. Atinge teores de OTR entre 5-10% (KANAZAWA; KAMITANI, 2006). Trata-se de um empreendimento mineiro fechado em 2002 por questões de mercado e que, recentemente, passou por novos investimentos para a retomada de sua

produção pela empresa Molycorp Minerals (CHEN, 2011; ROCIO et al., 2012), mas que ainda permanece inativo.

Com relação aos menores produtores pode-se destacar a Rússia, com a exploração da loparita, a Malásia que extrai monazita e xenotima como subprodutos do minério de cassiterita, e as areias monazíticas da Índia e do Brasil (WALTERS; LUSTY, 2011). Na Austrália destaca-se o minério carbonatítico supérgeno de Mount Weld (explorado pela empresa Lynas Corporation), onde fosfatos secundários e monazita são os minerais de interesse (recursos em 6 milhões de toneladas, com teor de OTR de 12%), assim como os depósitos de monazita e xenotima nas areias litorâneas (KANAZAWA; KAMITANI, 2006).

Apesar de serem poucos os países produtores, muitos projetos de pesquisa em terras raras estão em desenvolvimento em vários países, inclusive em fases bastante avançadas de estudo, podendo ser destacados os projetos na Austrália, Cazaquistão, Vietnã, Canadá, África do Sul, Turquia e Groelândia (CHEN, 2011).

Long et al. (2010) e Chen (2011) destacam a ampla distribuição desses depósitos pelo mundo e a forma como esses países estão se organizando para o aproveitamento dos recursos. Ressaltam que os dados estimados de recursos e produção vão continuar se modificando nos próximos anos tendo em vista as novas pesquisas que estão em andamento, e que o Brasil estará em destaque no que se refere às grandes reservas minerais. A Figura 4 ilustra a ampla distribuição dos depósitos de terras raras no Brasil e no mundo.

As ocorrências de terras raras no Brasil são numerosas e os recursos geológicos importantes, estando principalmente relacionadas aos complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos, embora apenas as monazitas dos cordões litorâneos e depósitos aluvionares já foram objeto de lavra para efetiva produção. Esses depósitos, já em fase de exaustão, situam-se na zona litoral dos estados do Rio de Janeiro (RJ), Espírito Santo (ES) e Bahia (BA), sendo a empresa Indústrias Nucleares do Brasil (INB Buena) responsável pela exploração da monazita e dos outros minerais pesados (ilmenita, zirconita, rutilo). A produção brasileira de monazita variava de 140 a 330 toneladas entre 2011 e 2013, referente ao estoque disponível da INB, e foi nula em 2014, quando as importações de compostos químicos e produtos manufaturados de terras raras somaram US\$ 13 milhões (FOB) e as exportações US\$ 383 mil (FOB) (ANDRADE, 2016; USGS, 2017). Takehara et

al. (2015) apresenta outros depósitos do tipo placer com potencial econômico para aproveitamento de terras raras no Brasil.

Figura 4 - Distribuição mundial dos depósitos, ocorrências e recursos de terras raras, em azul, e minas em operação em vermelho (dados de 2002). Destaque para a produção brasileira de monazita em São João da Barra e Buena (RJ), Itapemirim (ES) e Cumuruxatiba (BA).

Fonte: (ORRIS; GRAUCH, 2002).

Dentre as mineralizações de terras raras que ocorrem em complexos alcalinos e alcalino-carbatíticos brasileiros, essencialmente tendo a monazita como

mineral útil, os seguintes projetos podem ser destacados, sendo que merecem referência especial, pelas suas reservas (potenciais) e teores, os depósitos de Catalão (GO) e Araxá (MG) (LORENZI, 1999; LAPIDO-LOUREIRO, 2013; TAKEHARA et al., 2015).

- Morro dos Seis Lagos (AM) - Mineralizações de nióbio, ferro, terras raras e manganês associadas às cangas lateríticas que recobrem o corpo carbonatítico. Recurso estimado de ETR de 43,5 Mt @ 1,5% OTR. Minerais de interesse econômico: ilmenorutilo, Nb-brookita, florencita, monazita, hematita, goethita, holandita.
- Barra do Itapirapuã I e II (SP e PR) - Mineralizações de terras raras, fluorita e chumbo em complexo carbonatítico preferencialmente calcítico, com ocorrência subordinada de carbonatito dolomítico, ferro-carbonatito, silico-carbonatito, brecha carbonatítica, silexito e piroxenito. Recurso estimado de ETR de 44,8 Mt @ 0,7% OTR. Minerais de interesse econômico: carbonatos e fosfatos de TR, fluorita e galena.
- Araxá (MG) - Mineralizações de nióbio, fosfato, bário, terras raras e urânio em complexo carbonatítico preferencialmente dolomítico, seguido de carbonatito calcítico, glimerito, foscorito, lamprófito e silexito. Recurso estimado de ETR (reservas lavráveis) de 14,2 Mt @ 3,02% OTR pertencentes a CBMM e 7,73 Mt @ 2,35% OTR pertencentes a CODEMIG, sendo ainda 6,3 Mt @ 5,01% OTR pertencentes a MBAC Fertilizantes Corp. Minerais de interesse econômico: Ba-pirocloro, apatita, barita e fosfatos.
- Catalão I (GO) - Mineralizações de fosfato, nióbio, titânio, terras raras e vermiculita em complexo carbonatítico preferencialmente calcítico, seguido de peridotito, piroxenito (serpentinitos), silexito e glimerito. Recurso estimado de ETR (reservas lavráveis) de 78,9 Mt @ 8,67 OTR. Minerais de minério: fluorapatita, pirocloro, perovskita, Ti-magnetita, ilmenita, anatásio, monazita, rabdofanita, parisita, florencita e vermiculita. Catalão II (GO) - Mineralizações de nióbio e fósforo em complexo carbonatítico calcítico associado com foscorito, glimerito e silexito. Recurso estimado de ETR de 25,0 Mt @ 0,98 OTR. Minerais de interesse econômico: Ba-pirocloro e apatita, com monazita. A Vale Fertilizantes e a CMOC são empresas detedoras de direitos de exploração desses depósitos.

- Tapira (MG) - Mineralizações de fosfato, titânio, nióbio e terras raras em complexo carbonatítico calcítico, seguido de piroxenito, peridotito, uncomphagrito, traquito, sienito e silexito. Recurso estimado de ETR de 1 Mt @ 1 a 10,0% OTR. Minerais de interesse econômico: apatita, anatásio, Ba-pirocloro e fosfatos de TR.
- Morro do Ferro (MG) - Mineralizações de terras raras, urânio, molibdênio, zircônio e bauxita em rochas intrusivas, preferencialmente tinguaítos, além de fonolitos, nefelina sienitos com lavas, tufos e brechas vulcânicas subordinadamente. Recurso estimado de ETR de 7,0 Mt @ 2,89% OTR, com potencial para 10 Mt @ 5,00% OTR no minério saprolítico. Minerais de minério: bastnaesita, cerianita e thorugummita, uraninita, jordisita/ilsemannita, fluorita, pirita e zirconita.

Essas mineralizações ocorrem preferencialmente a partir de processos metassomáticos associados aos complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos, com posterior enriquecimento residual, onde o clima tropical úmido associado às condições ideais de precipitação pluviométrica e topografia favoreceu a formação de minerais residuais.

Takehara et al. (2015) apresentam em detalhe as características e importância desses depósitos e de outros potenciais para o aproveitamento de terras raras. O interesse econômico, muitas vezes, está vinculado à mineralização de outros bens minerais, como é o caso dos depósitos de fosfato de Tapira (MG), do minério de nióbio e fosfato de Araxá (MG), fosfato de Catalão (GO), da fluorita de Mato Preto (PR), da cassiterita em Pitinga (AM), entre outros.

Pitinga merece destaque por se tratar de uma jazida estanífera de reconhecimento mundial, originada a partir de uma intrusão granítica. Além da cassiterita, estão presentes mineralizações de columbita-tantalita, criolita, zircão, pirocloro e xenotima, que ocorrem tanto nas rochas primárias como em aluviões originados a partir das mesmas. Essas mineralizações poderão ainda ser extraídas como subprodutos de alto valor comercial, contribuindo para a sustentabilidade e melhor aproveitamento da jazida. A xenotima presente em aluviões ocorre preferencialmente em granulação grossa e, atualmente, é descartada na barragem de rejeito de minerais pesados, logo após o processo de beneficiamento para a concentração física da cassiterita. Assinaturas de elementos de terras raras também

ocorrem no zircão, no pirocloro, além de estarem presentes gagarinita e fluocerita (PIRES, 2010; LAPIDO-LOUREIRO, 2013; FORMOSO et al., 2016).

Ainda segundo Lapido-Loureiro (2013), o Brasil apresenta também bom potencial para o estudo de argilas iônicas, tais como as que ocorrem na China, tendo em vista a abundância de espessos horizontes de rochas intemperizadas, como as alterações argilosas de granitos alcalinos do norte do país (Pitinga - AM) e as coberturas residuais lateríticas de complexos alcalino-carbonatíticos conhecidos, como o Morro dos Seis Lagos e Maicuru (AM). Outra ocorrência em destaque é o material saprolítico do Granito Serra Dourada, em Minaçú (GO), atualmente estudado pela empresa Mineração Serra Verde, que divulgou recentemente a possibilidade de aproveitamento de argilas iônicas, com recursos da ordem de 900 milhões de toneladas e teor de 0,12% de OTR, preferencialmente relativos a terras raras pesadas. A empresa já detém a rota de processamento para este material e sua operação está prevista ainda para 2017 (ROCIO et al., 2012; LAPIDO-LOUREIRO, 2013; SERRAVERDE, 2017).

Tendo em vista os variados projetos em estudo no Brasil, Lima (2012) destaca que ainda mais importante que a atividade de mineração de terras raras no país é a construção de uma cadeia produtiva para se agregar valor ao recurso natural. Apesar de importantes iniciativas, é clara a falta de uma política industrial para os elementos de terras raras.

A presença usual de conteúdos de tório e de urânio associados à monazita, e decorrente radioatividade, implica processamentos mais complexos e de maiores custos (disposição de materiais radioativos no ambiente e regulamentação específica). Dessa forma, muitos depósitos de monazita não são ainda considerados economicamente interessantes pela incapacidade tecnológica e/ou econômica para o seu aproveitamento (LONG et al., 2010).

2.1.4 Breve histórico da produção mundial e economia atual

Iniciou-se em 1885 a produção mundial de terras raras em larga escala, tendo como matéria-prima as areias monazíticas do litoral brasileiro, preferencialmente no estado do Bahia (Cumuruxatiba) (SERRA, 2011; LAPIDO-LOUREIRO, 2013). O Brasil manteve a posição de maior produtor até 1915, quando passou a alternar esta posição com a Índia durante 37 anos, também a partir da produção de monazita aluvionar (subproduto da exploração de tório e urânio) (WALTERS; LUSTY, 2011).

Em 1952, a África do Sul tornou-se o maior produtor de terras raras, depois da descoberta de veios pegmatíticos ricos em monazita (ROCIO et al., 2012).

Em 1960, os Estados Unidos (EUA) assumiram a liderança da produção mundial com outro tipo de mineral: a bastnaesita proveniente de Mountain Pass na Califórnia. Em 1970, a Austrália detinha 50% da oferta mundial com a produção de monazita e dividia o mercado das terras raras com os EUA.

Na década de 1980, a China emergiu como um gigante no comércio de terras raras, tanto pelas reservas definidas como pelo volume de produção da sua jazida de Bayan Obo, ampliando significativamente sua participação no mercado mundial a partir de 1990 (LAPIDO-LOUREIRO, 2013).

Na década de 2000, a China atingiu proporções superiores a 90% do comércio mundial das terras raras (acima de 95% entre os anos de 2005 e 2010). A prática de preços muito baixos decretou praticamente o fim das operações em outros países (inclusive na mina de Mountain Pass, que se manteve fechada a partir de 2002), suprimindo a demanda mundial por terras raras e aplicações tecnológicas.

Porém, já no final de 2009, a China anunciou planos de redução da cota de exportação para 35 mil toneladas/ano para o período entre 2010 e 2015, sob a alegação de conservar suas reservas, proteger o meio ambiente e elevar a demanda interna (WÜBBEKE, 2013). No fim de 2010, foi divulgado que a primeira rodada de cotas de exportação de 2011 seria de aproximadamente 14,5 mil toneladas, o que representava uma queda de cerca de 40% em relação ao inicialmente proposto (ROCIO et al., 2012). Além das restrições rigorosas às exportações, a China aplicou tributos mais altos sobre os minérios e pressões para o processamento do minério no próprio país, também com o intuito de reprimir o contrabando desses minerais.

Em consequência do aumento da demanda dos metais de terras raras e de seus óxidos de alta pureza, indispensáveis às indústrias de alta tecnologia, as restrições da oferta chinesa impulsionaram a indústria mineral de outros países a buscar novas fontes de fornecimento para garantir um suprimento estável, ainda que a alto custo relativo de produção. Dessa forma, estão sendo retomadas as pesquisas e os estudos de viabilidade econômica para a reativação de projetos em terras raras que haviam sido interrompidos em muitos países (CHEN, 2011; MASSARI; RUBERTI, 2013).

Nesse contexto, destaca-se a especial preocupação do Japão pelo tema, uma vez que se trata de um país pobre em recursos naturais e dependente de importações para abastecer sua economia. Na indústria das terras raras, o Japão domina mundialmente a tecnologia de transformação e produz a maioria dos componentes que contém esses elementos, sendo, portanto, um dos principais consumidores da produção chinesa (preferencialmente metais), juntamente com os Estados Unidos e União Europeia. Esses países questionaram as taxas e cotas chinesas frente à Organização Mundial do Comércio (OMC) e estão sendo forçados a encontrar recursos alternativos e aumentar a cooperação e acordos comerciais com outros países exportadores ou que detenham recursos, de modo a reduzir a dependência do fornecimento chinês (BLAKELY et al., 2011). Em 2014, por solicitação da OMC, a China encerrou a política de cotas de exportação para ETR e removeu as tarifas de exportação. A regularização do suprimento e a estabilização dos preços, no entanto, não devem ocorrer em curto prazo (TAKEHARA et al., 2015).

No Brasil, o governo também buscou encorajar novos projetos, inserindo a exploração de elementos de terras raras no Plano Nacional de Mineração 2030 de 2013, que lida com questões estratégicas industriais do país, colaborando com a redução das correntes importações. Os incentivos são para a busca por futuros alvos de exploração mineral e também para o desenvolvimento de toda a cadeia produtiva de ETR (MME, 2010; ROCIO et al., 2012). Apesar da conscientização geral acerca da falta de tecnologia brasileira nesse setor e dos crescentes estímulos à mineração e ao estabelecimento de parcerias para a fabricação de produtos de TR, inclusive através de financiamentos da FINEP e BNDES, desde 2013 tais estímulos praticamente não geraram resultados concretos e a intercomunicação entre empresas e institutos de pesquisa continua bastante limitada (SOUSA FILHO; SERRA, 2014).

2.2 Exploração do minério de terras raras

Uma ampla diversidade de métodos de lavra e técnicas de processamento pode ser utilizada na exploração dos minérios de terras raras, já que provêm de variados tipos geológicos de depósitos, podendo se tratar de diferentes minerais extraídos economicamente, além de serem frequentemente explorados como

subprodutos de outros metais, ditando dessa forma a economicidade das operações (WALTERS; LUSTY, 2011; JORDENS et al., 2013).

De maneira geral, as etapas de processamento dos minérios de terras raras atualmente em produção envolvem a lavra (geralmente a céu aberto), os processos de cominuição e de separações minerais (beneficiamento) e a lixiviação química do produto da concentração física para a obtenção dos elementos ETR individualizados (hidrometalurgia).

2.2.1 Beneficiamento da bastnaesita nas principais minas do mundo

Como já mencionado anteriormente, a bastnaesita é atualmente extraída em larga escala somente da mina de Bayan Obo na China (WALTERS; LUSTY, 2011).

Em Bayan Obo, o beneficiamento da bastnaesita envolve diversas etapas de separação, devido à ampla variedade de espécies minerais aproveitadas como subprodutos da exploração do minério de ferro. O teor médio de OTR nesse depósito é de 6% e a liberação da bastnaesita e da monazita (também presente) ocorre em granulometria muito fina.

Inicialmente, o minério é moído abaixo de 0,074 mm (P_{95}) e submetido às seguintes etapas de concentração: separação magnética de baixa intensidade (remoção da magnetita), flotação (separação da fluorita, calcita e barita), separação magnética de alta intensidade (remoção da hematita), flotação e concentração densitária para a obtenção do concentrado final de bastnaesita com teor de ~68% de OTR e de monazita com ~47% de OTR, sendo a recuperação total de OTR da ordem de 60% (VIERA; LINS, 1997; LI; YANG, 2014; ZHANG et al., 2016).

A mina de Mountain Pass (EUA), quando em operação, também apresentava a flotação como operação principal de beneficiamento do minério de bastnaesita. Após a lavra, o minério com teor de OTR entre 5-10% era britado e moído abaixo de 0,15 mm (P_{80}), classificado e diretamente submetido ao condicionamento com reagentes químicos previamente às etapas de flotação. O concentrado da flotação era o produto final, com ~60% de OTR, sendo a recuperação total de OTR da ordem de 65-70% (VIERA; LINS, 1997; WALTERS; LUSTY, 2011).

2.2.2 Beneficiamento da monazita em depósitos inconsolidados

A monazita é produzida predominantemente como subproduto da mineração de areias com minerais pesados (depósitos de placers), de onde são também comumente explorados minerais de titânio e zircônio.

A dragagem é a técnica de lavra mais usual aplicada a estes depósitos, embora muitos deles sejam extraídos pelo método de lavra em tiras (quando o depósito é seco ou não influenciado pelo nível da água), utilizando-se raspadores, escavadoras e pás carregadoras para a coleta e transporte do minério até a usina de processamento.

No processamento físico, os minerais pesados são concentrados a partir de uma combinação de métodos, que envolvem essencialmente separações densitárias, eletrostáticas e magnéticas, a depender da assembleia mineralógica presente e dos minerais a serem aproveitados (VIERA; LINS, 1997).

Após a obtenção de um produto pesado na separação densitária, a separação eletrostática visa a separação dos minerais condutores dos não condutores (por exemplo, a monazita e o zircão). Os minerais não condutores são posteriormente separados entre si por meios magnéticos, já que a monazita apresenta certo grau de magnetismo, enquanto o zircão não. Os concentrados de monazita normalmente apresentam teores entre 55 e 65% de OTR.

No Brasil, a empresa INB Buena, localizada no município de São Francisco de Itabapoana (RJ), é a encarregada da prospecção, pesquisa, lavra, industrialização e comercialização dos minerais pesados conhecidos popularmente como "areias monazíticas". Atualmente, o minério está em fase de exaustão e a produção desativada, sendo comercializado apenas o produto disponível em estoque. Quando em operação, a lavra do minério era feita a céu aberto e com auxílio de escavadeiras hidráulicas. Previamente à lavra, era retirada a camada superficial do solo, rico em matéria orgânica, e estocada no próprio local para ser utilizada na fase final de recuperação dos terrenos lavrados. O procedimento de beneficiamento não necessitava de etapas de cominuição e a partir de separações densitárias, eletrostáticas e magnéticas eram obtidos diferentes produtos de concentrado de minerais pesados: ilmenita (97% em massa), rutilo (75%) e monazita (90%) (VIERA; LINS, 1997).

2.2.3 Beneficiamento das argilas iônicas

O procedimento de lavra das argilas iônicas da China é bastante simples visto seu caráter superficial e natureza friável dos depósitos onde ocorrem. O minério, com teor de OTR entre 0,05 e 0,20% (40% relativos a terras raras pesadas), é lavrado a céu aberto e não necessita de etapas de processamento físico, sendo diretamente submetido à lixiviação química, realizada parcialmente *in situ*, o que reduz consideravelmente os custos de processamento, ao mesmo tempo em que se mostra um procedimento bastante agressivo ao meio ambiente (KANAZAWA; KAMITANI, 2006; WALTERS; LUSTY, 2011).

Com relação ao projeto de exploração de argilas iônicas do minério saprolítico de Minaçú (GO) em desenvolvimento pela Mineração Serra Verde no Brasil, com teor de OTR de 0,12% (60% relativos a terras raras pesadas), o beneficiamento previsto envolverá a lavra a céu aberto e de forma mecanizada, seguida de etapas de pré-classificação e de desaglomeração/aglomeração em tambores, os quais seguirão para as específicas áreas de lixiviação (SERRAVERDE, 2017).

Os procedimentos de lixiviação para a recuperação de elementos de terras raras destes tipos de minérios são apresentados no item 2.2.5.

2.2.4 Métodos de concentração física

Neste item são, simplificadaamente, descritos os métodos de concentração física, englobando separações densitárias, magnéticas, eletrostáticas e a concentração por flotação, comumente aplicados ao processamento de minerais de terras raras, tendo em vista suas propriedades físicas e químicas.

Um dos grandes desafios desses procedimentos quando aplicados aos minerais de terras raras é, além de seus tamanhos muito reduzidos de grão e liberação, o fato de minerais de ganga mostrarem propriedades físicas semelhantes às suas, dificultando a recuperação.

- Concentração densitária ou gravítica

A concentração densitária é um procedimento bastante relevante para a concentração de minerais de terras raras, visto que apresentam densidade relativamente alta, comparativamente com outros minerais, geralmente entre 4 e 7 (JORDENS et al., 2013).

As separações se baseiam na diferença de densidade entre os minerais de interesse e a ganga, sendo que parâmetros como tamanho e forma das partículas podem também interferir na denominada separação gravítica (LUZ et al., 2010).

As separações podem ser efetuadas de maneira estática (predominando a força gravitacional) ou dinâmica (predominando a força centrífuga), utilizando como meios separadores o meio denso (separação densitária - suspensão de água e ferro-silício ou magnetita) ou a água (separação gravítica). Como resultado, tem-se produtos enriquecidos de minerais mais ou menos pesados em relação à densidade do meio e de acordo com as condições de operações aplicadas ao ensaio. Exemplos de equipamentos industriais de separação densitária são: cone, tambor e ciclone; e de separação gravítica: calha, jig, mesa oscilatória e espiral (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982; LUZ et al., 2010).

No contexto das terras raras, dentre as dificuldades que envolvem este tipo de separação está a variedade de minerais que apresentam densidades específicas também elevadas ou semelhantes a dos minerais de interesse, e que muitas vezes ocorrem nos mesmos ambientes geológicos de formação, como no caso dos complexos carbonatíticos, além dos minerais de interesse comumente estarem presentes em tamanhos muito reduzidos e intimamente associados com a ganga.

A granulometria muito fina de partículas é geralmente um fator crítico em diversas etapas de separação física mineral inclusive em separações densitárias. Os limites de tamanho variam em função do procedimento de separação aplicado, mas, de maneira geral, estão entre 100-1000 μm para os equipamentos descritos acima e chegam a 20 μm em concentradores de mais alta capacidade centrífuga.

Ozbayoglu e Atalay (2000) utilizaram o concentrador de multi-gravidade Mozley (MGS) para o beneficiamento de bastnaesita fina na Turquia (produto Overflow da deslamagem) e obtiveram recuperações de OTR da ordem de 50%, enquanto Chan (1992) não alcançou bons resultados aplicando o mesmo concentrador no minério supérgeo e bastante fino de monazita da Austrália, mesmo considerando um material deslamado.

Alguns estudos apresentam ainda a calcinação como operação prévia às concentrações densitárias. Temperaturas acima de 1000°C permitem a conversão dos carbonatos (tal como a bastnaesita) em óxidos, de forma a elevar o peso

específico dos mesmos e, conseqüentemente, sua susceptibilidade nas separações, além de reduzir gastos com energia em eventuais etapas anteriores de moagem.

- Separação magnética

Elementos de terras raras apresentam certo grau de magnetismo em função de sua configuração eletrônica, onde elétrons ocupando a camada interna 4f mostram momentos magnéticos que não são anulados (fortemente paramagnéticos).

A separação magnética se baseia na diferença de resposta dos minerais quando submetidos a um campo magnético (susceptibilidade magnética). Minerais denominados ferromagnéticos são aqueles fortemente atraídos pelo imã comum (apresentam momento magnético mesmo na ausência de um campo externo), os paramagnéticos são fracamente atraídos e os diamagnéticos são repelidos (susceptibilidade magnética negativa) (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982; LUZ et al., 2010).

A separação pode ser efetuada a seco ou a úmido e em materiais de granulometria variada. Como resultado, tem-se produtos enriquecidos de minerais mais ou menos susceptíveis ao campo magnético.

Equipamentos industriais podem ser divididos entre separadores de baixa intensidade (imãs, tambores, correias submersas), alta intensidade (correias cruzadas, discos, rolo induzido) e alto gradiente (rolos de terras raras, tambor supercondutor), indicados para tamanhos mínimos de grãos entre 20-100 μm a depender da condição de separação (a seco ou a úmido, capacidade do separador).

No contexto das terras raras, os minerais portadores de ETR podem ser primeiramente separados daqueles altamente magnéticos (ferromagnéticos) ou não magnéticos (diamagnéticos), presentes como ganga e, depois, em uma etapa mais seletiva de concentração, diferenciados entre si de acordo com suas propriedades paramagnéticas, por exemplo, a separação entre monazita e xenotima (JORDENS et al., 2013). Elementos entre Gd e Er apresentam os maiores valores de susceptibilidade magnética dentre os lantanídeos, justificando o fato de a xenotima (rica em ETRP) mostrar maior susceptibilidade magnética que a monazita.

Chan (1992) aplicou separações magnéticas de alta intensidade no minério supérgeo de monazita da Austrália, cominuído abaixo de 44 μm , variando intensidades magnéticas e temperaturas de calcinação prévia, sem obter produtos enriquecidos em OTR.

- Separação eletrostática

A concentração eletrostática é um procedimento relevante para a concentração de minerais de terras raras, particularmente daqueles de origem sedimentar, visto que são pouco condutores elétricos (raio iônico relativamente grande, o que diminui as forças eletrostáticas de atração).

A separação eletrostática se baseia na diferença de resposta dos minerais quando submetidos a um campo elétrico (eletrização por contato, indução ou bombardeamento iônico). Para que aconteça a separação dos minerais é necessário a existência de uma carga elétrica superficial das partículas ou polarização induzida, que lhes permitam sofrer a influência do campo. Existe, portanto, uma granulometria mínima necessária às partículas, que proporcione uma área de superfície suficiente para que haja a atração efetiva por parte do campo elétrico; esta granulometria está em torno de 100 μm .

Como resultado, tem-se produtos enriquecidos de minerais mais ou menos susceptíveis à formação de cargas eletrostáticas superficiais, respectivamente não condutores (isolantes) e condutores, sendo que características como composição química, densidade e forma dos minerais atuam no grau de susceptibilidade, assim como eventuais recobrimentos superficiais presentes nos minerais interferem na separação.

A separação é efetuada a seco e, considerando que as etapas iniciais de beneficiamento de minérios envolvem geralmente cominuição a úmido e etapas de lavagem, os custos de energia associados à secagem para posterior separação eletrostática podem eventualmente inviabilizar o procedimento a ser aplicado em escala industrial (JORDENS et al., 2013).

No contexto dos minerais de terras raras, a separação eletrostática é usada quando estão presentes minerais de ganga com características densitárias e magnéticas muito semelhantes às dos minerais portadores de ETR. A ilmenita, por exemplo, apresenta em muitas operações unitárias comportamento semelhante ao da xenotima ou da monazita, podendo ser diferenciada apenas por separação eletrostática, já que se trata de um mineral condutor, enquanto que a xenotima e a monazita não. A separação eletrostática é considerada, portanto, muito relevante em beneficiamento de areias pesadas (JORDENS et al., 2013).

Chan (1992) aplicou separações eletrostáticas no minério supérgeo de monazita da Austrália, sem obter produtos enriquecidos em OTR.

- Flotação

A concentração por flotação pode ser efetuada em uma faixa relativamente ampla de tamanho de partículas (mínimo em torno de 5-10 μm) e, portanto, trata-se de um procedimento comumente aplicado ao processamento de minérios de grande complexidade mineralógica, tal como a observada em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos.

As separações são feitas em meio aquoso e se baseiam na diferença de afinidade das partículas de se prenderem em bolhas de gás (geralmente ar). Quando esta afinidade existe, o conjunto partículas+bolhas torna-se menos denso que o fluido e é deslocado verticalmente para cima (flotação), permitindo assim a separação dos minerais (LUZ et al., 2010).

A propriedade que exprime a tendência de minerais de terem maior afinidade pela fase gasosa em relação à líquida é designada hidrofobicidade e depende das cargas de superfície presentes nos minerais (natureza química e força de ligação entre átomos e íons constituintes). Dependendo da composição mineralógica do material, algumas substâncias (reagentes) podem ser introduzidas ao sistema para adsorver à superfície de determinadas espécies e torná-las hidrofóbicas ou hidrófilicas (afinidade pela fase líquida), atuando como reagentes seletivos (coletores ou depressores) e viabilizando sua separação (LUZ et al., 2010).

No contexto das terras raras, os parâmetros de carga de superfície nos minerais (ponto de carga zero e ponto isoelétrico), essenciais de serem definidos para o entendimento das possibilidades de flotação, variam amplamente. Isso é devido à grande variabilidade química observada nos mesmos (diferentes ETR e impurezas na estrutura), de acordo com os diferentes processos de formação dos depósitos. As variações nas proporções de elementos químicos expostos a superfície dificultam a definição de procedimentos específicos para promover a concentração por flotação (CHELGANI et al., 2015).

Os coletores mais comumente utilizados para a flotação de minerais de terras raras, incluem as variações de hidroxamatos e ácidos graxos. Como depressores são tipicamente utilizados silicato de sódio, lignino-sulfonato, carbonato de sódio e oxalato de sódio.

Yu et al. (2014) apresentaram estudos de flotação em bastnaesita ultrafina ($<10\text{ }\mu\text{m}$) a partir da utilização de grupos de hidroxamatos como floculante seletivo, sendo obtidos resultados positivos se consideradas condições específicas de ensaio. Chan (1992) apresentou um procedimento para a flotação da monazita supergênica do minério de Mount Weld (Austrália), utilizando-se misturas de ácidos graxos como coletores e sulfito de sódio como depressor, obtendo recuperação e teor de OTR, de 60% e 50%, respectivamente. Já Chelgani et al. (2015) descrevem condições ideais de concentração de coletores, depressores e temperaturas para a flotação de monazita e xenotima.

Jordens et al. (2013) especificam, porém, que o processo de flotação desses minerais, especialmente no caso na monazita, ainda não é completamente dominado. Ressalta a falta de estudos com resultados reprodutíveis e a relevância crescente dessa área estudo, conforme novos e complexos depósitos com monazita são encontrados pelo mundo.

2.2.5 Processamento hidrometalúrgico

Na cadeia de produção dos elementos de terras raras, a etapa seguinte à concentração física é o processamento químico, considerado altamente custoso, devido ao elevado consumo de energia, volume de resíduos originados (gases e soluções ácidas), além de muitas vezes lidar com os elementos radioativos (tório e urânio) contidos nos minerais de terras raras.

Long et al. (2010) destacam que não existe um processo químico padronizado para a lixiviação e extração das terras raras, visto que a sequência de extração química dependerá das características mineralógicas do minério, devendo ser desenvolvidos procedimentos específicos e customizados para cada projeto.

Inicialmente, o processo envolve a lixiviação ou digestão das fases minerais presentes no concentrado do beneficiamento físico (geralmente cominuído abaixo de $100\text{ }\mu\text{m}$), através de um ataque ácido ou alcalino e sob temperatura controlada, promovendo a dissolução dos elementos químicos em solução (terras raras e outros óxidos). Em seguida, múltiplos estágios de adição de reagentes para a obtenção de trocas iônicas, precipitação fracionada e extração seletiva de elementos/compostos são efetuados, até se concentrar “unicamente” as terras raras (WALTERS; LUSTY, 2011). De acordo com o tema e objetivos deste trabalho, neste capítulo são

ênfatisados apenas os aspectos relacionados à digestão das fases minerais no processamento químico.

Na digestão ácida do concentrado de monazita, por exemplo, preferencialmente utilizando-se de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), condições específicas de temperatura (geralmente elevada para concentrados de alto teor de OTR) e de tempo de reação, os minerais de terras raras são convertidos em sulfatos (insolúveis) e, posteriormente, filtrados e lavados em água para a obtenção do sulfato de terras raras em solução (juntamente com o tório e o urânio) e de um resíduo insolúvel a ser também separado por filtração. Gupta e Krishnamurthy (2005) e Habashi (2013) propõem as seguintes condições ideais para a digestão ácida da monazita (Equação 1 - abertura ácida da monazita): ácido sulfúrico a 93-98% de concentração, relação ácido-minério de 2:1, temperatura de 200-220°C e duração de reação entre 2-4 horas.

Os sulfatos em solução são então precipitados como sulfatos duplos e convertidos em hidróxidos de terras raras (insolúveis) após uma lixiviação alcalina com hidróxido de sódio (NaOH). Por fim, os hidróxidos de terras raras são solubilizados por uma nova lixiviação ácida, em ácido clorídrico (HCl), convertendo-os em cloretos de terras raras (NASCIMENTO et al., 2005; PEIXOTO; SANTOS, 2012) e que seguirão posteriormente para as etapas de purificação dos ETR.

Na digestão alcalina do concentrado de monazita, preferencialmente realizada com hidróxido de sódio (NaOH), os elementos de terras raras, além do tório e o urânio, são diretamente convertidos em hidróxidos (insolúveis), sendo ainda obtidos como subprodutos da reação os denominados fosfatos trisódicos (solúveis em água), de grande interesse comercial. Habashi (2013) apresenta as seguintes condições para a digestão alcalina da monazita (Equação 2 - abertura alcalina da monazita): NaOH a 40-50% de concentração, relação álcali-minério de 2:1, temperatura de 160°C e duração de 3 horas. Gupta e Krishnamurthy (2005), partindo de um concentrado de monazita finamente cominuída, sugerem o ataque com solução de NaOH a 60-70% de concentração, temperatura à 140-150°C e duração de 3-4 horas.

Os procedimentos de digestão química do concentrado de bastnaesita podem também ser efetuados em meio ácido ou alcalino. Na digestão ácida, inicialmente é efetuada uma etapa de calcinação para que o CO₂ seja liberado, evitando a emissão de gases poluentes portadores de fluoretos quando da utilização de ácido sulfúrico (ZHANG; EDWARDS, 2013; PEELMAN et al., 2014).

A digestão sulfúrica (H₂SO₄) da bastnaesita de Bayan Obo (China) é feita com ácido concentrado a 98% e temperatura elevada, de 500°C. Após removido o CO₂, a matriz decomposta da bastnaesita (fluoretos de terras raras) é convertida em sulfatos de terras raras (insolúveis) (Equação 3 - abertura ácida da bastnaesita), sendo as etapas seguintes de concentração semelhantes à da rota da monazita.

Na digestão clorídrica (HCl) da bastnaesita de Mountain Pass (EUA), o concentrado de bastnaesita é calcinado a 620°C para a remoção do CO₂ e também para a conversão do cério ao estado tetravalente (porção convertida a CeO₂ é um produto final), já que o ataque ácido com HCl a 30% converte apenas os elementos trivalentes para a solução (HABASHI, 1997, 2013; GUPTA; KRISHNAMURTHY, 2005). Em temperaturas baixas, o ácido diluído dissolveria apenas os carbonatos menos estáveis que a bastnaesita, como a calcita, aragonita e estroncionita. Após removido o CO₂, a matriz decomposta da bastnaesita (fluoretos de terras raras) é solubilizada com ácido clorídrico e convertida diretamente em cloretos de terras raras (Equação 4 - abertura ácida da bastnaesita).

Uma rota alcalina para a digestão do concentrado de bastnaesita de Mountain Pass (EUA) utiliza de hidróxido de sódio (NaOH) e temperatura de 96°C para converter a matriz decomposta da bastnaesita (fluoretos de terras raras) em hidróxidos de terras raras (insolúveis) (Equação 5 - abertura alcalina da bastnaesita) e que são, posteriormente, solubilizados por uma nova lixiviação ácida, em ácido clorídrico (HCl), convertendo-os em cloretos de terras raras.

A Figura 5 ilustra, esquematicamente, as alternativas de processamento químico aplicadas aos principais tipos de concentrados de minerais de terras raras comercializados atualmente: bastnaesita, monazita e xenotima, considerando

produtos de alimentação com cerca de 60% de OTR (concentrado do beneficiamento físico) e atingindo produtos finais de aproximadamente 90% de OTR em solução, antes da etapa de purificação.

Figura 5 – Procedimentos hidrometalúrgicos de extração de terras raras em produtos concentrados (esquemático).

A segunda etapa do processamento químico é a purificação ou individualização das terras raras, realizada a partir da oxidação e redução seletiva dos elementos (por exemplo, o cério e európio podem apresentar outros estados de oxidação além do trivalente) e, preferencialmente, por métodos de trocas iônicas e extrações com solventes. É considerada uma etapa bastante complexa, devido à semelhança entre as propriedades químicas desses elementos (BLAKELY et al., 2011; WALTERS; LUSTY, 2011; SOUSA FILHO; SERRA, 2014). Baseia-se principalmente nas variações de basicidade resultante do decrescente tamanho do raio iônico, desde o lantânio ao lutécio, e utiliza líquidos imiscíveis para as separações, tipicamente água e solventes orgânicos, sob cinéticas controladas de reação (GOLEV et al., 2014; XIE et al., 2014). A remoção do tório/urânio é

geralmente realizada posteriormente à obtenção dos hidróxidos, através de uma extração por solventes.

Os produtos precipitados da purificação podem ser comercializados na forma de cloretos e, principalmente, como óxidos puros ou reduzidos a metais, com pureza acima de 99,99%. O grau de pureza agrega valor ao produto final e define as possíveis aplicações industriais ao elemento. Elementos de terras raras pesados (ETRP) são tipicamente mais caros que os leves em razão da relativa abundância dos últimos, assim como os produtos na forma de metais são mais caros que em óxidos, em função dos diferentes custos do processamento. Atualmente, os preços dos ETR estão oscilando bastante devido a questões comerciais e à demanda, sendo que o cério é o que apresenta menor valor (óxido: U\$ 2,0/kg; metal: U\$ 7,0/kg) e o térbio, o maior valor (óxido: U\$ 400/kg; metal: U\$ 550/kg) dentre os lantanídeos, assim como o escândio (óxido: U\$ 4.200/kg; metal: U\$ 15.000/kg) (METAL-PRICES, 2017).

2.2.5.1 Digestão seletiva em minérios de baixo teor

Neste item são abordados os procedimentos de lixiviação efetuados em minérios de baixo teor, como o caso das argilas iônicas, onde são envolvidos procedimentos bem particulares de solubilização. Ademais, são levantados alguns estudos de processamento químico das terras raras presentes em minérios supérgeos de baixo teor e sem viabilidade de obtenção de pré-concentrados físicos, isso quando a mineralogia do minério é bastante complexa, com minerais de terras raras apresentando tamanhos de grãos reduzidos e intimamente associados com a ganga, como ocorre em alguns depósitos carbonatíticos do Brasil.

Os íons de terras raras adsorvidos à superfície das denominadas argilas iônicas da China são lixiviados considerando preferencialmente procedimentos de trocas iônicas, utilizando-se soluções de cloreto de sódio ou sulfato de amônio como reagentes (NaCl e $(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)$, respectivamente) (Equação 6 - troca de íons adsorvidos nas argilas utilizando o sulfato de amônio) (ZHANG; EDWARDS, 2013).

A lixiviação desses materiais é realizada *in situ*, onde o reagente é inserido em uma malha de furos de sondagem e promove a solubilização das terras raras ao percolar o depósito. A solução enriquecida é canalizada para tanques cimentados,

onde um carbonato de amônio é usado como agente precipitante. Posteriormente, um ácido oxálico é adicionado para transformar as terras raras em oxalatos (insolúveis), que são filtrados e calcinados para a conversão em óxidos. Como resultado tem-se um concentrado com um teor superior a 90% de OTR.

Blakely et al. (2011) discutem as questões ambientais a respeito da exploração dessas argilas na China, que envolve a poluição da água potável na região de extração, destruição de terras agrícolas e envenenamento de moradores locais. Atualmente, os procedimentos *in situ* são rotas secundárias de processamento, sendo o minério preferencialmente lixiviado em pilhas de 1 a 5 metros de altura, sobre uma membrana coletora de soluções percolantes.

Em relação ao projeto previsto para exploração das argilas iônicas do minério saprolítico de Minaçú (GO) pela Mineração Serra Verde no Brasil, prevê-se que a lixiviação seja feita em pilhas 3 metros de altura e com o uso de cloreto de sódio (NaCl) acidificado com ácido sulfúrico. A solução lixiviada, contendo os elementos terras raras e impurezas, será filtrada e encaminhada para as etapas seguintes de precipitação dos ETR. O resíduo na pilha será lavado (pH controlado) e devolvido à mina em caminhões para a realocação na cava (SERRAVERDE, 2017).

Muitos outros países estão desenvolvendo estudos que buscam avaliar o potencial de extração de terras raras dessas argilas iônicas. Como exemplo, Jun et al. (2010) e Moldoveanu e Papangelakis (2013) investigaram a influência de parâmetros como concentração de reagentes, variações de temperatura, pH e velocidade de agitação na capacidade de extração desses íons.

Com relação a digestão seletiva de minérios de baixo teor em depósitos alcalino-carbonatíticos do Brasil, alguns estudos foram desenvolvidos especificamente no minério carbonatítico de Catalão (Goiás), enriquecido em ETR na forma de monazita.

Rocha e Trindade (1993) buscaram definir condições ideais para a lixiviação alcalina e seletiva da monazita em amostra de matriz silicosa, com teor de OTR de 11,5%. A lixiviação foi efetuada em meio alcalino, com hidróxido de sódio (NaOH), considerando temperaturas entre 150 e 220°C, tempo de 1 a 3h e razão álcali-minério de 1,0 a 2,2. Solubilizações da ordem de 84% dos OTR foram alcançadas, mas os resultados não foram satisfatórios devido à baixa seletividade, já que a sílica também foi solubilizada. Barbosa et al. (1996) deram continuidade a este trabalho e

conseguiram uma lixiviação consideravelmente seletiva para a sílica, solubilizada em 96%, sendo que apenas 1% do conteúdo de P_2O_5 foi também lixiviado (basicamente relativo à monazita); neste ensaio foram consideradas temperaturas de 200°C, tempo de 1h e razão álcali-minério de 1:1. Desta reação é obtido um silicato de sódio (insolúvel) como um subproduto de interesse nesta linha de pesquisa.

Morais et al. (2001) apresentaram a definição de condições ideais para a lixiviação ácida e seletiva da monazita em amostra de matriz ferrosa do mesmo minério, com teor de OTR de 9%. Inicialmente tentou-se a dissolução seletiva de impurezas de ferro com ácido clorídrico (HCl), mas a monazita mostrou um comportamento atípico e tendências de solubilização neste meio. Seguiu-se então diretamente para a digestão sulfúrica da monazita, sendo alcançadas solubilizações da ordem de 92% dos OTR e pouca solubilização de impurezas (solubilização do ferro inferior a 13%). As condições de lixiviação foram: concentração de ácido de 98%, temperatura de 47°C, tempo de 1h e granulometria 60% inferior a 74 μm . Neste trabalho são também apresentadas as etapas posteriores de precipitação de terras raras e o fracionamento de elementos de terras raras, sendo que os resultados foram promissores.

Tassinari (2001) também desenvolveu ensaios de lixiviação sulfúrica da monazita em três tipos do minério de Catalão: em matriz silicosa (teor de OTR de 7,7%), em matriz ferrosa (OTR de 7,5%) e no minério apatítico (OTR de 8,1%). A lixiviação foi efetuada em ácido concentrado em 85%, em temperatura ambiente e durante 3h. O minério silicoso apresentou solubilização de ~50% dos OTR, enquanto no material ferroso e apatítico este valor chegou a ~70% e ~80%, respectivamente. O trabalho não aborda a seletividade da lixiviação da monazita em relação à ganga.

Um estudo inovador foi recentemente proposto por Bisaka et al. (2016) considerando depósitos contendo terras raras no sudeste da África, com teor de OTR da ordem de 2,5%, e preferencialmente enriquecido em minerais de ferro. Elevadas temperaturas visam a atingir a fusão dos minerais de ferro à 1.800°C, convertendo-os para a forma de ligas metálicas (subprodutos para comercialização) e promovendo, portanto, a remoção de impurezas previamente às etapas de lixiviação das terras raras.

2.2.5.2 Biolixiviação

A biolixiviação é um método que emprega biomateriais (algas, fungos, bactérias, resinas, entre outros) na recuperação de ETR em soluções, atuando como adsorventes desses elementos. Sua aplicação vem sendo amplamente divulgada pela comunidade científica como alternativa aos métodos tradicionais de processamento químico, oferecendo potenciais vantagens em termos de custos operacionais, economia de insumos e de energia, além de não gerarem resíduos nocivos ao meio ambiente.

Poucos estudos de biolixiviação de elementos de terras raras são encontrados na literatura e nenhum deles citam possibilidades comerciais, mas abordam aplicações para diferentes tipos de materiais, como a partir de produtos concentrados de monazita, de argilas íônicas e minérios de baixo teor de ETR (KIM et al., 2011; HASSANIEN et al., 2014; BRISSON et al., 2016).

Das e Das (2013) descreveram os tipos de biomateriais adequados para a recuperação dos diferentes ETR em solução e em condições variadas de pH, temperatura e tempo, assim como os procedimentos de recuperação posterior dos ETR aderidos à biomassa (dessorção).

2.2.5.3 Reciclagem

No momento em que existe um aumento da demanda das terras raras na indústria de alta tecnologia e potencial risco de suprimento (produção centralizada na China), a indústria mineral de outros países são estimuladas a buscar novas fontes de fornecimento, prospectar novos depósitos e também identificar possíveis alternativas de reciclagem desses elementos.

Binnemans et al. (2015) apresentaram um potencial de aproveitamento de terras raras em escórias metalúrgicas, na lama vermelha do Processo Bayer (resíduo da indústria do alumínio), no fosfogesso (subproduto da produção de ácido fosfórico a partir de rochas fosfáticas) e em outros tipos de rejeito de mineração (minas de titânio, urânio e rejeitos da própria extração de terras raras). Os teores de OTR nesses materiais podem chegar a 1% (próximos a teores encontrados em minérios de baixo teor) e os volumes são enormes. Sabe-se da complexidade

tecnológica para este aproveitamento, mas rotas de concentração/lixiviação integradas às plantas de beneficiamento já existentes podem se mostrar viáveis.

Binnemans et al. (2013) apresentaram também as etapas para recuperação de terras raras em bens de consumo em fim de vida, como ímãs permanentes, baterias e lâmpadas, e estimaram o potencial de reciclagem para os próximos anos.

Uma patente para a reciclagem do material fosforescente em lâmpadas (portadores de terra raras) foi também desenvolvida pelo Laboratório de Terras Raras do Departamento de Química da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto (FFCLRP) da USP, a partir de resinas (processo sustentável), e alcançando recuperações da ordem de 90% dos ETR (DIAS, 2014).

2.3 Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos no Brasil

2.3.1 Resultados de estudos anteriores

Estudos de caracterização tecnológica desenvolvidos desde a década de 90 para os depósitos de terras raras em complexos alcalino brasileiros (particularmente Poços de Caldas - MG, Catalão - GO e Araxá - MG) abordam frequentemente a necessidade do desenvolvimento de procedimentos não usuais de concentração, uma vez que todas as tentativas até então realizadas, tais como separações minerais por métodos densitários, magnéticos ou mesmo por flotação, mostraram-se infrutíferas, permanecendo, portanto, um desafio tecnológico para o aproveitamento desses materiais (VIERA; LINS, 1997).

As principais características mineralógicas levantadas nesses estudos estão sumariadas a seguir (WEDOW JUNIOR, 1967; MARIANO, 1989; LAPIDO-LOUREIRO, 1994; MORTEANI; PREINFALK, 1996; VIERA; LINS, 1997; NEUMANN, 1999; TASSINARI et al., 2001; MORAIS et al., 2001; NEUMANN; VALARELLI, 2001; TASSINARI, 2001; TOLEDO et al., 2004; KAHN et al., 2012; ANTONIASSI et al., 2015; NEUMANN; MEDEIROS, 2015; TESTA et al., 2017).

- **elementos terras raras:** estão presentes preferencialmente os elementos terras raras leves (ETRL) com tendência a concentrar-se naturalmente em granulação fina e preferencialmente abaixo de 0,020 mm.

- **minerais típicos de terras raras:** a monazita é o principal mineral portador de ETR em Araxá e Catalão, enquanto a bastnaesita é o principal portador de ETR em Poços de Caldas, seguido pela cerianita.
- **composição química dos minerais de terras raras:** a monazita pode apresentar variação composicional, mas é preferencialmente constituída de ETR leves, além de estarem geralmente associados conteúdos reduzidos de Th, U, Ca e Sr. A bastnaesita e a cerianita apresentam pequena variabilidade composicional, mas também mostram tório associado.
- **forma de ocorrência:** os minerais de terras raras se mostram essencialmente intercrescidos, na forma de agregados de cristais submicrométricos, podendo apresentar aspecto maciço, coloforme, esferoides, concêntricos, aciculares.
- **associações e liberação:** a liberação dos minerais de terras raras acontece em frações granulométricas muito finas, inviabilizando, dessa forma, os procedimentos de moagem (alto consumo de energia e de meio moedor) e, conseqüentemente, os métodos de concentração física. Geralmente ocorrem em complexas associações com a ganga ou como diminutas inclusões.
- **distribuição das terras raras entre os minerais:** os minerais típicos de terras raras respondem pela maior parte das terras raras totais, mas uma parte encontra-se associada aos alumino-fosfatos, óxi-hidróxidos de ferro, minerais de Nb e Ti, apatita, baddeleíta, zirquelita-zirconolita e zircão.
- **processos físicos de concentração:** combinações de ensaios de atrição, deslamagem, moagem (diferentes malhas, com ou sem choque térmico prévio), separações densitárias e magnéticas (a úmido e a seco), e flotação (testados diversos coletores, concentração de depressor e valores de pH) possibilitam gerar produtos relativamente mais enriquecidos (teores de até 20% de OTR em Catalão), porém geralmente com baixas recuperações.
- **processos químicos de extração:** estudos exploratórios de dissolução química alcalina e ácida foram desenvolvidos apenas para o minério de Catalão, sendo que os resultados se mostram promissores.

Os resultados obtidos até o momento sugerem que os procedimentos de extração hidrometalúrgica com dissolução seletiva dos ETR parecem ser um caminho de grande potencial para o equacionamento do aproveitamento tecnológico deste importante recurso em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos. A empresa CBMM já anunciou que possui uma rota de processamento físico e químico para a concentração de terras raras presentes no rejeito da planta de beneficiamento mineral do pirocloro em Araxá (VILLELA, 2016), mas nenhuma rota de processamento foi divulgada até o momento.

2.3.2 Procedimentos de análises químicas e mineralógicas

A composição química de minérios de terras raras é geralmente determinada pelos métodos de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) e/ou por espectrometria de emissão por plasma induzido (ICP-OES/MS).

A técnica de FRX baseia-se na irradiação e excitação de uma dada substância (sólidos, líquidos e gases) por meio de um feixe de raios X, trazendo como resultado a produção de uma radiação secundária (fluorescente), característica dos elementos químicos presentes na amostra. Conhecendo-se os ângulos de reflexão e as intensidades dessa radiação, é possível, a partir de cristais analisadores e detectores específicos, a determinação qualitativa e quantitativa dos elementos presentes (JENKINS, 1999).

A técnica de FRX permite a análise de praticamente todos os elementos da tabela periódica, desde o flúor até o urânio (número atômico de 9 a 92). Utilizando-se um detector de dispersão de energia (EDS - Energy Dispersive Spectrometer) todo o espectro elementar é captado simultaneamente, enquanto que a partir de um detector de dispersão de comprimento de onda (WDS - Wavelength Dispersive Spectrometer) são captadas as linhas características individualizadas pelo(s) cristal(is) analisador(es). Ambos os procedimentos são adequados para análises qualitativas e quantitativas de elementos, diferindo em resolução e sensibilidade: o primeiro com capacidade para determinações de teores de 0,1 a 100%, e o segundo para teores da ordem de dezenas a centenas de partes por milhão - ppm (>0,01%) (SANTAGOSTINO, 1996; RATTI, 1999). A técnica de FRX apresenta limitações para determinações de terras raras (particularmente por EDS), tendo em vista os baixos teores geralmente encontrados e interferências interelementares (WDS apresenta limites de detecção em amostras de minério da ordem de dezenas de ppm).

As técnicas por ICP (OES ou MS) são as mais indicadas e difundidas nas análises de terras raras podendo quantificar elementos em concentrações da ordem de partes por bilhão - ppb e presentes em qualquer tipo de matriz, desde que presentes em meio aquoso (ácido, básico ou salino) (RATTI, 1999; NOLTE, 2003).

Na técnica de ICP-OES, a amostra, após a adequada solubilização, passa por um sistema de nebulização, antes de ser direcionada (na forma gasosa) ao local onde estará exposta à fonte de excitação por plasma de argônio. No plasma, a amostra sofre uma sequência de processos físico-químicos (dessolvatação, vaporização, atomização e ionização) em função das elevadas temperaturas submetidas ($>5.000^{\circ}\text{C}$) e, na forma excitada, emite radiações características dos elementos químicos contidos. Detectores fotomultiplicadores efetuam, através de sistemas ópticos, a correta separação/distinção das radiações características emitidas (ângulos de reflexão e intensidades relativas), permitindo a determinação dos elementos químicos presentes na amostra, bem como suas concentrações.

Comparativamente, ambas as técnicas (FRX e ICP-OES) baseiam-se na excitação do átomo (elemento) a ser dosado e na quantificação da resposta obtida. A ICP-OES é considerada mais sensível para a detecção de elementos de baixas concentrações, porém mostra-se morosa, custosa e requer prática do operador.

Com relação à determinação da composição mineralógica de minérios de terras raras e de características de associações minerais, muitos avanços foram alcançados nos últimos anos.

A técnica de difratometria de raios X permite a identificação e quantificação de fases cristalinas, porém sua aplicação na detecção de fases que ocorrem em pequenas concentrações é restrita (limite entre 1-3%). Dessa forma, as técnicas de microscopia são fundamentais para o estudo de depósitos de terras raras, tanto para a detecção e quantificação das fases presentes, como para a avaliação de texturas, formas de associações e tamanho de grãos (SANTAGOSTINO, 1996).

Por muitos anos, a mineralogia quantitativa de minérios de terras raras foi determinada essencialmente através de contagem de grãos por meio de microscopia óptica, objeto da aplicação da estereologia em mineralogia, apoiada em avaliações visuais e tradicionalmente conhecida pela sua morosidade, imprecisão e baixa reprodutibilidade. Com o advento de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistemas de microanálise de espectrometria de raios X por dispersão de energia

(EDS) acoplados a sistemas de análises de imagens quantitativa, a determinação de informações quantitativas como composição mineralógica, liberação e distribuições granulométricas foram drasticamente facilitadas, paralelamente a uma notável redução do tempo necessário para a obtenção de resultados, bem como sensível aprimoramento na qualidade e confiabilidade dos mesmos (SANTAGOSTINO, 1996; NEUMANN; SCHNEIDER, 2001).

Na década de 1990, surgiram sistemas de análise de imagens por feixe de elétrons estatisticamente robustos, que utilizam-se da conjugação de técnicas de MEV/EDS e análise de imagens em sistemas automatizados. Esses sistemas têm por premissa a diferenciação dos minerais tanto com base no contraste de número atômico (imagens de elétrons retroespalhados) como pela sua composição química (espectros de raios X característicos por EDS). Como resultados podem ser obtidos as proporções mineralógicas, associações das fases presentes, liberação mineral, distribuição dos elementos de terras raras dentre os minerais portadores, forma e tamanho de grãos, recuperação potencial, dentre outras informações, gerando subsídios e parâmetros relevantes ao desenvolvimento de processos de beneficiamento mineral (FANDRICH et al., 2007; KAHN et al., 2012).

Atualmente, existem vários sistemas de análise de imagens automatizada por feixe de elétrons acoplados a MEV, tais como QEMSCAN e MLA (FEI Company) além de outros introduzidos mais recentemente no mercado: TIMA (TESCAN), Mineralogic Mining (Zeiss), INCAMineral (Oxford Instruments) e AMICS (Bruker). Até o momento, são poucos os estudos de mineralizações de elementos de terras raras publicados que empregam estes avançados recursos de caracterização (KAHN et al., 2012; GRAMMATIKOPOULOS et al., 2013; SMYTHE et al., 2013; ANTONIASSI et al., 2015; NEUMANN; MEDEIROS, 2015; TESTA et al., 2017).

Esses estudos abordam a importância deste tipo de ferramenta na caracterização de minérios, provendo dados que auxiliam o desenvolvimento e predição de parâmetros geometalúrgicos para o conhecimento da variabilidade geológica e respectivo comportamento no processamento. Os trabalhos fazem uso das técnicas de análises químicas FRX e ICP para a conciliação e a validação dos resultados mineralógicos, e apresentam detalhadamente os procedimentos de preparação de amostras e rotinas de trabalho aplicadas.

2.3.3 Projetos de pesquisa em andamento

Os minerais de terras raras estão classificados como "Minerais estratégicos" no PNM - Plano Nacional de Mineração 2030 do Ministério de Minas e Energia (MME, 2010). Tratam-se de minerais cuja demanda é crescente e que deverá se expandir ainda mais nas próximas décadas por sua utilização em produtos de alta tecnologia.

No PNM 2030, a estratégia de ações almejadas em relação às terras raras vai muito além da descoberta e produção destes bens minerais no país. É destacada a necessidade de programas específicos para o desenvolvimento de processos e de produtos em cadeias produtivas de alto valor agregado, em um ambiente de competitividade internacional.

Em 2013, o governo brasileiro lançou um edital de R\$ 9 milhões em parceria com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para financiar projetos de pesquisa sobre terras raras. O objetivo é recompor toda a cadeia de produção, desde a extração dos minerais até a obtenção de óxidos e, a partir destes óxidos, a produção de ligas (Chamada MCTI/CNPq/CT-Mineral Nº 76/2013). O projeto visa a contribuir para a retomada das pesquisas em terras raras no país e a redução da dependência externa de importação desses elementos e seus compostos, com a difusão de conhecimento tecnológico sobre processamento e uso de elementos de terras raras, aperfeiçoamento de mão de obra qualificada, contribuindo para consolidação de cadeias estratégicas no setor.

Neste contexto, podem ser citados os seguintes centros de pesquisa com destacada atuação:

- CPRM - Serviços Geológicos do Brasil. Recentemente publicou um levantamento bastante detalhando das áreas potenciais para a mineração de terras raras (TAKEHARA et al., 2015).
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI). Recentemente publicou um levantamento bastante detalhado sobre usos e aplicações das terras raras no Brasil (CGEE, 2012).
- CERTI - Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras. Responsável pelo projeto da CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento de Econômico de Minas Gerais, para a implantação de um laboratório-fábrica de

ímãs de terras raras, que será implantado Minas Gerais. Os trabalhos estão sendo desenvolvidos em parceria com o CETEM - Centro de Tecnologia Mineral (RJ), com o IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (SP) e com a UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina (SC).

- SBTR - Seminário Brasileiro de Terras Raras. Evento criado em 2011 e organizado pelo CETEM em parceria com a SETEC - Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação e SGM - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. O objetivo do seminário é promover o encontro dos principais atores do setor governamental, do Congresso Nacional, das empresas de mineração, universidades e institutos de pesquisa, que participam do esforço para implantar uma cadeia produtiva de terras raras no Brasil.
- CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. Possui um dos projetos mais adiantados de estudos para a produção de terras raras e anunciou recentemente que já detém um processo de obtenção de sulfatos duplos, hidróxidos e óxidos de terras raras (VILLELA, 2016). A empresa tem um convênio com o IPT para desenvolvimento de tecnologia de obtenção de didímio metálico (praseodímio + neodímio) (IPT, 2016).
- Mineração Serra Verde, parte do grupo Mining Ventures Brasil. Empresa responsável pelo projeto de terras raras associadas a argilas iônicas, em fase avançada de desenvolvimento, do depósito localizado no município de Minaçu (GO). O início da exploração está previsto ainda para 2017. A empresa pretende abastecer o mercado mundial e doméstico com terras raras críticas e pesadas, incluindo concentrados com altos teores de metais magnéticos como Nd, Pr, Dy e Tb (SERRAVERDE, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostras estudadas

O estudo foi desenvolvido considerando-se 10 amostras portadoras de elementos de terras raras, referentes a 4 distintos depósitos alcalinos e alcalino-carbonatíticos brasileiros, localizados nos Estados de Minas Gerais e Goiás. A divulgação da exata proveniência de cada uma das amostras não foi autorizada pelas respectivas empresas detentoras dos direitos minerários, porém ocorrem em estreita correlação com os depósitos de Araxá, Salitre, Poços de Caldas e Catalão. Sua seleção foi efetuada priorizando-se a variabilidade mineralógica encontrada nestes complexos.

As amostras foram identificadas conforme apresentado na Tabela 3, sendo o aspecto macroscópico das mesmas apresentado na Figura 6. Correspondem, de maneira geral, a materiais geológicos relacionados a manto de intemperismo, relativamente superficiais (supérgenos), e com aspecto tipicamente terroso. Mostram coloração avermelhada (exceto a amostra C1, mais clara que as demais) e granulometria variada, com fragmentos maiores de até 10 cm (maior dimensão), muitas vezes silicificados, e com grande proporção de finos naturais.

Tabela 3 – Descrição das amostras estudadas.

Depósito brasileiro	Identificação das amostras estudadas	Nº total de amostras
A	A1, A2, A3, A4, A5	5
B	B1, B2	2
C	C1	1
D	D1, D2	2

Figura 6 – Aspecto geral das amostras tal qual (bulk); detalhe para a presença de grande proporção de finos e de fragmentos maiores, centimétricos, por vezes, silicificados.

3.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental adotado na caracterização tecnológica das amostras contendo terras raras, ilustrado sumariamente na Figura 7, foi subdividido em três etapas principais:

- estudo da composição química, mineralógica e das associações minerais;
- ensaios de separabilidade física (separações minerais);
- ensaios de lixiviação seletiva dos minerais de ETR.

Todos os ensaios e análises foram efetuados no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMI - EPUSP), que dispõe de adequada infraestrutura para tal. A sequência de estudos desenvolvidos para cada amostra foi consequência do seu comportamento ao longo dessas atividades e, portanto, nem todas as amostras foram processadas da mesma forma.

Figura 7 – Procedimento experimental de estudo (esquemático).

3.2.1 Caracterização química e mineralógica de detalhe

As atividades desenvolvidas para a caracterização química, mineralógica e das formas de associação entre os minerais englobaram:

- peneiramento em 6,35 mm (1/4") ou em 1,19 mm (14# Tyler) unicamente para as amostras B1, B2 e D2 (relativamente mais grossas que as demais), e cominuição do material retido nesta granulometria até 100% passante na mesma malha, em britador de mandíbulas e moinho de rolos;
- homogeneização em pilha alongada para a retirada de alíquotas representativas para os estudos;
- deslamagem em hidrociclones de 25 mm de diâmetro (escala de laboratório) com dois estágios e cortes estimados em 0,008 mm (Underflow 1) e 0,005 mm (Underflow 2), seguida de análise granulométrica por peneiramento

mecanizado a úmido do material acima de 0,008 mm (Underflow no primeiro ciclone), com abertura máxima em 1,19 mm (14# Tyler) e decrescendo até 0,020 mm (635# Tyler);

- determinação da composição química das amostras tal qual (bulk) e dos produtos granulométricos gerados;
- análise textural por meio de observações ao microscópio eletrônico de varredura para avaliação do tamanho dos grãos dos minerais em algumas das frações geradas, ou na amostra bulk, e definição da malha para eventual cominuição: 0,30 mm (48# Tyler) ou 0,125 mm (115# Tyler);
- cominuição das amostras A1, A2, B1, B2, C1, D1 e D2 até 100% passante na malha definida, em moinho de rolos;
- nova classificação granulométrica para o material cominuído (deslamagem e peneiramento), seguida de análises químicas por fração;
- análises mineralógicas detalhadas para a determinação da composição mineralógica por fração granulométrica e das características de associação entre os minerais presentes por meio da conjugação de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectrômetro por dispersão de energia (EDS) e de busca automatizada utilizando o software Mineral Liberation Analyser (MLA).

O conteúdo de elementos de terras raras nas amostras bulk foi determinado por espectrometria de emissão atômica (ICP-OES), em espectrômetro Horiba Ultima Expert e considerando o método de digestão de quatro ácidos. A composição química global das amostras bulk e dos produtos granulométricos foi obtida por fluorescência de raios X (FRX), em pastilhas fundidas, com determinações quantitativas sistemáticas dos REO (La_2O_3 , CeO_2 , Pr_6O_{11} , Nd_2O_3), SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MnO , MgO , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , BaO , SrO , SO_3 , ZrO_2 , ThO_2 , U_3O_8 e Nb_2O_5 , em espectrômetros modelo Axios (marca PANalytical) ou S8 Tiger (marca Bruker). A determinação da perda ao fogo (PF) foi realizada por calcinação em mufla a 1.050°C e durante 1 hora.

A análise mineralógica por difração de raios X (DRX) foi efetuada pelo método do pó, em difratômetro D8 Endeavor (marca Bruker) operando com radiação de CuK_α e detector Lynxeye XE sensível à posição. A identificação das fases cristalinas foi realizada por comparação dos difratogramas com o banco de dados PDF2 do

ICDD (International Centre for Diffraction Data) usando o software Diffrac.Eva e a quantificação, pelo método de Rietveld, considerou o software Topas e estruturas cristalinas .str.

A avaliação qualitativa e semiquantitativa dos elementos químicos presentes nos diversos minerais constituintes das amostras foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando-se microscópio modelo Stereoscan 440 (marca Leo), com espectrômetro de raios X por dispersão de energia (EDS) INCA (marca Oxford), com detector de Si.

O estudo mineralógico detalhado das formas de ocorrência e associação dos minerais de interesse foi efetuado de forma automatizada, em seções polidas, utilizando o software Mineral Liberation Analyser (MLA; marca FEI) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura Quanta 600 FEG (marca FEI) e sistema de microanálise por EDS Esprit (marca Bruker). As análises mineralógicas e de associações minerais consideraram tanto o contraste de número atômico como a composição química de cada fase (imagens de elétrons retroespalhados e espectros de raios X característico por EDS; modo XBSE), além de análise modal para o Overflow do ciclone (espectros de raios X característico por EDS; modo XMOD).

As imagens digitais obtidas nas análises foram processadas para a obtenção das seguintes informações: composição química mineral, mineralogia modal, partição de elementos químicos nos minerais portadores, além das associações e liberação das fases de interesse, da distribuição de tamanho de grãos e da estimativa de recuperação de OTR, considerando o material acima de 0,008 mm (Underflow no primeiro ciclone).

Para a caracterização química e variabilidade morfológica das fases portadoras de ETR foi utilizado também o microscópio Quanta 600 FEG para a execução de mapeamentos dos elementos químicos principais.

Para as amostras não cominuídas (A3, A4 e A5), o estudo de mineralogia de detalhe (MLA) não foi realizado no material acima de 1,19 mm, devido à baixa representatividade estatística para leitura de partículas grossas. A avaliação mineralógica foi baseada em análise por DRX (qualitativa).

3.2.2 Separabilidade física (separações minerais)

Os ensaios, em escala de bancada, realizados nas amostras bulk para a avaliação da separabilidade física mineral englobaram:

- separações minerais sequenciais por fração granulométrica gerada no item 3.2.1 (frações acima de 0,020 mm ou 0,037 mm) utilizando os líquidos densos tetrabrometano ($d=2,95 \text{ g/cm}^3$) e/ou dióxido de metileno ($d=3,30 \text{ g/cm}^3$);
- separações magnéticas a úmido em Tubo Davis (1,0 ou 1,5A, respectivamente 13,2 e 18,4 kGauss), previamente à separação em líquidos densos, e/ou a seco em separador Frantz de barreiras (0,0, 0,10, 0,15, 0,20 e/ou 0,30A, respectivamente 0,2, 1,3, 2,6, 3,2 e 4,5 kGauss), posteriormente à separação em líquidos densos e especificamente nos produtos afundados;
- separações magnéticas a úmido em WHIMS (10A, 10 kGauss) efetuada unicamente para a fração abaixo de 0,020 mm da amostra D2, com e sem calcinação prévia (a 450°C e durante 2 hora);
- análises químicas por FRX dos produtos obtidos e, eventualmente, mineralógicas por DRX naqueles onde ocorre maior concentração de minerais de terras raras;
- considerando a natural tendência dos minerais de terras raras de se concentrarem em frações finas, etapas de atrição para a avaliação da possibilidade de desagregação seletiva e enriquecimento dos OTR junto aos finos foram também efetuadas (unicamente para as amostras A1, A5, B1, B2, C1 e D1; material não cominuído):
 - atrição do material acima de 0,008 mm (deslamado) em célula Denver D12 de 1,0L, considerando polpa com 50% de sólidos, duração de 10 minutos e rotação de 1.200 rpm.
 - segunda etapa de deslamagem em hidrociclones para a remoção dos finos gerados na atrição, seguida de nova análise granuloquímica e comparação dos resultados com a análise granuloquímica efetuada para a amostra bulk (item 3.2.1).

3.2.3 Lixiviação seletiva em meio ácido

Os estudos de lixiviação seletiva foram desenvolvidos apenas para a amostra denominada D2, por ser aquela que apresenta mais alto teor de OTR dentre as amostras estudadas (OTR = 6,46%, tendo monazita como mineral de interesse econômico) e também pela disponibilidade de massa para a realização destes ensaios. A amostra foi processada de maneira total, moída abaixo de 0,30 mm, já

que os ensaios de separações físicas minerais não lograram produtos significativamente enriquecidos em ETR.

O comportamento cinético da dissolução seletiva dos minerais portadores de elementos de terras raras foi investigado em meio sulfúrico (H_2SO_4) e em escala de bancada. Para tal, foi executado um planejamento experimental fatorial completo 2^4 para a análise da significância estatística dos efeitos principais e interações das seguintes variáveis: concentração sulfúrica (C; %), porcentagem de sólidos (S; %), temperatura (T; °C) e tempo (t; hora). Os níveis ensaiados para as variáveis foram definidos com base em condições exequíveis de operação (níveis baixos e níveis altos), buscando amplitudes significativas e considerando trabalhos anteriores como referência (BENEDETTO et al., 1988; BARBOSA et al., 1996; BENEDETTO; MORAIS, 1997; MORAIS et al., 2001; TASSINARI et al., 2001).

A matriz experimental definida para os ensaios encontra-se na Tabela 4, onde são descritas as variáveis e seus respectivos níveis avaliados, bem como a sequência de ensaios, executada de maneira aleatória para evitar possíveis erros sistemáticos nas variáveis. A matriz foi executada em duplicata (2 blocos) com três pontos centrais para a avaliação do erro puro e da significância de curvatura na análise de regressão para o modelo de primeira ordem. Assim, foram realizados um total de 38 ensaios: $2^4 + 3$ níveis centrais * 2 (duplicata).

Tabela 4 – Planejamento dos ensaios de solubilização ácida dos minerais de terras raras (matriz experimental do planejamento fatorial completo 2⁴).

Matriz	Codificada								Unidades reais							
Variáveis	C (%)		S (%)		T (°C)		t (h)		C (%)		S (%)		T (°C)		t (h)	
Níveis	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	20	98	10	40	25	70	0,5	4
Ensaios*																
1 ¹⁵	-1		-1		-1		-1		20		10		25		0,5	
2 ¹⁷	+1		-1		-1		-1		98		10		25		0,5	
3 ¹⁶	-1		+1		-1		-1		20		40		25		0,5	
4 ¹⁸	+1		+1		-1		-1		98		40		25		0,5	
5 ⁹	-1		-1		+1		-1		20		10		70		0,5	
6 ⁴	+1		-1		+1		-1		98		10		70		0,5	
7 ⁸	-1		+1		+1		-1		20		40		70		0,5	
8 ⁷	+1		+1		+1		-1		98		40		70		0,5	
9 ¹	-1		-1		-1		+1		20		10		25		4	
10 ⁵	+1		-1		-1		+1		98		10		25		4	
11 ¹²	-1		+1		-1		+1		20		40		25		4	
12 ¹³	+1		+1		-1		+1		98		40		25		4	
13 ¹⁹	-1		-1		+1		+1		20		10		70		4	
14 ¹⁴	+1		-1		+1		+1		98		10		70		4	
15 ¹¹	-1		+1		+1		+1		20		40		70		4	
16 ¹⁰	+1		+1		+1		+1		98		40		70		4	
17 ²	0		0		0		0		59		25		47,5		2,3	
18 ⁶	0		0		0		0		59		25		47,5		2,3	
19 ³	0		0		0		0		59		25		47,5		2,3	

Obs: C = concentração sulfúrica, S = porcentagem de sólidos, T = temperatura e t = tempo; * sobrescrito informa a ordem de realização dos ensaios (aleatoriamente); na matriz codificada, os níveis baixos são representados por "-1", os altos por "+1" e os pontos centrais por "0".

Os 38 ensaios foram executados a partir de alíquotas de 20 g de amostra, utilizando-se equipamento para banho termostático (banho maria), modelo Banho Incubador (marca Ethiktechnology), com controle de temperatura e agitação mecanizada em 110 rpm. Após filtrados, os produtos gerados foram submetidos a determinações químicas. As soluções/lixívias (idealmente enriquecidas em elementos de terras raras e empobrecidas em contaminantes) foram analisadas por ICP-OES, após diluições em meio nítrico e a partir de calibrações de padrões líquidos com matriz ácida semelhante às amostras, para determinações de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁, Nd₂O₃ e Fe₂O₃. Os resíduos sólidos (idealmente empobrecidos em elementos de terras raras e enriquecidos em contaminantes) foram analisados por FRX, conforme procedimento descrito anteriormente no item 3.2.1.

Cabe destacar que a etapa de filtragem se mostrou uma operação bastante trabalhosa, principalmente nos ensaios que utilizam elevada concentração de ácido (H_2SO_4 98%), pois sua elevada viscosidade demanda tempo para a filtragem e lavagem dos resíduos sólidos.

A análise da significância estatística das respostas químicas, dos efeitos e da interação das variáveis, foi realizada pelo teste t de student (bi-caudal com 95% de nível de confiança), pelo uso do software estatístico Minitab 17, que dispõe de ferramentas para análise de planejamento de experimentos (DOE - Design of Experiments). Uma vez identificadas as variáveis e as interações entre as variáveis mais significativas no processo de lixiviação ácida, análises de regressão linear por mínimos quadrados foram realizadas para obtenção de modelos de predição das respostas químicas, os quais foram utilizados para estabelecer condições de operação otimizadas (BOX et al., 2005).

Nesse estudo, foram consideradas unicamente as respostas químicas dos resíduos sólidos, por apresentarem mais opções de resposta a serem avaliadas (determinações químicas por FRX). Assim, o teste de hipótese proposto foi: verificar a existência de diferenças reais (com significância estatística) na obtenção de respostas (teores) empobrecidas em elementos de terras raras e enriquecidos nos demais elementos de ganga em função de alterações nas condições experimentais (rejeitando a hipótese nula de médias iguais).

A partir das curvas cinéticas de lixiviação das terras raras e também dos principais contaminantes, alguns resíduos sólidos foram submetidos a estudos de mineralogia, visando correlacionar a dissolução dos elementos químicos com os diversos minerais presentes e, principalmente, avaliar as formas de associação e partição das terras raras remanescentes quando na condição de “máxima” solubilização das mesmas. Esses estudos mineralógicos contemplaram análises de DRX/MEV/EDS dos resíduos sólidos, em detalhe para produto Overflow amostra D2, lixiviado individualmente. A determinação do tamanho das partículas da amostra D2 (total -0,30 mm) e do respectivo produto Overflow foi efetuada por espalhamento de luz laser de baixo ângulo em equipamento Malvern Mastersizer 2000 Ver. 5.54, visando a correlação do potencial de solubilização em função da granulometria.

4 RESULTADOS

As características químicas e mineralógicas das amostras são apresentadas nos itens a seguir, sempre comparativamente para as 10 amostras estudadas, assim como os resultados obtidos nas separações minerais, porém considerando ensaios específicos efetuados para cada uma delas. Por fim, o comportamento dos minerais de terras raras frente à lixiviação química foi avaliado unicamente para o denominado depósito D, na amostra mais enriquecida dentre as estudadas (D2).

4.1 Características químicas e mineralógicas de detalhe

4.1.1 Composição química global das amostras

A composição química das amostras está exposta na Tabela 5. Os óxidos de terras raras foram determinados por ICP-OES (>5 ppm), enquanto os principais óxidos constituintes das amostras foram determinados por FRX ($>0,01\%$).

O conteúdo total dos óxidos de terras raras (OTR; somatória de lantanídeos + $Y_2O_3 + Sc_2O_3$; ICP) varia entre 1,27 e 6,45% nas amostras, sendo, em média, mais elevado nas amostras dos depósitos C (4,10%) e D (5,18%).

As denominadas terras raras leves (OTRL = lantanídeos desde o La_2O_3 ao Eu_2O_3) são predominantes em todas as amostras. Representam cerca de 92-94%, em média, do total dos OTR presentes nos depósitos A e B, chegando a 97% nos depósitos C e D. O conteúdo de CeO_2 é o mais elevado (varia entre 0,56 e 3,28% nas amostras e representa, em média, 47% do total dos OTR contidos), seguido pelo conteúdo de La_2O_3 (entre 0,28 e 1,47%; 22% do total contido) e Nd_2O_3 (entre 0,22 e 1,08%; 16% do total contido).

As denominadas terras raras pesadas (OTRP = lantanídeos desde o Gd_2O_3 ao Lu_2O_3) estão presentes em quantidades muito discretas, sendo destaque o conteúdo de Gd_2O_3 , que varia entre 218 e 834 ppm nas amostras, seguido pelo Dy_2O_3 , entre 100 e 497 ppm. Os OTRP representam, em média, 2,9-3,4% do total dos OTR contidos nos depósitos A e B e 1,6-1,8% nos depósitos C e D.

Os teores de Y_2O_3 e Sc_2O_3 variam, respectivamente, de 275 a 2210 ppm e de 8 a 435 ppm e, assim como os OTRP, são mais elevados nas amostras dos depósitos A e B.

Tabela 5 – Composição química das amostras (FRX e ICP-OES).

Óxidos /Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	D1	D2
ICP-OES (ppm; >5)										
ΣOTR	24925	35637	14693	45252	26164	12730	15425	40952	39164	64501
ΣOTRL	23225	33299	12912	40757	24869	11968	14451	39725	37456	63166
ΣOTRP	745	1005	709	1850	564	391	427	757	851	703
La ₂ O ₃	5960	8558	3187	10686	4938	2785	3372	9178	8530	14684
CeO ₂	11408	16086	5645	19513	12444	5816	7167	23223	19113	32810
Pr ₆ O ₁₁	1152	1667	646	1927	1422	667	721	1577	1912	3349
Nd ₂ O ₃	3786	5699	2660	6835	4858	2155	2641	4751	6348	10766
Sm ₂ O ₃	744	1039	625	1448	1018	438	439	810	1286	1346
Eu ₂ O ₃	176	251	149	347	188	106	110	186	267	212
Gd ₂ O ₃	387	537	324	834	315	218	230	352	501	429
Tb ₄ O ₇	53	71	53	139	53	32	39	75	84	76
Dy ₂ O ₃	187	244	186	497	117	100	110	184	184	140
Ho ₂ O ₃	24	32	26	82	20	nd	nd	32	10	14
Er ₂ O ₃	63	81	65	169	31	34	38	57	44	31
Tm ₂ O ₃	6	6	6	20	2	nd	nd	<5	<5	<5
Yb ₂ O ₃	26	32	46	99	25	6	10	48	24	10
Lu ₂ O ₃	<5	<5	<5	9	<5	nd	nd	5	nd	<5
Y ₂ O ₃	683	981	824	2210	354	275	331	461	615	395
Sc ₂ O ₃	272	352	247	435	377	96	216	8	242	238
FRX (%; >0,10)										
ΣOTR*	2,18	3,02	1,33	3,91	2,52	1,14	1,44	4,10	3,90	6,48
La ₂ O ₃	0,58	0,70	0,36	1,08	0,54	0,29	0,37	0,97	0,88	1,54
CeO ₂	1,16	1,66	0,61	2,02	1,35	0,61	0,78	2,28	1,98	3,45
Pr ₆ O ₁₁	<0,10	<0,10	0,11	0,25	0,18	<0,10	<0,10	0,23	0,27	0,35
Nd ₂ O ₃	0,44	0,66	0,25	0,56	0,46	0,24	0,29	0,62	0,78	1,14
ThO ₂	<0,10	<0,10	<0,10	0,13	<0,10	<0,10	<0,10	0,73	<0,10	<0,10
SiO ₂	4,90	20,8	37,3	11,6	23,7	15,6	6,30	24,0	15,2	22,0
Al ₂ O ₃	7,86	8,46	22,2	12,5	23,7	3,54	4,62	24,1	3,32	2,73
Fe ₂ O ₃	49,2	31,1	20,4	37,3	25,7	35,8	44,2	26,6	43,4	36,1
MnO	1,58	1,11	0,84	2,65	1,62	0,53	1,07	2,76	1,25	0,99
MgO	0,45	0,28	0,25	0,18	0,22	1,33	2,20	0,23	0,39	0,32
CaO	1,15	1,34	0,14	0,33	0,15	4,71	2,35	0,14	2,69	5,60
K ₂ O	<0,10	0,12	0,76	<0,10	0,46	<0,10	<0,10	2,60	0,11	0,10
TiO ₂	8,23	9,22	2,30	3,73	2,90	30,3	25,3	2,53	12,7	8,25
P ₂ O ₅	6,72	8,17	2,34	8,27	3,32	1,36	4,32	0,51	6,96	9,53
SrO	0,64	0,90	0,26	0,96	0,25	0,12	0,38	<0,10	0,55	0,59
BaO	4,49	4,68	1,30	5,22	2,17	<0,10	0,20	0,10	2,03	1,80
ZrO ₂	0,31	0,30	0,14	0,32	0,23	0,10	0,15	0,38	0,72	0,35
Nb ₂ O ₅	0,51	0,53	0,33	0,76	0,19	0,19	0,43	0,17	0,36	0,36
PF	11,0	10,1	10,5	10,6	12,8	5,71	7,26	10,2	5,31	4,63

Obs: nd = não detectado; ΣOTR = OTRL+OTRP+Y₂O₃+Sc₂O₃; ΣOTRL = La₂O₃ ao Eu₂O₃; ΣOTRP = Gd₂O₃ ao Lu₂O₃; ΣOTR* = somatória apenas de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ (detectáveis por FRX).

A distribuição do total dos óxidos de terras raras entre leves, pesadas e $Y_2O_3+Sc_2O_3$ é apresentada na Figura 8, considerando o valor médio para os depósitos estudados.

Figura 8 – Distribuição de OTR entre leves, pesados e $Y_2O_3+Sc_2O_3$, em média nos depósitos.

Uma comparação dos teores de La_2O_3 , CeO_2 , Pr_6O_{11} e Nd_2O_3 dosados por ICP-OES com os também detectados por FRX ($>0,10\%$) está apresentada na Figura 9, mostrando elevada correlação linear entre os resultados e valores de R^2 entre 0,917 e 0,997.

Com relação aos principais óxidos constituintes das amostras, os teores de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 são predominantes e ocorrem em proporções variadas nas mesmas, sem mostrar uma composição muito definida em função do depósito estudado. Os conteúdos de TiO_2 (preferencialmente nas amostras do depósito B), assim como os conteúdos de P_2O_5 , BaO e Nb_2O_5 são muitas vezes significativos e também caracterizam a importância econômica desses complexos carbonatíticos.

Figura 9 – Comparação dos resultados de FRX e ICP-OES, considerando os teores de La_2O_3 , CeO_2 , Pr_6O_{11} e Nd_2O_3 (amostras bulk).

4.1.2 Classificação granuloquímica (amostras bulk e após moagem)

O resultado da classificação granulométrica, efetuada para as amostras bulk, está sumariado na Tabela 6, considerando as frações compostas para critério de comparação (foram padronizados 4 intervalos granulométricos para fins comparativos entre as amostras) e com a respectiva distribuição de massa e teor de OTR por fração. Os resultados completos por amostra (frações específicas e distribuição dos demais teores constituintes) encontram-se no Apêndice A.

O teor de OTR nas frações granulométricas (soma de La_2O_3 , CeO_2 , Pr_6O_{11} e Nd_2O_3 , determinados por FRX) tendem à elevação em direção aos finos, exceto para as amostras A5 e C1, onde mostram comportamento inverso.

As amostras do depósito A mostram, em média, 15% em massa de material mais grosso, retido em 0,30 mm, enquanto o passante em 0,020 mm varia entre 39,8 e 64,3% em massa das mesmas, sendo a maior parte relativo a finos abaixo de 0,008 mm (corte estimado na deslamagem – Overflow). Associados aos finos abaixo de 0,020 mm estão distribuições significativas e variadas de OTR, SiO_2 , Fe_2O_3 ,

Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅ e BaO nas amostras (respectivamente entre 58,3 e 75,5%, entre 29,3 e 68,8%, entre 39,9 e 60,6%, entre 42,6 e 81,6%, entre 26,7 e 67,7%, entre 39,3 e 65,2% e entre 30,8 e 61,1%).

Tabela 6 – Sumário dos resultados de distribuição mássica e de teor de OTR por fração granulométrica para as amostras bulk.

%	Fração /Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	D1	D2
	Topsize (mm)	-	-	-	-	-	1,19	1,19	-	-	6,35
Massa retida	+0,30 mm	17,3	16,3	10,2	16,4	13,4	38,3	27,2	27,7	29,4	49,0
	-0,30+0,074 mm	22,7	22,7	11,8	11,6	9,4	26,8	26,5	10,8	21,4	13,2
	-0,074+0,020 mm	20,2	21,0	13,7	13,3	13,0	13,0	17,5	10,7	21,6	10,6
	Underflow1	21,9	19,5	17,3	19,7	17,3	10,5	12,3	27,2	13,2	13,2
	Overflow	17,8	20,5	47,1	39,0	46,9	11,3	16,5	23,5	14,3	14,1
Teor OTR	+0,30 mm	1,21	2,06	1,09	1,60	3,17	1,00	1,05	5,38	1,88	2,84
	-0,30+0,074 mm	1,54	2,23	0,85	2,22	2,99	0,96	1,11	6,20	1,78	2,78
	-0,074+0,020 mm	2,47	3,35	1,02	3,51	2,79	1,16	1,65	4,93	2,75	4,58
	Underflow1	3,88	5,28	1,56	5,22	2,56	1,90	2,57	3,00	6,16	13,5
	Overflow	4,04	5,68	1,43	5,18	2,24	2,09	2,44	2,29	10,0	16,3
Distrib. OTR	+0,30 mm	8,0	9,0	8,6	6,5	16,6	31,3	17,9	36,9	14,6	22,0
	-0,30+0,074 mm	13,3	13,5	7,7	6,4	11,0	20,9	18,6	16,6	10,1	5,8
	-0,074+0,020 mm	19,0	18,8	10,9	11,6	14,1	12,4	18,2	13,1	15,7	7,6
	Underflow1	32,4	27,5	20,8	25,5	17,3	16,3	20,0	20,1	21,6	28,2
	Overflow	27,4	31,2	52,0	50,1	41,0	19,2	25,3	13,3	38,0	36,3
Distrib. OTR ac. abaixo	+0,30 mm	92,0	91,0	91,4	93,5	83,4	68,7	82,1	63,1	85,4	78,0
	-0,30+0,074 mm	78,7	77,5	83,7	87,1	72,4	47,8	63,5	46,5	75,3	72,2
	-0,074+0,020 mm	59,7	58,7	72,8	75,5	58,3	35,5	45,3	33,4	59,6	64,6
	Underflow1	27,4	31,2	52,0	50,1	41,0	19,2	25,3	13,3	38,0	36,3
	Overflow	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sumário Total -0,020 mm	Massa (%)	39,8	40,1	64,3	58,7	64,2	21,8	28,8	50,7	27,6	27,3
	Teor OTR (%)	3,95	5,48	1,46	5,20	2,33	2,00	2,49	2,67	8,17	15,0
	Distrib. OTR (%)	59,7	58,7	72,8	75,5	58,3	35,5	45,3	33,4	59,6	64,6
	Underflow1	32,4	27,5	20,8	25,5	17,3	16,3	20,0	20,1	21,6	28,2
	Overflow	27,4	31,2	52,0	50,1	41,0	19,2	25,3	13,4	38,0	36,3

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX.

As amostras do depósito B apresentam material retido em 0,30 mm variando de 27,2% em massa na amostra B2 a 38,3% na B1, responsáveis respectivamente por 17,9 e 31,3% do total de OTR contido nas mesmas. Abaixo de 0,020 mm estão 21,8% em massa na amostra B1 (responsável por 35,5% do total de OTR contido, 22,4% do SiO₂, 23,5% do Fe₂O₃, 53,2% do Al₂O₃, 39,5% do P₂O₅) e 28,8% na

amostra B2 (responsável por 45,3% do total de OTR contido, 46,7% do SiO_2 , 28,1% do Fe_2O_3 , 53,4% do Al_2O_3 , 23,9% do CaO e 42,5% do P_2O_5).

A amostra do depósito C mostra 27,7% em massa retida em 0,30 mm e que contém 36,9% do total de OTR presente na mesma; o passante em 0,020 mm representa 50,7% em massa e é responsável por 33,4% do OTR, 75,9% do SiO_2 , 18,3% do Fe_2O_3 , 68,1% do Al_2O_3 , 68,2 do K_2O , 21,6% do TiO_2 e 48,2% do P_2O_5 .

As amostras do depósito D mostram variadas proporções de material grosso, com 29,4% em massa retida em 0,30 mm na amostra D1 e 49,0% na D2, porém apresentam proporções semelhantes de material passante em 0,020 mm, de 27,3-27,6%. Associados aos finos estão distribuições significativas e variadas do total de OTR (entre 59,6 e 64,6%), Fe_2O_3 (entre 28,2 e 38,2%), Al_2O_3 (entre 29,7 e 34,0%), P_2O_5 (entre 33,3 e 34,4%) e do total de BaO (22,0 e 27,1%) nas amostras.

As curvas de distribuição acumuladas de massa e teor de OTR nas frações granulométricas das amostras são apresentadas na Figura 10. A parcela de OTR associada às frações finas (material abaixo de 0,020 mm e especificamente no produto Overflow) é mais elevada nos depósitos A e D.

Figura 10 – Distribuições acumuladas de massa (a) e de OTR (b) nas frações granulométricas, considerando as amostras bulk.

A Figura 11 apresenta um sumário da distribuição dos principais óxidos constituintes das amostras ao longo das frações granulométricas, comparativamente com a distribuição de OTR.

Figura 11 – Distribuição dos principais óxidos por fração granulométrica.

O resultado da classificação granulométrica, efetuada após a cominuição das amostras A1, A2, B1, B2, C1, D1 e D2, está sumariado na Tabela 7, considerando frações compostas para critério de comparação (a exemplo da Tabela 6) e com a respectiva distribuição de massa e teor de OTR por fração. Os resultados completos por amostra estão no Apêndice A.

Tabela 7 – Sumário dos resultados de distribuição mássica e de teor de OTR por fração granulométrica para as amostras moídas (A1, A2, B1, B2, C1, D1 e D2).

%	Fração /Amostras	A1	A2	B1	B2	C1	D1	D2
	Topsize (mm)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,125	0,30	0,30
Massa retida	-0,30+0,15 mm	19,1	18,6	33,1	27,2	11,1*	22,5	24,8
	-0,15+0,074 mm	15,4	15,3	19,1	17,4	13,4**	20,7	17,6
	-0,074+0,020 mm	21,5	22,9	19,7	20,5	16,4	24,4	21,1
	Underflow1	19,9	20,4	11,2	13,5	25,2	14,6	19,4
	Overflow	24,1	22,9	17,0	21,4	33,9	17,9	17,2
Teor OTR	-0,30+0,15 mm	1,15	1,92	0,93	0,92	4,71*	1,63	2,37
	-0,15+0,074 mm	1,66	2,21	0,95	1,09	5,70**	1,90	2,89
	-0,074+0,020 mm	2,22	2,78	1,09	1,42	5,36	2,52	4,70
	Underflow1	3,74	4,95	1,76	2,38	3,86	5,72	10,6
	Overflow	4,23	5,86	2,18	2,51	2,55	9,64	14,4
Distrib. OTR	-0,30+0,15 mm	8,1	9,7	24,2	15,8	13,1*	9,4	8,9
	-0,15+0,074 mm	9,4	9,1	14,2	12,0	19,1**	10,0	7,7
	-0,074+0,020 mm	17,6	17,3	16,9	18,2	22,0	15,6	15,0
	Underflow1	27,4	27,4	15,5	20,3	24,3	21,2	31,1
	Overflow	37,5	36,5	29,2	33,7	21,6	43,8	37,3
Distrib. OTR ac. abaixo	-0,30+0,15 mm	91,9	90,3	75,8	84,2	86,9*	90,6	91,1
	-0,15+0,074 mm	82,5	81,2	61,6	72,2	67,8**	80,6	83,4
	-0,074+0,020 mm	64,9	63,8	44,7	54,0	45,9	65,0	68,4
	Underflow1	37,5	36,5	29,2	33,7	21,6	43,8	37,3
	Overflow	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sumário Total -0,020 mm	Massa (%)	44,0	43,3	28,2	34,9	59,1	32,4	36,6
	Teor OTR (%)	4,01	5,43	2,01	2,46	3,11	7,88	12,4
	Distrib. OTR (%)	64,9	63,8	44,7	54,0	45,9	65,0	68,4
	Underflow1	27,4	27,4	15,5	20,3	24,3	21,2	31,1
	Overflow natural	36,2	34,0	27,0	32,8	21,6***	41,0	37,3***
	Overflow da moagem	1,3	2,5	2,1	0,9		2,8	
	Enriquecimento OTR	9%	9%	26%	19%	37%	9%	6%

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX. Na amostra C1, * = fração +0,125 mm e ** = fração -0,125+0,074 mm. Amostras A3, A4 e A5 não foram cominuídas. *** = sem dado de partição entre Overflow natural vs Overflow gerado com a moagem.

Comparativamente com a classificação granulométrica das amostras bulk, os resultados indicam que a moagem não promove significativa geração de finos e que menos de 3% do conteúdo total de OTR nas amostras são especificamente incorporados junto às lamas (Overflow gerado com a moagem). Conforme curvas acumuladas apresentadas na Figura 12, a massa cominuída e respectivo teor de OTR são preferencialmente redistribuídos ao longo das frações granulométricas para as amostras A1, A2, D1 e D2.

Nas amostras do depósito B, porém, esta redistribuição de teores nas frações representa um enriquecimento de OTR para as frações finas, abaixo de 0,020 mm, equivalente a 19% na amostra B2 e de 26% na B1. Isto ocorre devido à elevada proporção de massa cominuída e que também continha elevada quantidade de OTR. O mesmo comportamento é observado na amostra C1, com enriquecimento de 37% de OTR no material abaixo de 0,020 mm após moagem em 0,125 mm.

Para as amostras D1 e D2, a geração de finos é pouco expressiva, ocorrendo inclusive certo acúmulo de massa e teor de OTR nas frações acima de 0,020 mm.

Figura 12 – Distribuições acumuladas de massa (a) e de OTR (b) nas frações granulométricas, considerando as amostras antes e após moagem (A1, A2, B1, B2, C1, D1, D2).

4.1.3 Mineralogia global e por frações granulométricas

A composição mineralógica das amostras é apresentada na Tabela 8 e ilustrada na Figura 13, considerando os diferentes toptsize de moagem aos quais estas foram submetidas.

Tabela 8 – Composição mineralógica total das amostras (% massa; MLA).

% Mineral / Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	D1	D2
Topsize (mm)	0,30	0,30	1,19	1,19	1,19	0,30	0,30	0,125	0,30	0,30
monazita	3,1	4,1	1,1	4,4	2,4	0,9	1,3	0,5	6,4	9,8
bastnaesita								3,0		
cerianita	0,2	0,3	0,1	0,3	0,6			2,5		
Fe-óxidos	21	7,7	8,4	29	13	18	20	9,2	17	12
goethita	37	28	10	13	16	13	21	18	27	20
goethita-monazita										6,2
quartzo	2,6	18	14	3,9	3,9	13	3,8	0,1	14	21
quartzo-monazita	<0,1	0,7								
Al-fosfatos	19	23	8,1	32	10	3,4	8,1	0,6	12	8,7
apatita	0,8	1,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	2,1		2,9	8,2
gibbsita-caulinita	2,0	3,0	45	6,6	45	8,6	5,7	26		
mica	0,2	0,2	8,2	0,2	4,2			32		
ilmenita	3,8	3,7	0,6	0,9	0,8	11	16	0,9	10	8,4
Ti-óxidos	5,9	7,0	0,8	1,8	1,1	21	19	1,9	8,0	1,9
perovskita	<0,1	<0,1				9,3	0,5			
Mn-óxidos	1,6	1,4	2,1	7,6	2,7	0,6	1,2	4,2	1,3	0,8
outros	3,0	2,4	0,8	0,8	0,3	0,6	0,9	1,1	1,2	2,1

Obs: outros = xenotima, Sc-fosfato, carbonatos, zircão, calzirtita, zirkelita-zirconolita, baddeleíta, barita, pirocloro, feldspatos, vermiculita, piroxênio, anfibólio, pirita, titanita, torianita, Th-fosfato, Cr-espinélio e priderita.

Figura 13 – Composição mineralógica total das amostras (%massa; MLA).

A assembleia mineral é composta basicamente por óxi-hidróxidos de ferro (goethita, hematita e magnetita), alumino-fosfatos (série goiazita-gorceixita), apatita, quartzo, caulinita, gibbsita, mica, ilmenita, óxidos de titânio (anatásio e, subordinadamente, rutilo), perovskita, além dos típicos minerais portadores de terras raras: monazita [(ETR)PO₄], bastnaesita [(ETR)(CO₃)F], cerianita [CeO₂], traços de xenotima [YPO₄] e, possivelmente, de pretulita(?) [ScPO₄]. Como minerais acessórios ocorrem também carbonatos, zircão, calzirtita, zirkelita-zirconolita, baddeleíta, barita, óxi-hidróxidos de bário e manganês, pirocloro, feldspatos, vermiculita, piroxênio, anfibólio, pirita, titanita, torianita, fosfato de tório, espinélio de cromo e priderita.

Fases denominadas goethita-monazita, quartzo-monazita, gibbsita-caulinita referem-se a íntimas e não individualizáveis associações desses minerais (de acordo com o critério de resolução aplicado na coleta de imagens na análise pelo sistema MLA), predominando em cada uma delas as variedades goethita, monazita e caulinita, respectivamente. Essas associações são descritas e ilustradas nos itens 4.1.5 e 4.1.6.

Em relação aos maiores constituintes, as amostras de cada depósito estudado se mostram relativamente semelhantes, com exceção do depósito A, que apresenta dois tipos mineralógicos principais, um deles com elevadas quantidades de óxi-hidróxidos de ferro e alumino-fosfatos (amostras A1, A2 e A4) e o outro enriquecido também em caulinita e, secundariamente, gibbsita (amostras A3 e A5). As quantidades elevadas de minerais de titânio (ilmenita, anatásio e perovskita) são características das amostras do depósito B, enquanto a proporção de mica é elevada na amostra C e as quantidades de monazita e apatita são, em média, mais elevadas nas amostras do depósito D, comparativamente às demais.

A Figura 14 e Figura 15 apresentam a composição mineralógica das amostras por fração granulométrica (descritas numericamente no Apêndice B). De maneira geral, os conteúdos de óxidos de ferro, quartzo, alumino-fosfatos e minerais de titânio tendem à diminuição em direção às frações granulométricas mais finas, ao contrário da proporção de goethita, argilominerais e minerais de terras raras, geralmente elevada.

Figura 14 – Composição mineralógica por fração granulométrica, considerando as amostras do depósito A (%massa; MLA e DRX-Rietveld para o Overflow).

Figura 15 – Composição mineralógica por fração granulométrica, considerando as amostras do depósito B, C e D (%massa; MLA e DRX-Rietveld para o Overflow).

Nas amostras A3, A4 e A5, o material acima de 1,19 mm (não analisado ao MLA devido à baixa representatividade estatística para leitura de partículas grossas) representa, respectivamente, 3,7%, 7,0% e 4,8% em massa e é constituído principalmente de óxi-hidróxidos de ferro, alumino-fosfatos, caulinita e quartzo, em diferentes proporções para cada amostra (difratogramas no Apêndice B).

O principal mineral portador de terras raras nas amostras é a monazita, que varia de 1,1 a 4,4% em massa nas amostras do depósito A, de 0,9 a 1,3% nas amostras do depósito B, equivale a 0,5% em massa na amostra C1 e chega a valores de 6,4 e 9,8% em massa nas amostras do depósito D. Como exceção, a amostra C1 apresenta também como principais minerais de terras raras a bastnaesita (3,0% em massa) e a cerianita (2,5% em massa). Traços de xenotima estão presentes nas amostras dos depósitos A e C, e de fosfato de Sc apenas nas amostras do depósito A (menos de 5 grãos em cada amostra).

Ao longo das frações granulométricas, os minerais de terras raras tendem à elevação em direção aos finos, exceto nas amostras A5 e C1, o que corrobora os resultados químicos apresentados no item 4.1.2. Na Tabela 9 e Figura 16 são detalhadas as proporções dos minerais de terras raras nas frações, sendo que estes valores não consideram as proporções de monazita em meio às denominadas fases goethita-monazita e quartzo-monazita, ou seja, estão ligeiramente subestimados.

Devido à complexidade da análise de imagens (MEV/EDS/MLA) quando aplicada a materiais muito finos (tema discutido no item 4.1.5), a estimativa mineralógica dos produtos Overflow das amostras foi também obtida por DRX com o método de Rietveld.

Na amostra D2, por exemplo, estima-se um total de monazita da ordem de 24% associado ao Overflow (difratograma refinado conforme Figura 17), o que, correlacionado aos dados obtidos pelo MLA, resultaria, de maneira exploratória, na seguinte partição: 24% monazita (obtida por DRX-Rietveld) - 17% monazita (obtida por MLA) = 7% de monazita relativa a fase goethita-monazita (obtida por MLA).

Tabela 9 – Proporção dos minerais de terras raras nas frações granulométricas (% massa).

Mineral	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	D1	D2
Topsize (mm)	0,30	0,30	1,19	1,19	1,19	0,30	0,30	0,125	0,30	0,30
monazita										
-1,19+0,30 mm			0,4	0,8	2,1					
-0,30+0,15 mm	1,0	1,7	0,4	1,2	2,4	0,3	0,6	0,4*	2,1	4,6
-0,15+0,074 mm	1,6	2,2	0,6	2,2	3,1	0,5	1,0	0,5**	2,6	4,8
-0,074+0,020 mm	2,0	3,6	0,6	4,0	2,8	0,7	1,2	0,6	4,7	9,9
Underflow1	4,5	6,4	1,4	5,4	2,5	1,2	1,4	0,7	9,4	15
Overflow	5,6	5,9	1,5	5,6	2,2	2,5	2,4	0,4	16	17
somatória dos minerais de terras raras (monazita+bastnaesita+cerianita+xenotima+Sc-fosfato)										
-1,19+0,30 mm				0,9	3,8					
-0,30+0,15 mm	1,1	1,9	0,6	1,4	3,5	0,3	0,6	6,6*	2,1	4,6
-0,15+0,074 mm	1,8	2,5	0,8	2,6	3,7	0,5	1,0	9,1**	2,6	4,8
-0,074+0,020 mm	2,2	4,1	0,8	4,4	3,5	0,7	1,2	8,9	4,7	9,9
Underflow1	4,8	6,8	1,6	5,8	3,1	1,2	1,4	6,3	9	15
Overflow	5,8	6,1	1,5	5,7	2,5	2,5	2,4	3,2	16	17

Obs: Amostra C1 - predominância de bastnaesita e cerianita;

* = fração +0,125 mm e ** = fração -0,125+0,074 mm.

Figura 16 – Distribuições acumuladas de massa e dos minerais típicos de terras raras nas frações granulométricas (exemplo para as amostras A3, A5, C1 e D2).

Figura 17 – Quantificação de minerais no produto overflow utilizando-se o método de DRX-Rietveld (exemplo para a amostra D2).

Os difratogramas do produto Overflow das demais amostras encontram-se no Apêndice B (resultados também apresentados na Figura 14 e na Figura 15). De maneira geral, as maiores diferenças entre os resultados obtidos pelo MLA e DRX-Rietveld foram observadas para as amostras A1, A4 e C1, e principalmente em relação aos maiores constituintes.

A confiabilidade dos resultados mineralógicos apresentados pelo MLA foi, entretanto, verificada por fração granulométrica, através da conciliação dos resultados químicos dosados por FRX com aqueles calculados a partir da mineralogia modal obtida pelo MLA, conforme apresentado na Figura 18. Os resultados foram considerados satisfatórios, mesmo para as frações finas abaixo de 0,020 mm, mostrando coeficientes de correlação (R^2) entre 0,960 e 0,995 nas amostras. Adicionalmente, para as frações mais grossas, por vezes, foram também analisadas duas seções polidas em paralelo com elevada coerência entre os resultados.

As composições químicas dos minerais obtidas por MEV-EDS e adotadas no estudo de MLA encontram-se no Apêndice C.

Figura 18 – Comparação dos resultados químicos dosados por FRX e calculados pelo MLA.

4.1.4 Características físico-químicas dos minerais de terras raras

Os minerais típicos de terras raras ocorrem de maneira bastante semelhante nas amostras estudadas, no que se refere às suas características físico-químicas. Aspectos físicos gerais são apresentados na Fotomicrografia 1, em termos de tipos de associação com a ganga e tamanho de grãos.

Fotomicrografia 1 - Minerais de terras raras se mostram em tons claros de cinza nas imagens de elétrons retroespalhados (BSE) (a); ocorrem como grãos livres ou mistos com a ganga, por vezes preenchendo fraturas nesses minerais (b, c). Detalhe para suas dimensões micrométricas, como inclusões ou em íntima associação com a ganga (d, e).

A monazita, principal mineral de interesse nas amostras dos depósitos A, B e D, ocorre na forma de cristais de dimensões micrométricas a submicrométricas, podendo apresentar aspecto coliforme, maciço e acicular, ou como agregados de cristais muito finos e porosos, conforme observado na Fotomicrografia 2.

Fotomicrografia 2 - Imagens de BSE ao MEV. Aspectos dos cristais de monazita: coliforme (a), acicular (b), maciço (c) e na forma de agregados micrométricos (d) - Amostra A1.

Os cristais de monazita apresentam considerável variabilidade composicional. A variedade predominante é enriquecida em cério, mas tipos enriquecidos em lantânio e/ou neodímio são comuns e geralmente ocorrem como variações intercrescidas, como mostra a Fotomicrografia 3. Conteúdos de samário, európio, gadolínio, escândio e disprósio são esporadicamente observados na monazita, sempre em concentrações muito baixas, já próximas do limite de detecção da

microanálise por EDS. De maneira geral, baixos fechamentos químicos são observados para as microanálises da monazita, o que pode ser justificado pela microcristalinidade e porosidade dos cristais. Nenhum indício da presença de hidratação (rabdofanita $[(\text{REE})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$) foi detectado para justificar tal fechamento, sendo também inconclusiva sua detecção a partir dos difratogramas obtidos ao longo deste trabalho.

Fotomicrografia 3 - Variabilidade composicional da monazita (%massa; valores não normalizados) - Amostra A2 (imagens de BSE ao MEV).

Monazita (EDS 1 e 2) mista com óxi-hidróxido de Fe (EDS 3)

EDS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₅	ThO ₂
1			30,8	4,36		1,92		25,8	17,0	7,39	
2			28,7	2,32	0,55	3,05		17,5	28,9	6,36	1,07
3	0,54	0,94	1,32		76,0		1,72		2,23

Monazita (EDS 1 e 2) mista com quartzo (EDS 3)

EDS	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Sc ₂ O ₃	SrO	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₅	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	ThO ₂
1		29,2	1,68	0,27	2,66	13,0	26,4	1,80	8,77	0,84	0,85	2,12
2		28,8	1,75		3,52	13,7	26,7	1,86	8,41		0,55	1,83
3	100,0

Monazita (EDS 1 e 2) mista com Al-fosfato (EDS 3)

EDS	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SrO	BaO	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₅
1		28,8	1,15		2,33		18,7	33,2	2,67	8,38
2		29,5	0,92		2,51		18,8	33,0	2,81	8,32
3	29,0	29,3	0,27	1,36	4,65	21,0				

Assim como a monazita, a bastnaesita (amostra C1) ocorre tanto na forma de agregados de micrométricos e porosos, como em cristais alongados e bem definidos, como mostra a Fotomicrografia 4. A variabilidade química da bastnaesita refere-se principalmente aos conteúdos de cério e lantânio (principais constituintes),

mas variedades ricas em neodímio são localmente observadas; traços de tório estão geralmente presentes e, raramente, de ítrio.

Fotomicrografia 4 - Bastnaesita na forma de agregado poroso (a), como cristais alongados (b) ou como grãos micrométricos (c) (%massa; valores não normalizados) - Amostra C1 (imagens de BSE ao MEV).

Bastnaesita (EDS 2 e 3) mista com gibbsita (EDS 1)

EDS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₅	ThO ₂
1	60,5		0,33				
2			1,11	14,3	27,4	5,84	6,57
3	8,61	1,49	0,66	13,3	28,4	6,37	7,06

Bastnaesita (EDS 2) associada com gibbsita (EDS 1), Ti-óxido (EDS 3) e mica (EDS 4)

EDS	F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₅	ThO ₂
1			60,8									
2	6,31		1,01					1,07		33,9	13,0	3,72
3			1,84	0,63		77,2	8,85		3,92			
4		0,52	34,7	41,2	9,13	0,37	3,28					

A cerianita ocorre geralmente como cristais muito finos, com caráter poroso e preenchendo fraturas e/ou intimamente associados a outros minerais, ou intercrescida com a monazita (Fotomicrografia 5). É composta predominantemente

por cério, mostrando tipos enriquecidos em tório ou ferro (máximo de 10%) na forma de zoneamentos e, localmente, traços de escândio.

Fotomicrografia 5 - Formas de ocorrência da cerianita, variabilidade composicional e associações (imagens de BSE ao MEV).

Intercrescimento de monazita (predominante nos pontos de EDS 1 e 2) e cerianita (predominante no ponto de EDS 3), com caráter poroso (%massa; valores não normalizados)

EDS	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	Sc ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SrO	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₅	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	ThO ₂
1		25,6	1,36	0,48		2,21	14,2	19,2	3,44	13,1	1,44	0,47	2,92
2		24,6	1,35	0,38		2,19	13,2	18,9	3,36	13,3	0,98	0,57	2,79
3	0,94	4,51	0,39	0,82	3,28	0,20		75,2

Cerianita (EDS 1) com superfície limpa, mista com óxi-hidróxido de Fe (EDS 2 e 3)

EDS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Fe ₂ O ₃	CeO ₂	ThO ₂
1	0,91	0,84	1,24		2,90	83,1	4,36
2	3,74	3,53		1,14	83,7	1,88	
3	2,31	3,21		0,57	87,3

Cerianita preenchendo fraturas (EDS 1) e como associações muito finas com óxi-hidróxido de BaMn (EDS 2 e 3)

EDS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	BaO	CeO ₂	PbO
1	1,25	0,63	3,51	0,64	2,27	10,1	4,78		63,3	
2	2,59		0,84			51,7	5,94	12,4	1,25	2,54
3	2,41	0,48	0,83			49,1	6,68	11,6	2,93	2,50

Xenotima e fosfato de escândio foram observados como traços em amostras do depósito A, conforme Fotomicrografia 6. A xenotima é preferencialmente constituída de terras raras pesadas, basicamente ítrio, além de localmente estarem presentes menores quantidades de samário, gadolínio, disprósio, hólmio e érbio; apresenta caráter poroso e ocorre em agregados com cristais micrométricos a submicrométricos. O fosfato de escândio, por sua vez, foi observado em cristais preferencialmente homogêneos, com dimensões de 10 a 70 μm .

Fotomicrografia 6 - Xenotima como associações porosas com Al-fosfato e caulinita (a) ou como cristais bem definidos mistos com quartzo (b). Partícula praticamente individualizada de fosfato de escândio, com superfície límpida (c) - Amostra A4 (imagens de BSE ao MEV).

A Fotomicrografia 7 apresenta espectros de EDS que ilustram a variabilidade composicional dos minerais de terras raras (também apresentada no Apêndice C).

Fotomicrografia 7 - Micronálises ao MEV/EDS. Variabilidade composicional nos típicos minerais de terras raras: diferente hidratação ou porosidade na monazita (a), variação de Ce-La na bastnaesita (b), zoneamento de Th na cerianita (c). Íntima associação de xenotima e torianita (d) e entre o fosfato de Sc e óxi-hidróxido de Fe (e).

Curvas comparativas de distribuição granulométrica acumulada relativa aos grãos dos principais minerais de terras raras (monazita + bastnaesita + cerianita nas frações acima de 0,008 mm), estabelecidas a partir de análises de imagens (MLA), são apresentadas na Figura 19, considerando-se o diâmetro do círculo equivalente (ECD). Os minerais de terras raras mostram, em média, d_{50} de 15 μm (diâmetro abaixo do qual estão 50% dos grãos), variando entre 12 e 22 μm nas amostras, e não apresentam comportamento específico de acordo com o depósito estudado.

Figura 19 – Distribuição acumulada de tamanho dos grãos (ECD) dos minerais de terras raras (a). Grãos de bastnaesita são discretamente maiores que os de cerianita e de monazita na amostra C1 (b).

4.1.5 Partição das terras raras entre os minerais portadores

A distribuição dos óxidos de terras raras (detectáveis ao MEV/EDS) entre os minerais portadores é apresentada na Tabela 10 e ilustrada na Figura 20, enquanto no Apêndice D encontra-se também a partição dos principais óxidos (OTR, além de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , K_2O , BaO e/ou CaO).

Os minerais típicos de terras raras respondem por conteúdos de OTR bastante variados nas amostras, em relação aos totais contidos nas mesmas. Nas amostras A1, A2 e A4, a monazita é o principal portador, assumindo entre 61 e 70% do total contido, enquanto a cerianita responde por valores entre 6 e 8%. Nas amostras A3 e A5, a parcela de OTR na forma de monazita está entre 50 e 55%, enquanto que associados à cerianita estão entre 14 e 24%.

Tabela 10 – Partição de OTR entre os minerais portadores.

% Mineral / Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	D1	D2
monazita	70	61	50	70	55	40	47	7	95	70
bastnaesita			<1	<1	<1			39		
cerianita	6	8	14	7	24			39		
Fe-óxidos			10	9	7	11	15	1		
goethita	7	3	13	5	8			10		9
goethita-monazita										19
quartzo										
quartzo-monazita	1	15								
Al-fosfatos	15	12	9	9	5	4	12	1	3	2
apatita										
gibbsita-caulinita						3	2			
mica								4		
ilmenita										
Ti-óxidos						31	22			
perovskita						10	<1			
Mn-óxidos			1	<1	<1			<1		
outros	1	1	3	<1	<1	1	2	<1	2	<1
Total relativo aos minerais típicos de terras raras (monazita+bastnaesita+cerianita+xenotima+Sc-fosfato)										
	76	69	65	78	79	40	47	85	95	70

Obs: outros = xenotima, Sc-fosfato, carbonatos, zircão, calzirtita, zirkelita-zirconolita, baddeleíta, barita, pirocloro, feldspatos, vermiculita, piroxênio, anfibólio, pirita, titanita, torianita, Th-fosfato, Cr-espinélio e priderita.

Figura 20 – Partição de OTR entre os minerais portadores.

Nas amostras do depósito B, a parcela de OTR associados aos minerais típicos (basicamente monazita) varia entre 40 e 47%, estando ainda uma parcela significativa associada aos óxidos de titânio (31% na amostra B1 e 22% na B2).

A bastnaesita e a cerianita são responsáveis, cada um individualmente, por 39% da totalidade dos OTR contidos na amostra C1, estando 7% associados à monazita e o restante aos demais minerais. A monazita é responsável pela quase totalidade dos conteúdos de OTR na amostra D1, enquanto na amostra D2, 70% do total de OTR está associado à monazita e 19% refere-se à fase denominada monazita-goethita.

Os conteúdos de terras raras associados aos demais minerais, que não os típicos de terras raras, são devidos basicamente a dois fatores:

- relacionado aos processos genéticos de formação, em que diferentes minerais incorporam elementos de terras raras durante os processos primários e/ou supergênicos de evolução. Nas amostras estudadas, a presença de ETR foi constatada na estrutura do alumino-fosfato, goethita, perovskita, anatásio, calzirtita, zirkelita-zirconolita e pirocloro, conforme ilustrado na Fotomicrografia 8;
- relacionado à ocorrência de inclusões de minerais de terras raras em outros minerais de forma bastante complexa, seja como inclusões submicrométricas ou na forma de intercrescimentos de cristalitos de diminutas dimensões. Dependendo do tamanho dessas associações (entre minerais de terras raras e fase hospedeira), a correta classificação e diferenciação dos minerais se torna, muitas vezes, limitada, considerando as condições operacionais e critérios de resolução viáveis de serem empregados rotineiramente em análises ao MEV/EDS e sistema MLA. Dessa forma, os minerais hospedeiros acabam assumindo parte das fases de terras raras presentes (como microinclusões), de maneira que a proporção das fases típicas de terras raras acaba subestimada. Como exemplo, tem-se a chamada fase goethita-monazita na amostra D2, caracterizada por ser um agregado intercrescido e constituído de diminutos cristalitos desses minerais, não passíveis de serem individualizados, e a fase quartzo-monazita na amostra A2. Outros minerais que incorporam conteúdos de ETR nas amostras, de acordo com os tipos de associações presentes, são preferencialmente alumino-fosfatos, óxi-hidróxidos de ferro, óxi-hidróxidos de manganês, além dos óxidos de titânio e da perovskita no caso das amostras do depósito B (Fotomicrografia 9 a Fotomicrografia 12).

Fotomicrografia 8 – Outros minerais portadores de terras raras em sua estrutura (imagens de BSE ao MEV; %massa - valores não normalizados).

Zirkelita-zirconolita na forma livre, mostrando zoneamentos composicionais (Nb e ETR)

EDS	MgO	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	CeO ₂	Nd ₂ O ₅
1	0,55	10,7	32,1	9,90	34,3		7,57	4,95
2	0,61	8,08	24,3	8,59	31,8	13,6	8,39	4,68

Niobato (EDS 1 e 2) com ETR, misto com óxi-hidróxido de ferro (EDS 3)

EDS	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	BaO	CeO ₂	Nd ₂ O ₅	ThO ₂	U ₃ O ₈
1			2,70		4,52	1,00	52,7	10,6	4,58		5,57	
2		1,06	0,53		4,07	1,65	47,7		6,20	1,21	5,62	3,00
3	0,55	0,75	2,46	0,46		85,6

Goethita na forma livre, mostrando Sc₂O₃ localmente

Spectrum	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
1	1,52	1,57	1,99	0,19	3,17		75,2
2	1,70	1,89	1,59		3,23		75,3
3	1,90	2,07	1,22	0,16	2,70	0,46	75,0
4	1,54	1,64	2,04		2,91	0,25	76,1

Perovskita (EDS 1) com Nb e ETR na estrutura, mista com óxido de titânio (EDS 2 e 3)

EDS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	CeO ₂
1				38,6	57,2	1,01	0,58	1,03
2	3,58		3,10	0,87	77,8	6,26		
3	4,56	0,38	2,96	0,46	78,3	4,36		

Fotomicrografia 9 - Minerais típicos de terras raras na forma de microinclusões (a, b; amostra C1) ou intercrescidos com a ganga (c; amostra A4) (imagens de BSE ao MEV).

Intercrescimento de monazita, cerianita e óxi-hidróxido de ferro, respectivamente predominantes nos pontos de EDS 1, 2 e 4 (%massa; valores não normalizados)

EDS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Sc ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₅
1			20,2	1,49	0,58			1,25	1,15	8,28	41,3	9,99
2	0,64	0,31	8,37	0,52	0,68			2,94			68,5	1,52
3	0,34	1,41	4,99	0,38		1,14		71,3		2,68	6,60	2,37
4	0,28	1,94				0,51	0,90	89,1			3,56	

Fotomicrografia 10 - Mapeamento químico por EDS em partícula de óxido de titânio com inclusões submicrométricas de monazita - Amostra B2.

Fotomicrografia 11 - Mapeamento químico por EDS em partícula mista e intercrescida de monazita, Al-fosfato e óxi-hidróxido de Mn - Amostra B1 (imagens de BSE ao MEV).

Fotomicrografia 12 - Alumino-fosfato mostrando finos veios enriquecidos em uma fase portadora de ETR (a; imagens de BSE ao MEV), mas abaixo do limite de resolução da análise de imagen por MLA (b; imagem classificada). Espectro de EDS mostrando a composição química da partícula em (c).

Fonte: (ANTONIIASSI et al., 2015).

Os baixos teores dos ETRP assim como do Y_2O_3 , do Sc_2O_3 e do ThO_2 , próximos ao limite de detecção das análises de EDS, e sua distribuição errática nos minerais portadores, inviabilizam a definição estatística de sua partição individualizada entre as fases portadoras. Minerais passíveis de serem identificados como portadores de ETRP são, por exemplo, monazita e xenotima; portadores de Y_2O_3 são xenotima e bastnaesita; portadores de Sc_2O_3 são monazita, cerianita, goethita e o Sc-fosfato; e portadores de ThO_2 são monazita, bastnaesita, cerianita, goethita, xenotima, zirkelita-zirconolita, pirocloro, toritanita e o Th-fosfato (conforme apresentado no Apêndice C).

4.1.6 Associação e liberação dos minerais de terras raras

A Tabela 11 apresenta um sumário da distribuição das formas de associação dos minerais de ETR (monazita + bastnaesita + cerianita + xenotima + Sc-fosfato) (% em massa) entre livres ($\geq 95\%$ do mineral de interesse em área), mistos em partículas binárias (2 fases) e mistos em outras associações mais complexas (3 ou mais fases), para o total das amostras acima de 0,008 mm.

Os minerais de ETR apresentam liberação global, na granulometria acima de 0,008 mm, variando entre 32 e 63% nas amostras (49% em média). Em direção às frações granulométricas mais finas, a proporção de partículas livres é sistematicamente elevada, mas valores superiores a 60% de liberação ocorrem apenas abaixo de 0,020 mm e não ultrapassam 83% no produto Underflow1 (-0,020+0,008 mm), mesmo considerando a cominuição em 0,125 mm na amostra C1.

A baixa liberação desses minerais se deve à fina granulação dos mesmos (em média 15 μm , conforme resultados anteriormente apresentados na Figura 19) e à ocorrência de partículas intercrescidas com a ganga mesmo em frações finas e ultrafinas. A liberação global dos minerais de terras raras nas amostras aumentaria se fosse incluída a fração abaixo de 0,008 mm (Overflow), de considerável representatividade mássica e proporção de minerais de ETR contidos, conforme resultados da Tabela 6, Tabela 7 e Figura 16.

Na forma mista com a ganga, os minerais de ETR, na granulometria acima de 0,008 mm, ocorrem principalmente em associações binárias, geralmente com óxi-hidróxidos de ferro, alumino-fosfatos, óxi-hidróxidos de manganês, óxidos de titânio ou mica, a depender das amostras e depósitos estudados. A Figura 21 a Figura 25 ilustram as formas de associação por fração granulométrica, considerando individualmente os principais minerais de ETR das amostras, assim como apresentam imagens da classificação obtida pelo sistema MLA.

Tabela 11 – Sumário das formas de associação da somatória dos minerais de terras raras (% em massa; Total +0,008 mm).

Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	D1	D2
Topsize (mm)	0,30	0,30	1,19	1,19	1,19	0,30	0,30	0,125	0,30	0,30
%massa (Total +0,008 mm)	75,9	77,1	52,9	61,0	53,1	83,0	78,6	66,1	82,1	82,8
Associações (%)										
Livres	63	56	43	53	41	32	44	41	58	55
Mistos em binárias	24	27	33	35	34	45	39	38	29	33
Mistos em outras (≥3)	13	17	24	12	25	23	17	21	13	12
Livres por fração (mm)										
-1,19+0,30			13	21	11					
-0,30+0,15	27	13	7	19	14	1	24	24*	2	28
-0,15+0,074	39	30	19	25	23	12	37	27**	29	35
-0,074+0,020	54	56	37	47	44	34	42	39	54	54
Underflow1	79	78	60	64	72	65	67	62	83	73
Mistos em binárias										
Fe-óxidos	2,9	1,8	13	15	17	0,6	1,7	1,0	0,6	0,5
goethita	7,8	5,6	3,1	2,2	2,6	8,1	16	19	11	5,8
goethita-monazita										6,4
quartzo	0,3	6,3	0,4	1,5	0,2	1,9	0,9		3,1	13
quartzo-monazita	<0,1	0,5								
Al-fosfatos	8,4	8,1	6,4	8,3	3,5	4,4	4,3	0,3	3,5	2,4
apatita	0,1	0,1				0,1	0,2		0,1	1,7
gibbsita-caulinita	0,4	0,1	2,3	0,3	1,4	0,5	0,3	2,6		
mica	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,2			6,2		
ilmenita	0,5	0,6	0,1	0,1	<0,1	3,5	1,9	0,4	1,0	0,9
Ti-óxidos	1,1	1,5	<0,1	0,4	<0,1	20	12	2,2	7,3	0,7
perovskita						0,4				
Mn-óxidos	1,7	1,4	7,5	7,3	8,4	5,2	1,6	5,9	2,8	0,9
outros	1,0	0,9	0,8	0,3	0,1		0,5	0,6	0,2	0,4
Mistos em outras										
Fe-óxidos	2,1	1,7	7,8	3,7	9,8	1,7	1,3	1,1	0,7	0,4
goethita	4,0	4,7	4,9	1,6	4,2	2,9	2,8	7,4	3,5	3,2
goethita-monazita										2,6
quartzo	0,3	4,4	0,2	0,3	0,1	1,8	0,1		0,5	2,2
quartzo-monazita	<0,1	1,3								
Al-fosfatos	3,1	2,7	3,6	2,9	2,8	2,7	2,8	0,4	2,9	1,6
apatita	0,1	<0,1				0,1	0,3		<0,1	0,4
gibbsita-caulinita	0,2	0,1	3,5	0,1	2,2	1,4	0,1	2,6		
mica	<0,1	<0,1	0,1	0,1	0,1			4,4		
ilmenita	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	2,9	2,2	0,5	1,2	0,5
Ti-óxidos	1,0	0,9	0,2	0,1	0,1	6,9	5,0	1,5	2,0	0,3
perovskita	<0,1					0,9	0,1			
Mn-óxidos	1,1	1,0	2,8	2,7	5,2	1,6	1,2	2,9	1,2	0,3
outros	1,0	0,5	0,4	0,2	0,1	<0,1	0,7	0,3	1,0	0,2

Obs: Na amostra C1, * = fração +0,125 mm e ** = fração -0,125+0,074 mm.

Figura 21 – Formas de associação dos minerais de ETR nas amostras do depósito A (monazita e, secundariamente, cerianita).

Figura 22 – Formas de associação dos minerais de ETR nas amostras do depósito A (monazita e, secundariamente, cerianita) (continuação da Figura 21).

Monazita (% massa) - Fração -0,30+0,15 mm

Imagens BSE – fase quartzo-monazita (intercrescimentos) na amostra A2

- monazita
- apatita
- ilmenita
- quartzo
- mica
- cerianita
- Fe-óxidos
- Ti-óxidos
- gibbsita-caulinita
- perovskita
- Al-fosfatos
- goethita
- Mn-óxidos
- outros
- quartzo-monazita

Figura 23 – Formas de associação dos minerais de ETR nas amostras do depósito B (essencialmente monazita).

Figura 24 – Formas de associação dos minerais de ETR nas amostras do depósito C (bastnaesita, cerianita e, secundariamente, monazita).

Figura 25 – Formas de associação dos minerais de ETR nas amostras do depósito D (essencialmente monazita).

A distribuição da liberação da somatória dos minerais de ETR segundo a sua fração em área (em relação à área total das partículas) ou em perímetro exposto (parcela dos minerais exposta no perímetro das partículas), está apresentada na Figura 26 e na Figura 27. Considerando o total das amostras acima de 0,008 mm, a liberação em perímetro se mostra discretamente inferior à liberação em área, indicando uma tendência de minerais de ganga ocorrerem nas bordas das partículas mistas.

Figura 26 – Curvas de liberação dos minerais de ETR em área (linhas cheias) e em perímetro exposto (linhas tracejadas) e recuperação acumulada de OTR, considerando o total acima de 0,008 mm das amostras dos depósitos A e B.

Figura 27 – Curvas de liberação dos minerais de ETR em área (linhas cheias) e em perímetro exposto (linhas tracejadas) e recuperação acumulada de OTR, considerando o total acima de 0,008 mm das amostras dos depósitos C e D.

Nas mesmas figuras são apresentadas também curvas calculadas do potencial de recuperação do teor de OTR contido nas amostras. Esses dados são teóricos e baseados unicamente na partição das terras raras junto aos minerais típicos e em suas características de associação e liberação (imagens em 2D).

Os resultados indicam a possibilidade de obtenção de produtos com teor de 40% de OTR, recuperando 95% dos OTR contidos na forma de minerais de terras raras (minerais úteis), em média, nas amostras do depósito A. Isso representa valores máximos de recuperação entre 60 e 76% do total de OTR das mesmas

(destacados em vermelho na Figura 26), de acordo com os resultados de partição apresentados anteriormente no item 4.1.5.

No caso das amostras do depósito B, os resultados indicam a possibilidade de obtenção de produtos com teor de 40% de OTR, recuperando 63% dos OTR contidos na forma de minerais de terras raras na amostra B1 e 75% na B2, embora isso represente valores máximos de recuperação de apenas 25 e 35% do total de OTR das mesmas, respectivamente.

Na amostra do depósito C, um potencial produto com teor da ordem de 40% de OTR pode ser obtido, recuperando 93% dos OTR contidos na forma de minerais de terras raras, o que representa um valor máximo de recuperação de 80% do total de OTR contido na amostra (destaque em vermelho na Figura 27).

Nas amostras do depósito D, os resultados indicam a possibilidade de obtenção de produtos com teor de 40% de OTR, recuperando 87% dos OTR contidos na forma de minerais úteis (desconsiderando a fase goethita-monazita), o que representa um valor máximo de recuperação de 61% do total de OTR contido na amostra D1 e 83% do total contido na D2.

4.2 Comportamento dos minerais em separações físicas

O comportamento dos minerais frente a procedimentos físicos de separação foi verificado considerando-se ensaios de atrição de amostras bulk e procedimentos de separações minerais rotineiramente empregados em estudos de caracterização (líquidos densos e separações magnéticas) efetuados por fração granulométrica (acima de 0,020 ou 0,037 mm).

4.2.1 Ensaios de atrição

Os ensaios de atrição foram efetuados para as amostras A1, A5, B1, B2, C1 e D1 visando a avaliação da possibilidade de desagregação seletiva e enriquecimento dos OTR junto aos finos. Os resultados da classificação granulométrica das amostras atricionadas estão sumariados na Tabela 12, com a respectiva distribuição de massa e teor de OTR por fração, considerando-se separadamente os finos naturais daqueles gerados após a atrição. Os resultados completos, com os demais óxidos dosados, estão no Apêndice E.

Apesar do discreto aumento da proporção em massa, os teores dos finos gerados com tempo de atrição de 10 minutos são da mesma ordem de grandeza ou até um pouco inferiores aos finos naturais. Na amostra B1, por exemplo, os teores de OTR nos produtos finos gerados variam entre 1,92 e 2,13%, enquanto nos finos naturais estão compreendidos entre 2,02 e 2,05%. Considerando a distribuição desses teores nas frações, o enriquecimento no produto total abaixo de 0,020 mm, promovido pela atrição, é de 14% em relação à amostra B1 bulk (preferencialmente abaixo de 0,008 mm, corte estimado no primeiro ciclone), variando de 2 a 12% nas demais amostras ensaiadas.

Curvas de distribuição acumuladas de massa e teor de OTR nas frações são apresentadas na Figura 28.

Tabela 12 – Sumário dos resultados de distribuição mássica e de teor de OTR por fração granulométrica para as amostras atricionadas (A1, A5, B1, B2, C1 e D1).

%	Fração /Amostras	A1	A5	B1	B2	C1	D1
Massa retida	+0,60 mm	10,1	4,5*	19,6	13,3	13,1*	16,9
	-0,60+0,30 mm	9,1	7,8**	17,7	13,9	10,9**	7,2
	-0,30+0,15 mm	8,8	3,9	13,9	13,6	9,0	9,6
	-0,15+0,074 mm	10,5	4,9	9,6	11,2		12,3
	-0,074+0,037 mm	10,8	6,1	6,9	9,1	11,8	12,8
	-0,037+0,020 mm	8,8	6,7	4,5	6,1		9,3
	Underflow1	16,4	19,9	6,8	9,0	15,9	13,8
	Underflow2 natural	3,7	5,5	2,7	4,0	6,1	3,5
	Underflow2 da atrição	2,8	3,0	1,5	1,7	4,0	1,4
	Overflow natural	10,5	29,6	11,7	14,6	23,9	10,2
	Overflow da atrição	8,4	8,1	4,9	3,5	5,2	3,0
Teor OTR	+0,60	1,18	3,11*	0,97	1,08	4,91*	1,52
	-0,60+0,30	1,37	2,50**	0,94	0,98	5,50**	1,81
	-0,30+0,15 mm	1,41	2,99	0,92	1,01	5,95	1,68
	-0,15+0,074 mm	1,65	2,81	0,93	1,15		1,73
	-0,074+0,037 mm	2,10	2,88	0,94	1,46	4,71	2,07
	-0,037+0,020 mm	2,65	2,48	1,11	1,77		2,61
	Underflow1	3,87	2,30	1,69	2,43	3,18	5,20
	Underflow2 natural	4,16	1,96	2,02	2,69	1,83	7,84
	Underflow2 da atrição	4,30	1,81	1,92	2,77	1,91	6,62
	Overflow natural	4,05	2,06	2,05	2,33	1,89	11,1
	Overflow da atrição	4,15	1,81	2,13	2,54	2,21	10,5
Distrib. OTR	+0,60	4,4	6,0*	15,5	9,0	17,9*	6,7
	-0,60+0,30	4,7	8,4**	13,6	8,5	16,6**	3,4
	-0,30+0,15 mm	4,6	5,1	10,4	8,7	14,9	4,3
	-0,15+0,074 mm	6,5	6,0	7,2	8,1		5,6
	-0,074+0,037 mm	8,5	7,6	5,3	8,4	15,5	7,0
	-0,037+0,020 mm	8,7	7,2	4,1	6,8		6,4
	Underflow1	23,6	19,8	9,4	13,8	14,1	18,9
	Underflow2 natural	5,7	4,6	4,5	6,7	3,1	7,3
	Underflow2 da atrição	4,5	2,4	2,3	2,9	2,1	2,4
	Overflow natural	15,8	26,4	19,4	21,4	12,6	29,8
	Overflow da atrição	12,9	6,4	8,4	5,6	3,2	8,2
Sumário Total -0,020 mm	Antes da atrição (bulk)						
	Massa (%)	39,8	64,2	21,8	28,8	50,7	27,6
	Teor OTR (%)	3,95	2,33	2,00	2,49	2,67	8,17
	Distrib. OTR (%)	59,7	58,3	35,5	45,3	33,4	59,6
	Após atrição (10 minutos)						
	Massa (%)	41,8	66,1	27,6	32,8	55,1	31,9
	Teor OTR (%)	4,02	2,08	1,97	2,45	2,29	7,92
	Distrib. OTR (%)	62,7	59,7	44,0	50,5	35,0	66,6
	Enriquecimento OTR						
		5%	2%	14%	9%	5%	12%

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX. Nas amostras A5 e C1, * = fração +1,19 mm e ** = fração -1,19+0,30 mm.

Figura 28 – Distribuições acumuladas de massa e de OTR nas frações granulométricas, considerando as amostras bulk e após atrição.

4.2.2 Separações em líquidos densos e magnéticas

O sumário dos resultados das separações em líquidos densos e magnéticas, efetuadas para as frações acima de 0,020 mm ou 0,037 mm das amostras, considerando-se produtos compostos para critério de comparação, está apresentado na Tabela 13 a Tabela 17 comparativamente com resultados químicos dos produtos finos. Os resultados completos estão no Apêndice E.

Nas amostras A1 e A2, o intervalo -0,30+0,020 mm representa cerca de 56-57% em massa das mesmas e 35-36% do total de OTR. Na primeira, o **produto afundado em 3,3 g/cm³ e não magnético no Tubo Davis** corresponde a 57,3% em massa no ensaio (32,1% em relação à amostra) e tem teor médio de OTR de 2,30% (**76,9%** do total contido no ensaio; 27,0% em relação à amostra). Na amostra A2, o mesmo produto corresponde a 50,6% em massa no ensaio (28,7% em relação à amostra) e tem teor médio de OTR de 3,43% (75,0% do total contido no ensaio; 27,1% em relação à amostra). Em ambas as amostras, para as frações granulométricas abaixo de 0,074 mm, a distribuição de OTR neste produto é elevada a valores superiores a 80% (no ensaio), estando preferencialmente concentrados em um **produto magnético em separador Frantz** (-0,00+0,20A).

Apesar da notória distribuição dos OTR em determinados produtos das separações minerais, os teores de OTR não são enriquecidos. Além do baixo grau de liberação dos minerais de terras raras neste intervalo granulométrico (em média de 41% na amostra A1 e de 35% na A2; resultados obtidos pelo MLA e apresentados no item 4.1.6), alguns dos minerais de ganga mostram comportamento semelhante a eles e tendem a concentrar-se nos mesmos produtos (goethita, alumino-fosfatos, hematita e anatásio, conforme difratogramas da Figura 29), justificando os elevados teores de Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅ e BaO associados.

Nas amostras A3, A4 e A5, o intervalo -0,30+0,037 mm representa cerca de 24-28% em massa das mesmas e entre 15 e 29% do total de OTR. Especificamente nas amostras A3 e A5, apesar do baixo grau de liberação dos minerais de terras raras (18-20%), teores de OTR com relações de enriquecimento de 2 a 5 vezes são alcançados no **produto não magnético em separador Frantz** (-0,15A) das frações, mas que representa baixa distribuição nos ensaios e nas amostras.

Tabela 13 – Sumário dos resultados das separações minerais efetuadas nas amostras A1, A2 e A4 (tipos mineralógicos similares do depósito A).

Fração (mm) / Produtos	% Massa retida	Teores (%)							Distribuição na amostra (%)						
		OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
Amostra A1															
Alimentação -0,30 mm	100,0	2,18	4,90	49,2	7,86	8,23	6,72	4,49	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo -0,30+0,020 mm															
FL 2,95	3,2	0,51	71,8	8,65	6,64	1,02	2,06	0,81	0,6	52,5	0,5	2,7	0,4	0,9	0,6
INT 2,95-3,30	5,3	1,72	3,62	15,8	20,3	2,57	21,6	11,2	3,3	4,1	1,6	13,5	1,7	16,5	13,6
MAG T.Davis 1,0A	15,4	0,74	0,41	83,2	2,82	6,04	1,61	0,77	4,1	1,5	24,8	5,4	11,6	3,6	2,7
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	29,1	2,27	1,42	47,8	7,84	13,6	7,59	5,07	24,3	9,0	26,9	28,7	49,5	32,0	33,8
AF 3,30 ÑMAG Frantz 0,20A	3,0	2,51	1,60	12,0	6,89	20,0	8,82	21,6	2,7	1,1	0,7	2,6	7,5	3,8	14,7
*GL Min-TR (MLA) = 41%															
Finos -0,020 mm															
Underflow1	19,9	3,74	3,62	46,3	9,39	7,43	8,20	4,96	27,4	14,3	18,2	23,6	18,8	23,7	22,7
Overflow natural	23,0	4,28	3,68	57,4	7,61	3,38	5,56	2,10	36,2	16,7	26,0	22,1	9,9	18,5	11,1
Overflow da moagem	1,1	3,22	3,45	53,5	9,87	4,78	6,45	3,32	1,3	0,8	1,2	1,4	0,7	1,0	0,9
Amostra A2															
Alimentação -0,30 mm	100,0	3,02	20,8	31,1	8,46	9,22	8,17	4,68	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo -0,30+0,020 mm															
FL 2,95	14,8	0,76	82,2	6,88	2,91	0,77	1,18	0,52	3,1	61,9	3,2	4,9	1,3	2,1	1,7
INT 2,95-3,30	9,0	2,23	11,1	11,3	18,5	3,12	21,0	10,4	5,6	5,1	3,2	19,1	3,1	22,3	20,4
MAG T.Davis 1,0A	4,2	0,35	0,87	85,3	1,44	6,29	0,99	0,49	0,4	0,2	11,1	0,7	2,9	0,5	0,4
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	23,1	3,38	2,03	42,4	7,88	15,9	8,43	5,26	21,4	2,4	30,7	20,8	40,5	22,8	26,3
AF 3,30 ÑMAG Frantz 0,20A	5,6	3,62	3,04	6,96	11,3	33,4	12,8	11,0	5,6	0,9	1,2	7,2	20,5	8,4	13,4
*GL Min-TR (MLA) = 35%															
Finos -0,020 mm															
Underflow1	20,4	4,95	16,5	31,3	9,52	8,29	9,33	4,83	27,4	16,6	20,2	22,3	18,6	22,3	21,2
Overflow natural	20,9	6,00	11,1	42,1	9,31	5,16	8,13	3,32	34,0	11,4	27,9	22,3	11,8	19,9	15,0
Overflow da moagem	2,0	4,43	16,2	36,9	11,4	5,69	7,71	3,72	2,5	1,6	2,4	2,7	1,3	1,8	1,6
Amostra A4															
Alimentação (bulk)	100,0	3,91	11,6	37,3	12,5	3,73	8,27	5,22	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo +1,19 mm	7,0	1,68	9,00	37,8	14,1	1,89	11,8	8,31	2,9	5,9	6,8	8,0	3,7	10,1	11,5
Intervalo -1,19+0,037 mm															
FL 2,95	3,5	0,72	64,4	7,80	9,97	0,94	4,23	2,64	0,5	21,8	0,8	2,8	0,8	1,8	1,8
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	14,3	2,09	2,18	60,3	5,78	3,32	5,22	3,70	5,9	3,1	23,5	6,6	12,0	8,6	10,2
AF 2,95 ÑMAG Frantz 0,15A	10,1	4,10	4,28	14,8	19,6	8,49	17,7	12,0	8,3	4,2	4,1	15,9	21,7	20,8	23,3
*GL Min-TR (MLA) = 27%															
Intervalo -0,037+0,020 mm	6,4	3,90	14,2	28,2	12,6	6,27	10,5	7,10	6,2	8,4	4,6	6,5	11,0	8,2	8,9
Finos -0,020 mm															
Underflow1	19,7	5,22	9,94	33,7	12,8	3,96	10,2	6,37	25,7	18,2	17,0	20,6	21,6	24,7	24,8
Overflow	39,0	5,18	10,6	43,2	12,4	2,71	5,38	2,55	50,5	38,4	43,2	39,5	29,2	25,7	19,6

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX. *GL Min-TR = grau de liberação dos minerais de terras raras para o intervalo granulométrico considerado (obtido pelo MLA).

Tabela 14 – Sumário dos resultados das separações minerais efetuadas nas amostras A3 e A5 (tipos mineralógicos similares do depósito A).

Fração (mm) / Produtos	% Massa retida	Teores (%)							Distribuição na amostra (%)						
		OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
Amostra A3															
Alimentação (bulk)	100,0	1,33	37,3	20,4	22,2	2,30	2,34	1,30	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo +1,19 mm	3,7	1,37	18,7	52,2	9,65	1,25	2,68	1,49	3,9	1,9	9,2	1,6	2,0	4,1	4,0
Intervalo -1,19+0,037 mm															
FL 2,95	16,6	...	76,2	5,99	9,82	0,64	0,66	0,31	1,3	35,7	4,6	7,5	4,7	4,8	4,1
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	6,5	1,89	4,02	63,0	6,35	3,30	3,07	2,08	9,2	0,7	18,7	1,9	9,4	8,5	10,5
AF 2,95 ÑMAG Frantz 0,15A	1,8	4,82	6,43	20,3	18,6	9,09	12,4	7,94	6,6	0,3	1,7	1,6	7,2	9,5	11,0
*GL Min-TR (MLA) = 18%															
Intervalo -0,037+0,020 mm	7,2	1,11	47,3	14,8	17,5	2,84	2,59	1,74	6,2	9,3	5,1	5,8	8,9	7,8	9,2
Finos -0,020 mm															
Underflow1	17,3	1,56	30,6	18,8	25,1	3,35	3,35	2,15	20,8	14,5	15,6	19,8	25,3	24,3	27,4
Overflow	47,1	1,43	29,0	19,8	28,6	2,06	2,07	0,97	52,0	37,5	45,0	61,8	42,4	40,9	33,7
Amostra A5															
Alimentação (bulk)	100,0	2,52	23,7	25,7	23,7	2,90	3,32	2,17	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo +1,19 mm	4,8	3,41	14,7	36,2	15,6	2,31	5,69	4,13	6,5	3,0	6,6	3,3	3,8	7,9	8,8
Intervalo -1,19+0,037 mm															
FL 2,95	9,3	0,63	47,6	11,0	21,2	1,73	2,16	1,43	2,4	19,2	3,9	9,0	5,7	5,9	6,0
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	11,2	3,39	3,90	55,4	7,18	3,41	3,54	2,83	15,4	1,9	23,4	3,7	13,5	11,6	14,2
AF 2,95 ÑMAG Frantz 0,15A	3,8	7,18	6,11	17,0	18,3	7,99	14,4	10,7	11,0	1,0	2,4	3,2	10,8	16,1	18,1
*GL Min-TR (MLA) = 20%															
Intervalo -0,037+0,020 mm	6,6	2,55	21,5	25,0	21,3	4,16	4,99	3,63	6,7	6,1	6,2	6,2	9,4	9,5	10,6
Finos -0,020 mm															
Underflow1	17,3	2,56	21,4	25,1	23,7	3,78	4,60	3,18	17,5	15,9	16,4	18,0	22,3	22,9	24,3
Overflow	46,9	2,24	26,2	23,1	27,4	2,17	1,93	0,87	41,7	52,9	41,1	56,6	34,6	26,1	18,0

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX. *GL Min-TR = grau de liberação dos minerais de terras raras para o intervalo granulométrico considerado (obtido pelo MLA). ... = impossibilidade de cálculo.

Nas amostras B1 e B2, o intervalo -0,30+0,020 mm representa, respectivamente, 72 e 65% em massa das mesmas e 55 e 46% do total de OTR. Na primeira, o **produto afundado em 3,3 g/cm³ e não magnético no Tubo Davis** corresponde a 46,6% em massa no ensaio (33,5% em relação à amostra) e tem teor médio de OTR de 1,67% (84,1% do total contido no ensaio; 46,5% em relação à amostra). Na amostra B2, o mesmo produto corresponde a 46,4% em massa no ensaio (30,2% em relação à amostra) e também tem teor médio de OTR de 1,67% (70,2% do total contido no ensaio; 32,3% em relação à amostra).

Tabela 15 – Sumário dos resultados das separações minerais efetuadas nas amostras B1 e B2.

Fração (mm) / Produtos	% Massa retida	Teores (%)							Distribuição na amostra (%)						
		OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅
Amostra B1															
Alimentação -0,30 mm	100,0	1,14	15,6	35,8	3,54	4,71	30,3	1,36	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo -0,30+0,020 mm															
FL 2,95	12,7	<0,10	80,0	9,23	2,03	0,27	2,84	0,41	0,0	67,2	3,3	6,8	0,8	1,2	3,3
INT 2,95-3,30	5,2	1,42	7,50	21,6	9,40	3,16	38,1	5,45	6,1	2,6	3,2	13,2	3,9	6,4	17,6
MAG T.Davis 1,0A	20,4	0,16	...	79,0	0,44	1,47	14,1	0,25	2,7	0,4	45,3	2,5	7,0	9,3	3,3
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	18,0	1,26	1,25	34,4	1,97	3,78	47,4	1,40	18,7	1,5	17,5	9,4	16,0	27,8	15,6
AF 3,30 ÑMAG Frantz 0,20A	15,5	2,15	...	3,41	0,81	18,0	70,0	1,12	27,8	0,2	1,5	3,5	64,9	35,1	11,0
*GL Min-TR (MLA) = 13%															
Finos -0,020 mm															
Underflow1	11,2	1,76	15,7	34,0	5,38	1,58	28,8	2,43	15,5	11,6	10,5	16,0	4,1	10,7	17,8
Overflow natural	15,8	2,18	14,7	41,6	11,4	0,67	15,0	2,87	27,0	15,3	18,0	47,6	2,5	7,8	29,6
Overflow da moagem	1,2	2,28	15,2	22,3	3,42	2,69	44,9	2,33	2,1	1,2	0,7	1,1	0,7	1,8	1,8
Amostra B2															
Alimentação -0,30 mm	100,0	1,44	6,30	44,2	4,62	2,35	25,3	4,32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo -0,30+0,020 mm															
FL 2,95	4,3	0,23	62,1	8,25	10,1	0,74	5,24	1,84	0,6	44,4	0,8	8,4	1,4	0,9	1,7
INT 2,95-3,30	7,3	2,56	1,95	9,15	9,48	14,5	28,9	18,7	12,1	2,4	1,5	13,2	47,5	8,3	28,9
MAG T.Davis 1,0A	23,2	...	<0,10	83,4	0,50	0,22	10,4	0,42	1,0	0,0	44,8	2,1	2,2	9,4	2,1
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	22,1	1,15	...	36,6	1,76	0,81	44,4	2,22	16,2	0,3	18,7	7,4	8,0	38,7	10,4
AF 3,30 ÑMAG Frantz 0,20A	8,1	3,11	...	5,20	2,15	3,13	73,4	3,95	16,1	0,0	1,0	3,2	11,2	23,1	6,7
*GL Min-TR (MLA) = 33%															
Finos -0,020 mm															
Underflow1	13,5	2,38	9,92	39,7	6,98	2,12	18,8	6,60	20,3	23,6	11,9	19,7	13,1	10,1	19,6
Overflow natural	20,8	2,50	7,94	45,4	10,5	1,68	10,2	6,60	32,8	29,1	21,0	45,6	16,0	8,5	30,1
Overflow da moagem	0,5	2,79	2,07	28,4	3,99	2,52	44,6	5,03	0,9	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	0,6

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX. *GL Min-TR = grau de liberação dos minerais de terras raras para o intervalo granulométrico considerado (obtido pelo MLA). Para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de OTR e SiO₂ <0,10% igual zero para determinados produtos/frações. ... = impossibilidade de cálculo.

Apesar da notória distribuição dos OTR em determinados produtos das separações minerais, os teores de OTR não são enriquecidos. Além do baixo grau de liberação dos minerais de terras raras neste intervalo granulométrico (em média de 13% na amostra B1 e de 33% na B2), parte dos minerais de ganga mostra comportamento semelhante aos minerais de terras raras e tende a concentrar-se nos mesmos produtos (preferencialmente, perovskita e anatásio), justificando os elevados teores de CaO e TiO₂ associados.

Tabela 16 – Sumário dos resultados das separações minerais efetuadas para a amostra C1.

Fração (mm) / Produtos	% Massa retida	Teores (%)						Distribuição na amostra (%)					
		OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂
Alimentação (bulk)	100,0	4,10	24,0	26,6	24,1	2,60	2,53	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo +0,020 mm													
FL 3,30	11,1	0,79	26,9	6,41	43,1	3,28	0,82	2,2	13,2	2,7	19,8	14,7	3,5
MAG T.Davis 1,5A	9,0	1,34	0,39	85,9	1,19	...	5,18	3,0	0,2	28,9	0,4	0,2	17,9
AF 3,30 MAG Frantz 0,10A	15,9	5,25	3,67	61,0	4,76	0,91	4,69	20,7	2,6	36,5	3,2	5,9	28,9
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	3,4	19,4	5,05	26,9	6,16	1,64	7,54	16,6	0,8	3,4	0,9	2,3	9,9
AF 3,30 ÑMAG Frantz 0,20A	1,5	30,7	8,36	6,96	4,30	0,65	16,4	11,7	0,6	0,4	0,3	0,4	9,6
*GL Min-TR (MLA) = 31%													
Finos -0,020 mm													
Underflow1	25,2	3,86	29,3	17,0	28,7	3,42	2,05	24,3	30,9	16,4	29,9	33,7	20,6
Overflow	33,9	2,55	36,5	8,92	32,6	3,24	0,70	21,6	51,8	11,6	45,6	42,9	9,5

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX. *GL Min-TR = grau de liberação dos minerais de terras raras para o intervalo granulométrico considerado (obtido pelo MLA). Para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de K₂O <0,10% igual zero para determinados produtos/ frações. ... = impossibilidade de cálculo.

Na amostra C1, o intervalo acima de 0,020 mm representa cerca de 41% em massa e 54% do total de OTR. O **produto afundado em 3,3 g/cm³ e não magnético no Tubo Davis** corresponde a 51,0% em massa no ensaio (20,9% em relação à amostra) e tem teor médio de OTR de 9,43% (90,5% do total contido no ensaio; 49,0% em relação à amostra). Um teor médio de 22,9% de OTR é alcançado especificamente no **produto não magnético em separador Frantz (-0,10A)** (52,0% do total contido no ensaio; 28,2% em relação à amostra), variando entre 20,7 e 27,5% nas frações granulométricas.

Apesar do baixo grau de liberação dos minerais de terras raras neste intervalo granulométrico (em média de 31%), os resultados indicaram possibilidades de obtenção de produtos com enriquecimento significativo em OTR através de separações físicas (relações de enriquecimento de 5 a 7 vezes em determinados produtos), mas com baixa representatividade mássica na amostra.

Na amostra D1, o intervalo -0,30+0,020 mm representa cerca de 68% em massa e 35% do total de OTR; o **produto afundado em 3,3 g/cm³ e não magnético no Tubo Davis** corresponde a 50,8% em massa no ensaio (34,3% em relação à amostra) e tem teor médio de OTR de 3,34% (**90,6%** do total contido no ensaio; 31,6% em relação à amostra). Na amostra D2, o intervalo -1,19+0,020 mm representa cerca de 42% em massa e 22% do total de OTR; o **produto afundado em 2,95 g/cm³ e não magnético em Frantz (-0,00A)** corresponde a 62,9% em

massa no ensaio (26,3% em relação à amostra) e tem teor médio de OTR de 4,79% (83,6% do total contido no ensaio; 18,1% em relação à amostra).

Tabela 17 – Sumário dos resultados das separações minerais efetuadas nas amostras D1 e D2.

Fração (mm) / Produtos	% Massa retida	Teores (%)							Distribuição na amostra (%)						
		OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅
Amostra D1															
Alimentação -0,30 mm	100,0	3,90	15,2	43,4	3,32	2,69	12,7	6,96	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo -0,30+0,020 mm															
FL 2,95	10,3	0,18	91,1	4,75	0,26	0,26	0,39	0,72	0,5	65,8	1,1	0,7	1,0	0,3	1,1
INT 2,95-3,30	6,7	1,01	7,33	8,56	13,0	21,4	2,10	28,3	1,9	3,5	1,3	24,8	55,0	1,1	27,5
MAG T.Davis 1,0A	16,3	0,20	...	84,5	...	0,11	11,2	0,42	0,9	0,0	30,6	0,1	0,7	14,4	1,0
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	29,2	2,89	1,24	48,2	4,00	1,12	23,2	5,77	23,0	2,6	31,7	32,9	12,5	52,4	24,5
AF 3,30 ÑMAG Frantz 0,20A	5,1	5,93	2,38	13,0	5,01	5,82	37,8	11,1	8,6	0,9	1,5	7,3	11,4	15,1	8,2
*GL Min-TR (MLA) = 36%															
Finos -0,020 mm															
Underflow1	14,6	5,72	18,0	38,0	5,01	1,62	9,45	8,39	21,2	17,4	12,5	20,9	9,5	11,0	18,1
Overflow natural	16,3	9,90	8,20	53,4	2,49	1,34	3,10	7,49	41,0	8,9	19,6	11,6	8,8	4,0	18,0
Overflow da moagem	1,6	6,95	8,42	45,5	3,40	1,81	14,0	6,82	2,8	0,9	1,6	1,5	1,2	1,8	1,6
MAG WHIMS 10A	9,0	6,72	9,06	50,8	3,69	1,46	7,55	7,17	16,3	5,3	10,3	9,0	4,5	5,9	9,7
ÑMAG WHIMS 10A	23,4	7,75	14,4	44,4	3,95	1,86	5,38	7,98	48,7	21,9	23,5	25,1	15,0	10,9	28,0
MAG WHIMS 10A (calcinada)	21,1	7,36	9,22	49,9	4,64	1,96	7,07	7,79	39,5	12,9	23,8	28,0	16,7	11,9	24,3
ÑMAG WHIMS 10A (calcinada)	11,4	8,84	18,9	39,0	1,86	0,61	5,39	7,99	25,5	14,3	10,0	6,0	2,8	4,9	13,4
Amostra D2															
Alimentação (topsize 6,35 mm)	100,0	6,48	23,5	31,9	13,8	0,21	3,02	4,30	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Intervalo -6,35+1,19 mm	30,9	3,02	40,4	31,8	1,11	4,65	5,37	6,16	13,9	54,4	29,4	14,1	26,3	21,6	19,9
Intervalo -1,19+0,020 mm															
FL 2,95	9,3	2,04	79,4	7,13	1,12	1,52	0,88	2,86	2,7	32,3	1,9	3,9	2,6	1,1	2,8
AF 2,95 MAG Frantz 0,0A	6,2	0,91	2,04	74,5	0,76	0,89	13,6	1,58	0,8	0,5	13,3	1,8	1,0	10,8	1,0
AF 2,95 MAG Frantz 0,20A	13,4	3,11	2,89	46,8	3,63	2,00	21,6	6,15	6,1	1,7	18,2	19,2	4,8	37,0	8,6
AF 2,95 ÑMAG Frantz 0,20A	12,9	6,53	6,43	11,5	5,50	21,7	8,34	24,6	12,1	3,6	4,3	27,1	50,7	13,9	33,2
*GL Min-TR (MLA) = ? (<39%)															
Finos -0,020 mm															
Underflow1	13,2	14,2	7,47	36,9	3,59	3,25	6,10	12,3	27,9	4,3	14,5	19,4	7,8	10,4	16,9
Overflow	14,1	17,1	5,07	43,3	2,53	2,56	2,84	11,9	36,1	3,1	18,3	14,6	6,6	5,2	17,5

Obs: OTR = somatória de La₂O₃, CeO₂, Pr₆O₁₁ e Nd₂O₃ determinados por FRX. *GL Min-TR = grau de liberação dos minerais de terras raras para o intervalo granulométrico considerado (obtido pelo MLA). Para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de SiO₂ <0,10% igual zero para determinados produtos/ frações. ... = impossibilidade de cálculo.

Em ambas as amostras, apesar da notória distribuição dos OTR em determinados produtos das separações minerais, os teores de OTR não denotam enriquecimento expressivo. Além do baixo grau de liberação dos minerais de terras raras, parte dos minerais de ganga mostra comportamento semelhante a eles e tende a concentrar-se nos mesmos produtos (goethita, hematita, anatásio, alumino-

fosfato, calzirtita), justificando os elevados teores de Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 e CaO associados.

Figura 29 - Difratogramas de produtos das separações minerais, nos quais concentram-se minerais de terras raras.

De maneira geral, a separação magnética em Tubo Davis (efetuada para as amostras A1, A2, B1, B2, C1, D1) promove a separação de um produto acima de 0,020 mm enriquecido em Fe_2O_3 (teor superior a 79%, representando entre 30 e 45% do total contido na maior parte das amostras), ao mesmo tempo que carrega pouco OTR. Em comportamento relativamente semelhante, a separação densitária (em 2,95 ou 3,30 g/cm^3) promove a separação de teores de SiO_2 .

Separações magnéticas dos finos abaixo de 0,020 mm foram efetuadas unicamente para a amostra D1 (representam 32,4% em massa da amostra e 65% do total de OTR contido na mesma) e também não possibilitaram a obtenção de produtos enriquecidos em teores de OTR. O **produto não magnético no WHIMS** (-10A) corresponde a 72,2% em massa no ensaio (23,4% em relação à amostra) e tem teor de OTR de 7,75% (75,0% do total contido no ensaio; 48,7% em relação à amostra). Permanece associado a este produto um teor de 44,4% de Fe_2O_3 (69,4% do total contido no ensaio; 23,5% em relação à amostra). A calcinação prévia do material (temperatura de 450°C por 2h) promove essencialmente a conversão mássica e da distribuição de teores de OTR, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , TiO_2 para o produto magnético (monazita fina, preferencialmente associada com a goethita, antes e após sua oxidação pela calcinação).

4.3 Comportamento dos minerais na lixiviação seletiva ácida

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação sulfúrica efetuados unicamente para a amostra D2 (a mais enriquecida dentre as estudadas) que visaram o entendimento das condições adequadas à solubilização seletiva dos minerais portadores de ETR e das possíveis recuperações desses elementos (somente na etapa de dissolução do minério no processo hidrometalúrgico).

4.3.1 Composição química dos resíduos dos ensaios de lixiviação

A matriz experimental com as respostas obtidas, considerando-se os teores dos principais óxidos de interesse determinados por FRX nos resíduos sólidos das lixiviações, está apresentada na Tabela 18. No Apêndice F encontram-se os resultados obtidos para as lixívias por ICP (não avaliados estatisticamente), bem como sua representatividade mássica nas lixiviações.

Tabela 18 – Matriz experimental e principais respostas obtidas (teores químicos) para os resíduos sólidos.

Ensaio [*]	Variáveis em unidades reais				Teores dos resíduos (%; FRX)							
	C (%)	S (%)	T (°C)	t (h)	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	BaO
1 ¹⁵	20	10	25	0,5	1,35	3,00	1,10	24,9	35,9	2,59	8,77	1,88
2 ¹⁷	98	10	25	0,5	0,51	1,47	0,54	27,6	39,5	2,97	9,53	2,09
3 ¹⁶	20	40	25	0,5	1,41	3,09	1,14	25,1	36,1	2,66	8,70	1,95
4 ¹⁸	98	40	25	0,5	0,59	1,61	0,59	25,8	36,7	2,83	8,69	1,94
5 ⁹	20	10	70	0,5	1,30	2,89	1,04	25,4	36,0	2,82	8,63	1,93
6 ⁴	98	10	70	0,5	0,51	1,48	0,51	29,9	37,8	2,77	10,0	2,12
7 ⁸	20	40	70	0,5	1,40	3,15	1,14	26,2	36,0	2,98	8,59	1,90
8 ⁷	98	40	70	0,5	0,45	1,30	0,45	28,6	37,7	2,75	9,79	2,16
9 ¹	20	10	25	4	1,29	2,95	1,09	27,0	35,1	2,66	8,43	1,84
10 ⁵	98	10	25	4	0,29	1,07	0,39	28,8	40,0	3,08	9,94	2,22
11 ¹²	20	40	25	4	1,37	3,05	1,11	24,9	35,9	2,56	8,61	1,84
12 ¹³	98	40	25	4	0,50	1,47	0,53	26,9	38,9	2,87	9,33	2,15
13 ¹⁹	20	10	70	4	1,41	3,07	1,11	26,8	34,5	1,86	9,18	2,01
14 ¹⁴	98	10	70	4	0,40	1,23	0,41	34,1	37,9	1,94	11,6	2,29
15 ¹¹	20	40	70	4	1,48	3,19	1,15	26,1	34,8	1,75	8,98	1,96
16 ¹⁰	98	40	70	4	0,60	1,53	0,52	32,5	34,9	1,22	10,9	2,12
17 ²	59	25	47,5	2,3	0,82	2,01	0,72	28,4	36,7	2,78	9,59	2,00
18 ⁶	59	25	47,5	2,3	0,76	1,88	0,67	28,8	36,4	3,03	9,40	2,05
19 ³	59	25	47,5	2,3	0,91	2,13	0,77	28,0	36,2	2,95	9,23	2,01
(duplicata)												
1 ¹⁵	20	10	25	0,5	1,36	3,07	1,12	25,3	35,9	2,73	8,44	1,90
2 ¹⁷	98	10	25	0,5	0,51	1,50	0,53	28,4	39,0	2,94	9,40	2,11
3 ¹⁶	20	40	25	0,5	1,47	3,22	1,18	25,4	35,8	2,59	8,56	1,93
4 ¹⁸	98	40	25	0,5	0,63	1,72	0,60	26,6	37,7	2,84	8,91	2,02
5 ⁹	20	10	70	0,5	1,24	2,78	1,00	25,9	36,4	2,32	9,01	1,93
6 ⁴	98	10	70	0,5	0,35	1,16	0,41	30,7	37,6	2,60	10,6	2,32
7 ⁸	20	40	70	0,5	1,48	3,30	1,21	24,5	35,6	2,39	8,48	1,92
8 ⁷	98	40	70	0,5	0,46	1,30	0,44	29,3	36,9	2,34	10,1	2,32
9 ¹	20	10	25	4	1,35	3,06	1,11	25,2	35,7	2,61	8,32	1,77
10 ⁵	98	10	25	4	0,37	1,20	0,43	28,0	39,6	3,15	9,70	2,26
11 ¹²	20	40	25	4	1,50	3,37	1,24	24,9	35,7	2,52	8,42	1,92
12 ¹³	98	40	25	4	0,55	1,52	0,55	27,9	38,0	2,72	9,36	2,15
13 ¹⁹	20	10	70	4	1,33	2,99	1,07	27,6	34,2	1,78	9,08	2,00
14 ¹⁴	98	10	70	4	0,51	1,50	0,53	34,5	35,7	1,42	11,2	2,17
15 ¹¹	20	40	70	4	1,49	3,23	1,15	26,9	33,9	1,40	9,06	2,01
16 ¹⁰	98	40	70	4	0,66	1,60	0,57	32,8	32,7	1,06	10,8	2,28
17 ²	59	25	47,5	2,3	0,75	1,88	0,68	27,5	35,8	2,80	9,25	2,03
18 ⁶	59	25	47,5	2,3	0,70	1,76	0,63	27,3	36,9	2,89	9,47	2,16
19 ³	59	25	47,5	2,3	0,83	2,00	0,72	26,8	35,8	2,67	9,04	1,93

Obs: C = concentração sulfúrica, S = porcentagem de sólidos, T = temperatura e t = tempo; * sobrescrito informa a ordem de realização dos ensaios (aleatoriamente).

Teores de CaO e P_2O_5 (5,60 e 9,53%, respectivamente na amostra D2 bulk) foram desconsiderados para o estudo estatístico, pois encontram-se associados a diferentes classes de minerais (conforme resultados apresentados no Apêndice D), alguns idealmente a serem solubilizados nas lixiviações e outros não. Particularmente, a apatita (principal portador de CaO na amostra D2) apresenta um comportamento bastante específico em meio sulfúrico, mostrando elevada solubilidade e ocasionando a formação de sulfato de cálcio.

4.3.2 Efeitos principais e interações das variáveis

Os resultados do teste de significância estatística efetuados para os efeitos principais e para a regressão fatorial (linear simples) estão apresentados na Tabela 19, considerando, como exemplo, as respostas de CeO_2 obtidas nos ensaios. No Apêndice F encontram-se os resultados para as demais respostas analisadas.

Os resultados mostram que o efeito principal da concentração de ácido (C) e, secundariamente, da porcentagem de sólidos (S) são significantes estatisticamente na resposta do CeO_2 , já que apresentam P-valor menor do que 0,05 (considerando 95% de nível de confiança). Ou seja, as variações dos teores de CeO_2 , entre 1,07 e 3,37%, observadas na Tabela 18, foram devidas preferencialmente à alteração dos níveis dessas duas variáveis. As demais variáveis (temperatura e tempo) ou interações entre elas não se mostram relevantes.

Uma equação de regressão linear, definida por um modelo de 1ª ordem, se mostra válida para a previsão da resposta de CeO_2 , considerando qualquer nível aplicado às variáveis (dentro dos limites propostos). Apesar do índice de curvatura ser estatisticamente significativo (P-valor menor do que 0,05), o valor de R^2 igual a 94,61% indica que o modelo linear de primeira ordem pode ser acreditável. Por isso, tal modelo simplificado foi considerado representativo desse processo de lixiviação nesse trabalho.

A Figura 30 apresenta os gráficos de Pareto dos efeitos (principais e interações), indicando a magnitude e a importância de cada um deles nas respostas avaliadas. Comportamento semelhante ao CeO_2 é observado para as respostas de La_2O_3 e Nd_2O_3 , em que a concentração de ácido é a variável que preferencialmente interfere nas respostas.

Tabela 19 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o CeO_2 .

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	23,020	1,535	44,32	0,000
Linear	4	22,701	5,675	163,89	0,000
Concentração (C; %)	1	22,361	22,361	645,72	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	0,3260	0,3260	9,41	0,006
Temperatura (T; °C)	1	0,0140	0,0140	0,41	0,531
Tempo (t; h)	1	0,0000	0,0000	0,00	0,993
Interações de 2 fatores	6	0,1597	0,0266	0,77	0,603
C*S	1	0,0038	0,0038	0,11	0,743
C*T	1	0,0020	0,0020	0,06	0,814
C*t	1	0,0215	0,0215	0,62	0,439
S*T	1	0,0017	0,0017	0,05	0,829
S*t	1	0,0095	0,0095	0,27	0,607
T*t	1	0,1213	0,1213	3,50	0,075
Interações de 3 fatores	4	0,1453	0,0363	1,05	0,405
C*S*T	1	0,0458	0,0458	1,32	0,263
C*S*t	1	0,0345	0,0345	0,99	0,329
C*T*t	1	0,0570	0,0570	1,64	0,213
S*T*t	1	0,0081	0,0081	0,23	0,633
Interações de 4 fatores	1	0,0140	0,0140	0,41	0,531
C*S*T*t	1	0,0140	0,0140	0,41	0,531
Erro	22	0,7619	0,0346		
Curvatura	1	0,4820	0,4820	36,16	0,000
Erro puro	21	0,2799	0,0133		
Total	37	23,7823			
Sumário do modelo	R2 96,80%; R2 ajustado 94,61%				
Equação de regressão	$3,557 - 0,02079 C - 0,0050 S - 0,00852 T - 0,040 t + 0,000143 C*S$ $+ 0,000052 C*T - 0,00141 C*t + 0,000330 S*T + 0,00259 S*t + 0,00196 T*t -$ $0,000005 C*S*T - 0,000011 C*S*t + 0,000005 C*T*t - 0,000081 S*T*t$ $+ 0,000001 C*S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R2 = coeficiente de explicação.

Além da concentração de ácido, o efeito principal da temperatura também atua significativamente nas respostas de SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 e BaO , sendo este o principal efeito para a resposta de Al_2O_3 , bem como sua interação com a variável tempo (temperatura*tempo).

Figura 30 – Gráficos de paretos dos efeitos ($\alpha = 0,05$).

4.3.3 Curvas de solubilização e condição ótima de recuperação

O acompanhamento das solubilizações, utilizando-se de gráficos de contorno, teve por objetivo definir a condição de operação ótima das variáveis selecionadas para se obter resíduos com menor concentração de terras raras possível, o que significa a máxima conversão desses elementos para a solução (lixívia). Esses gráficos são apresentados na Figura 31 à Figura 36, ilustrando as variáveis operacionais duas a duas.

Atentando inicialmente apenas para as respostas dos óxidos de terras raras (CeO_2 , La_2O_3 e Nd_2O_3), os gráficos indicam que a variação da concentração de ácido interfere demasiadamente nas solubilizações (conforme já discutido no item 4.3.2), sendo maior a solubilização quanto maior a concentração sulfúrica. As demais variáveis são quase insignificantes no comportamento das terras raras (notar tendência de horizontalidade das curvas "concentração sulfúrica vs outras variáveis"). Mesmo assim, uma maior solubilização dos OTR é verificada conforme reduzida a proporção de sólidos e elevado o tempo de reação. Temperaturas mais baixas são também mais eficientes, porém preferencialmente quando combinadas a tempos mais elevados.

As outras respostas analisadas (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e BaO) apresentam comportamento relativamente inverso ao das terras raras. Baixas concentrações de ácido já atuam na solubilização desses elementos, ao passo que a temperatura elevada potencializa a solubilização do Fe_2O_3 e do Al_2O_3 , de preferência em proporções de sólidos também elevadas. Os conteúdos de SiO_2 , TiO_2 e BaO são solubilizados desde baixas temperaturas, mas também em proporção de sólidos elevada e em curtos intervalos de tempo.

Figura 31 – Gráficos de contorno de concentração sulfúrica vs tempo (resíduos). Poncentagem de sólidos fixada em 10% e temperatura em 25°C.

**Figura 32 – Gráficos de contorno de porcentagem de sólidos vs tempo (resíduos).
Concentração sulfúrica fixada em 98% e temperatura em 25°C.**

Figura 33 – Gráficos de contorno de temperatura vs tempo (resíduos). Concentração sulfúrica fixada em 98% e porcentagem de sólidos em 10%.

Figura 34 – Gráficos de contorno de concentração sulfúrica vs porcentagem de sólidos (resíduos). Temperatura fixada em 25°C e tempo em 4h.

**Figura 35 – Gráficos de contorno de concentração sulfúrica vs temperatura (resíduos).
 Poncentagem de sólidos fixada em 10% e tempo em 4h.**

**Figura 36 – Gráficos de contorno de porcentagem de sólidos vs temperatura (resíduos).
Concentração sulfúrica fixada em 98% e tempo em 4h.**

A correlação das curvas de solubilização apresentadas, considerando também as interferências causadas entre as variáveis, permite a definição da melhor

condição de operação para a solubilização das terras raras, ao mesmo tempo em que os demais elementos mostrem mínima solubilização possível, conforme "situação 1" apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Condição otimizada de operação para a solubilização dos elementos de interesse, segundo 3 diferentes critérios almejados às respostas.

1. Máxima solubilização dos OTR e mínima das demais respostas			
Variável	Nível*	Respostas	% solubilizada no ensaio
Concentração sulfúrica	98%	La ₂ O ₃	76
Porcentagem de sólidos	10%	CeO ₂	75
Temperatura	41,8° C	Nd ₂ O ₃	75
Tempo	4h	SiO ₂	<5
		Fe ₂ O ₃	16
		Al ₂ O ₃	24
		TiO ₂	4
		BaO	8
2. Máxima solubilização dos OTR e mínima de Fe ₂ O ₃ (desconsiderando as demais respostas)			
Variável	Nível	Respostas	% solubilizada no ensaio
Concentração sulfúrica	98%	La ₂ O ₃	79
Porcentagem de sólidos	10%	CeO ₂	75
Temperatura	25° C	Nd ₂ O ₃	75
Tempo	4h	SiO ₂	<5
		Fe ₂ O ₃	5
		Al ₂ O ₃	14
		TiO ₂	9
		BaO	8
3. Máxima solubilização dos OTR (desconsiderando as demais respostas)			
Variável	Nível*	Respostas	% solubilizada no ensaio*
Concentração sulfúrica	98%	La ₂ O ₃	79
Porcentagem de sólidos	10%	CeO ₂	75
Temperatura	25° C	Nd ₂ O ₃	75
Tempo	4h	SiO ₂	<5
		Fe ₂ O ₃	5
		Al ₂ O ₃	14
		TiO ₂	9
		BaO	8

Obs: * = ensaio efetuado adicionalmente (não constava no planejamento experimental inicial) para a verificação da solubilização dos elementos nesta específica condição de operação.

Este modelo otimizado pode ser significativamente modificado de acordo com as restrições almejadas às respostas. Caso, por exemplo, seja dado maior peso à resposta do Fe₂O₃ em detrimento às demais (priorizado sua mínima solubilização e desconsiderando os efeitos e as interações das respostas de SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ e

BaO), a condição ótima de operação é alterada, basicamente em relação ao nível reduzido de temperatura ("situação 2"). Apesar de minimizar a solubilização do Fe_2O_3 e também do Al_2O_3 , a redução de temperatura promove um discreto aumento da solubilização do TiO_2 .

A "situação 3" apresenta a condição ótima de solubilização apenas das terras raras, desconsiderando qualquer efeito ou interação de todas as outras respostas. Refere-se aos níveis C98%, S10%, T25°C e t4h e atinge a solubilização de 77% na média dos OTR, sendo mais elevada para o La_2O_3 em relação ao CeO_2 e ao Nd_2O_5 . Notadamente, trata-se da mesma condição para a mínima solubilização de Fe_2O_3 ("situação 2" vs "situação 3").

Os valores de solubilização foram calculados a partir do balanço de massas dos produtos da lixiviação (resíduo sólido e solução) e respectivos teores.

4.3.4 Solubilização dos minerais e terras raras remanescentes

Na Figura 37 são apresentados difratogramas de alguns resíduos sólidos obtidos em diferentes condições de lixiviação. A solubilização da monazita é evidente (redução na intensidade dos picos característicos) conforme a elevação da concentração de ácido sulfúrico (de 20% para 59% para 98%) (a), enquanto a goethita e o alumino-fosfato são parcialmente consumidos com a elevação da temperatura (de 25°C para 70°C) (b) (corroborando o aumento da solubilização dos teores de Fe_2O_3 e de Al_2O_3 nessas condições).

A solubilização de 77% dos OTR na condição de ótima operação de lixiviação (C98%, S10%, T25°C e t4h) indica que praticamente toda a monazita (detectada e quantificada nos estudos de caracterização mineralógica) é consumida, já que 70% do total dos OTR presentes na amostra D2 estão na forma de monazita e 6% são referentes à monazita presente na fase goethita-monazita (combinação de resultados de mineralogia e de partição apresentados nos itens 4.1.3 e 4.1.5). O restante dos OTR está associado a outros minerais (possivelmente como microinclusões de minerais de terras raras não acessíveis pelo ácido sulfúrico nesta faixa granulométrica) e que foram pouco afetados nesta condição de operação.

Figura 37 – Difratomogramas de resíduos sólidos em diferentes condições de lixiviação da amostra D2. Variações na concentração de ácido em (a) e na temperatura em (b).

Considerando uma lixiviação efetuada especificamente para o produto Overflow da mesma amostra, enriquecido em monazita e em goethita, os resultados de solubilização são um tanto modificados, conforme apresentado na Tabela 21.

Neste produto granulométrico (d_{50} de 3 μm , conforme resultado apresentado no Apêndice G), a solubilização dos OTR é elevada para 92%, em média, indicando que terras raras associadas à ganga (de acordo com os resultados do MLA) podem ser também lixiviadas, provavelmente devido ao maior grau de liberação dos minerais e maior acessibilidade do ácido sulfúrico nesta faixa granulométrica (maior da área específica disponível para a reação).

Além da maior solubilização dos OTR, a solubilização das demais respostas também é aumentada na lixiviação do produto Overflow (33%, em média, para os conteúdos de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e BaO), apesar de algumas delas representarem teores bem discretos no material.

Tabela 21 – Solubilização de óxidos na condição definida como ótima para a solubilização dos OTR (C98%, S10%, T25°C e t4h), considerando separadamente a amostra D2 bulk e o produto Overflow.

Intervalo granulométrico		Total -0,30 mm ($d_{50} = 73 \mu\text{m}^*$)		Overflow ($d_{50} = 3 \mu\text{m}^*$)		
% massa na amostra		100,0		17,2		
% OTR na monazita + goethita-monazita		76		90% (estimado por MLA_XMOD)		
Respostas	Teor inicial (%)	% solub.	DP	Teor inicial (%)	% solub.	DP
La ₂ O ₃	1,54	79		3,43	91	
CeO ₂	3,45	75	<5	7,50	92	<5
Nd ₂ O ₃	1,14	75		2,59	91	
SiO ₂	22,0	<5	<5	9,26	29	27
Fe ₂ O ₃	36,1	5	<5	41,6	22	5
Al ₂ O ₃	2,73	14	<5	2,89	39	5
TiO ₂	8,25	9	<5	3,28	38	11
BaO	1,80	8	6	1,35	38	9

Obs: DP = desvio padrão considerando ensaios efetuados em triplicata. * = determinado por espalhamento de luz laser de baixo ângulo.

O desvio padrão observado nos ensaios de solubilização do produto Overflow, efetuados em triplicata, mostram, porém, certa instabilidade da reação considerando as condições de operação aplicadas. Aparentemente, a variável granulometria (não otimizada neste trabalho) se mostra importante na cinética de solubilização de materiais ultrafinos, assim como a porcentagem de sólidos e o tempo necessário à reação que devem também influenciar a dissolução.

De acordo com o difratograma refinado apresentado Figura 38, observa-se que a proporção de goethita é proporcionalmente elevada com a solubilização da monazita (apesar dos níveis solubilizados de Fe₂O₃), enquanto que as proporções dos alumino-fosfatos, do anatásio e dos óxi-hidróxidos de bário e manganês são um tanto afetadas, justificando a solubilização verificada quanto aos teores de Al₂O₃, TiO₂ e BaO.

Um trabalho mais detalhado e otimizado para a solubilização do produto Overflow deve ser desenvolvido para o melhor entendimento dos resultados de solubilização do SiO₂ (elevado desvio padrão observado entre as triplicatas). Aparentemente, a solubilização está associada aos possíveis conteúdos presentes na própria monazita, na goethita e em outros portadores, tendo em vista que, teoricamente, o quartzo é insolúvel em ácido sulfúrico.

Figura 38 – Difratoograma do resíduo insolúvel obtido na lixiviação sulfúrica do produto Overflow da amostra D2.

A partir de observações efetuadas ao microscópio eletrônico de varredura constata-se a presença de terras raras remanescentes no resíduo insolúvel do produto Overflow ainda na forma de monazita (cerca de 24% antes da lixiviação e 2,7% após a lixiviação, conforme análise por DRX-Rietveld), e essencialmente como cristais submicrométricos e porosos (Fotomicrografia 13 e Fotomicrografia 14).

Fotomicrografia 13 - Minerais de terras raras se mostram em tons claros de cinza nas imagens de elétrons retroespalhados (BSE), assim como a barita e o pirocloro (traços na amostra). Notar expressiva redução da proporção de minerais de terras raras no produto Overflow, antes (a) e após a solubilização ácida (b).

Fotomicrografia 14 – Monazita remanescente no resíduo insolúvel da lixiviação (imagens de BSE), na forma de agregados porosos de cristais submicrométricos.

5 DISCUSSÕES

Como objetivos almejados por este trabalho, neste capítulo são apresentadas as principais características químicas e mineralógicas levantadas sobre as amostras estudadas, contendo terras raras; os parâmetros mineralógicos identificados e que guiam o comportamento desses minerais frente a distintas alternativas de processamento (separabilidade física e etapas de dissolução química); bem como os desafios tecnológicos identificados no decorrer dos estudos de caracterização.

5.1 Peculiaridades mineralógicas dos depósitos estudados

De acordo com os resultados apresentados, os depósitos estudados mostram características químicas e mineralógicas bastante semelhantes entre si. Apesar das amostras serem provenientes de complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos específicos, os processos supergênicos e sobretudo os intempéricos agiram de maneira a uniformizar intensamente a assembleia mineralógica e as características físico-químicas dos minerais de terras raras presentes. Dentre as 10 amostras estudadas, a amostra C1 é aquela que apresenta características mais específicas, mostrando a bastnaesita como principal mineral portador de terras raras, enquanto nas demais é predominante o conteúdo da monazita.

Os teores de OTR contidos nas amostras estão inclusive de acordo com outros depósitos carbonatíticos mundiais (ORRIS; GRAUCH, 2002), variando entre 1,27 e 6,45% nas mesmas, sendo preferencialmente relacionados a elementos de terras raras leves (ETRL). Os depósitos denominados A e B apresentam, em média, 93% de ETRL, 3% de ETRP e 4% de $Y_2O_3+Sc_2O_3$, enquanto os depósitos C e D apresentam, em média, 97% ETRL, 2% de ETRP e 1% de $Y_2O_3+Sc_2O_3$.

Ao longo das frações granulométricas, esses teores tendem à elevação em direção aos finos, com poucas exceções (amostras A5 e C1). Em função da representatividade mássica dessas frações, a distribuição das terras raras chega a 64%, em média, no material abaixo de 0,020 mm das amostras dos depósitos A e D (39%, em média, especificamente no produto Overflow, limite superior estimado em 0,005 mm). Comparativamente, os depósitos B e C mostram maior distribuição de OTR junto às frações grossas, em média de 29% retidos em 0,30 mm, porém ainda 38% ocorrem associados aos finos abaixo de 0,020 mm.

Em termos mineralógicos, as principais características das amostras são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Sumário comparativo das principais características mineralógicas e de associações dos minerais de interesse.

Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	D1	D2
Topsize (mm)	0,3	0,3	1,19	1,19	1,19	0,3	0,3	0,125	0,3	0,3
Composição mineralógica (% em massa)										
monazita	3,1	4,1	1,1	4,4	2,4	0,9	1,3	0,5	6,4	9,8
bastnaesita								3		
cerianita	0,2	0,3	0,1	0,3	0,6			2,5		
Fe-óxidos	21	7,7	8,4	29	13	18	20	9,2	17	12
goethita	37	28	10	13	16	13	21	18	27	20
goethita-monazita										6,2
quartzo	2,6	18	14	3,9	3,9	13	3,8	0,1	14	21
quartzo-monazita	<0,1	0,7								
Al-fosfatos	19	23	8,1	32	10	3,4	8,1	0,6	12	8,7
apatita	0,8	1,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	2,1		2,9	8,2
gibbsita-caulinita	2	3	45	6,6	45	8,6	5,7	26		
mica	0,2	0,2	8,2	0,2	4,2			32		
ilmenita	3,8	3,7	0,6	0,9	0,8	11	16	0,9	10	8,4
Ti-óxidos	5,9	7	0,8	1,8	1,1	21	19	1,9	8	1,9
perovskita	<0,1	<0,1				9,3	0,5			
Mn-óxidos	1,6	1,4	2,1	7,6	2,7	0,6	1,2	4,2	1,3	0,8
outros	3	2,4	0,8	0,8	0,3	0,6	0,9	1,1	1,2	2,1
Partição de OTR entre os principais minerais portadores (% em massa)										
monazita	70	61	50	70	55	40	47	7	95	70
bastnaesita			<1	<1	<1			39		
cerianita	6	8	14	7	24			39		
*minerais ETR	76	69	65	78	79	40	47	85	95	70
média por depósito			73			43		85	82	
goethita-monazita										19
quartzo-monazita	1	15								
demaís minerais	22	16	36	23	21	60	53	15	5	11
Características granulométricas dos minerais - granulação (d₅₀ µm; ECD - Total +0,008 mm)										
*minerais ETR	14	15	12	13	22	13	19	15	16	12
média por depósito			15			16		15	14	
Grau de liberação na fração +0,008 mm (≥95% do mineral de interesse na partícula - % área)										
*minerais ETR	63	56	43	53	41	32	44	41	58	55
média por depósito			51			38		41	56	

Obs: *minerais de ETR = somatória de monazita + bastnaesita + cerianita + xenotima + Sc-fosfato.

O depósito A apresenta dois tipos mineralógicos principais, um com quantidades elevadas de óxi-hidróxidos de ferro e alumino-fosfatos e o outro

enriquecido também em caulinita e, secundariamente, gibbsita (somam 45% em massa), aparentemente relativo a um material mais superficial no depósito (amostras A3 e A5). Como minerais de interesse estão presentes monazita (entre 1,1 e 4,4% em massa nas amostras) e, em menores proporções, cerianita, além de xenotima e um fosfato de escândio como traços, todos tendendo à elevação para as frações mais finas. O fosfato de escândio foi identificado unicamente neste depósito e, apesar do número reduzido de grãos (menos de 5 grãos em cada amostra), esta ocorrência se mostra bastante interessante, uma vez que não se encontra documentada em literaturas e também no que se refere ao alto valor agregado do escândio (METAL-PRICES, 2017). Juntos, esses minerais típicos portadores de terras raras respondem por 73%, em média, dos OTR contidos nas amostras e apresentam liberação em área de 51% (média) no intervalo acima de 0,008 mm (valor superior a 60% de liberação apenas abaixo de 0,020 mm). Em partículas mistas com a ganga são predominantes associações com óxi-hidróxidos de ferro, alumino-fosfatos e com óxi-hidróxidos de bário e manganês.

As amostras do depósito B apresentam, além dos óxi-hidróxidos de ferro, quantidades elevadas de minerais típicos de titânio (ilmenita, anatásio e perovskita), entre 35 e 42% em massa. A monazita (entre 0,9 e 1,1% em massa) é o principal mineral de interesse e também aumenta em proporção em direção às frações finas. Responde por 43%, em média, dos OTR contidos nas amostras e apresenta liberação em área de 38% (média) para o intervalo acima de 0,008 mm (valor superior a 60% de liberação apenas abaixo de 0,020 mm). Em partículas mistas com a ganga são predominantes associações com minerais de titânio e com goethita.

Os conteúdos mais elevados de ETRP nas amostras dos depósitos A e B referem-se aos minerais traços xenotima e fosfato de escândio e/ou à própria monazita (depósito A). Teores de ETRP, assim como de ThO_2 e U_3O_5 , são muito baixos e já próximos aos limites de detecção das técnicas analíticas aplicadas.

O depósito C (com uma única amostra estudada: C1) é bastante exclusivo em relação à composição mineralógica. Entre os maiores constituintes estão caulinita, mica e gibbsita, enquanto os minerais típicos de terras raras são bastnaesita (3,0% em massa), cerianita (2,5% em massa), monazita (0,5%), além de ocorrer traços de xenotima. Juntos, esses minerais respondem por 85% dos OTR contidos na amostra

e apresentam liberação em área de 41% para o intervalo acima de 0,008 mm (valor superior a 60% de liberação apenas abaixo de 0,020 mm). Em partículas mistas com a ganga são predominantes associações com goethita e mica.

O depósito D apresenta como maiores constituintes óxi-hidróxidos de ferro, alumino-fosfatos e quartzo, e apresenta as maiores quantidades de monazita dentre os depósitos estudados, entre 6,4 e 9,8% em massa, progressivamente elevadas em direção às frações finas. A monazita responde por 82%, em média, dos OTR contidos nessas amostras e apresenta liberação em área de 56% (média) para o intervalo acima de 0,008 mm (valor superior a 60% de liberação apenas abaixo de 0,020 mm). Em partículas mistas com a ganga são predominantes associações com quartzo e goethita, por vezes de maneira intensamente intercrescida e quase não diferenciável ao EDS (fase goethita-monazita na amostra D2).

Como características físico-químicas comuns aos minerais de terras raras identificados nas amostras, independentemente do depósito, estão:

- tamanhos reduzidos de grãos (micrométricos a submicrométricos); na média das amostras, o d_{50} é de 15 μm no intervalo granulométrico acima de 0,008 mm e chega a valores inferiores a 0,1 μm abaixo da mesma;
- xenotima, Sc-fosfato e cerianita (exceto no depósito C) não devem necessariamente ser considerados minerais de minério devido às pequenas proporções contidas;
- ocorrem em formas definidas e com superfície limpa, mas são mais comuns os agregados microcristalinos intercrescidos de minerais de terras raras;
- elevada porosidade;
- variabilidade composicional, preferencialmente em relação às proporções de cério e lantânio (principais elementos de terras raras contidos) na monazita e na bastnaesita; quando presentes, os teores de ThO_2 são da ordem de 1-4% na monazita, de 1-9% na bastnaesita e geralmente chegam a 10% na cerianita. ETRP foram observados localmente na monazita e na xenotima, mas sempre em proporções já próximas ao limite de detecção das microanálises por EDS. A variabilidade química observada especificamente na monazita está de acordo com outros trabalhos desenvolvidos em depósitos carbonatíticos brasileiros (TOLEDO; PEREIRA, 2003; TOLEDO et al., 2004).

Os conteúdos de terras raras associados aos demais minerais, que não os típicos de terras raras, se devem aos processos genéticos de formação, em que diferentes minerais incorporam elementos de terras raras durante os processos primários e/ou supergênicos de evolução do depósito (WABER, 1992; LAPIDO-LOUREIRO, 1994; SOUBIES et al., 1995; OLIVEIRA; IMBERNON, 1998; RIBEIRO, 2008), ou estão relacionados à ocorrência de inclusões submicrométricas ($<1\ \mu\text{m}$) de minerais de terras raras na ganga e de forma bastante complexa (intercrescimentos), justificando os valores incompletos de liberação. O depósito B se mostrou aquele com maior complexidade de associação e partição de OTR com a ganga.

5.2 Contribuições tecnológicas ao aproveitamento dos recursos

Em relação ao processamento mineral e de acordo com as informações mineralógicas levantadas neste trabalho, as seguintes considerações são feitas no que se refere a etapas físicas e químicas para o aproveitamento dos recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos.

Etapas de moagem e atrição promovem considerável enriquecimento de finos abaixo de 0,020 mm apenas em depósitos que mostram elevada proporção em massa de grossos (acima de 0,30 mm) e OTR associados. No depósito B, por exemplo, cada uma dessas etapas promoveu enriquecimento de OTR da ordem de 20%, em média. A liberação dos minerais de terras raras ocorre em granulometria muito fina, inviabilizando, dessa forma, os procedimentos de moagem com o intuito de liberar minerais (alto consumo de energia).

Separações minerais são bastante limitadas para a concentração dos minerais de terras raras acima de 0,020 mm. Além do reduzido tamanho de grãos e baixo grau de liberação (28% em média nas amostras estudadas), esses minerais apresentam propriedades físicas relativamente semelhantes aos minerais de ganga presentes, inviabilizando a obtenção de produtos com teores enriquecidos em OTR. De maneira geral, os minerais de terras raras tendem a concentrar-se em produtos afundados em líquidos densos e não magnéticos em baixa intensidade de campo.

O resultado mais promissor em termos de separações físicas refere-se à possibilidade de remoção de um produto contaminante magnético (em separador Tubo Davis) acima de 0,020 mm, com pouca representatividade mássica (15% em

média nas amostras avaliadas), mas significativamente enriquecido em Fe_2O_3 (teor superior a 79% no ensaio; responsável por 30%, em média, do total contido nas amostras), ao mesmo tempo em que carrega teores discretos de OTR (perdas de 2%, em média, do total contido nas amostras). Este procedimento remove essencialmente Fe_2O_3 na forma de óxidos de ferro e pode ser considerado para eventual pré-concentração aos ensaios de flotação e, principalmente, às etapas de dissolução seletiva quando da digestão do minério na hidrometalurgia, minimizando o consumo de ácido e de efluentes do processo. Esta separação não é efetiva nas frações finas e ultrafinas (abaixo de 0,020 mm), onde os teores de Fe_2O_3 ocorrem essencialmente como goethita.

Eventual flotação da fração fina e ultrafina, com ou sem moagem prévia, deve ser avaliada, tendo em vista que a liberação dos minerais de interesse é mais expressiva abaixo de 0,020 mm. Permanecem, no entanto, grandes desafios para que a flotação nesta faixa de tamanho de partículas possa gerar concentrados com elevadas relações de enriquecimento e de recuperações metalúrgicas.

Quanto aos procedimentos químicos para a solubilização seletiva dos minerais de terras raras, efetuados apenas para uma das amostras (amostra D2; cominuída em 0,30 mm), a condição ótima de operação dos ensaios considera ácido sulfúrico concentrado, reduzida porcentagem de sólidos, temperatura ambiente e tempo de poucas horas (4 horas). Nesta condição é alcançada a solubilização de 77% dos OTR, praticamente relativa ao total da monazita presente na amostra (detectável ao EDS/MLA), sendo que os minerais de ganga são pouco afetados (solubilização média de 9% dos conteúdos de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e BaO). A permanência da temperatura em níveis baixos é fundamental para a não solubilização de minerais portadores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 .

As terras raras remanescentes nos resíduos insolúveis da lixiviação são atribuídas aos minerais de ganga insolúveis nesta condição de operação (portadores de ETR estrutural e/ou como microinclusões). Não é o caso desta amostra, mas a presença de minerais típicos de terras raras e insolúveis em ácido sulfúrico poderiam também justificar os valores incompletos de extração.

Os teores remanescentes de ETR podem ainda ser extraídos quimicamente conforme os resultados obtidos da lixiviação efetuada especificamente para o

produto Overflow da amostra D2 (enriquecido em goethita e em monazita com elevado grau de liberação). Neste produto a solubilização dos OTR atinge 92%, mostrando que intercrescimentos ou microinclusões de minerais de terras raras associados à ganga podem sim ser acessados quimicamente, diferentemente de uma rota física de processamento. Nesta granulometria, porém, ocorre uma maior solubilização da ganga (solubilização média de 35% dos conteúdos de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e BaO), potencializada possivelmente pelo aumento da superfície específica dos minerais. A variável granulometria se mostrou bastante significativa para a cinética de solubilização dos minerais presentes.

Visto que um eventual processamento químico para o aproveitamento dos recursos de terras raras deverá lidar com conteúdos de impurezas de elementos químicos relativos à ganga parcialmente solubilizada, sugere-se a avaliação de possíveis procedimentos para a dissolução seletiva de minerais de ferro, por exemplo, previamente à solubilização de minerais de terras raras, utilizando-se reagentes como ácidos oxálicos ou ditionito-citrato-bicarbonato de sódio, conforme estudos publicados por Cornell e Schindler (1987) e Inda Junior e Kampf (2003).

5.3 Contribuições tecnológicas aos estudos de caracterização

Os procedimentos físicos e analíticos aplicados ao trabalho permitiram a geração de uma quantidade significativa de informações de detalhe sobre os minerais de terras raras. Estes procedimentos vêm sendo aplicados rotineiramente em estudos de caracterização tecnológica de minérios, mas poucos trabalhos abordam a aplicação específica de técnicas de mineralogia avançadas e automatizadas para o estudo de depósitos alcalinos e alcalino-carbonatíticos de terras raras (KAHN et al., 2012; GRAMMATIKOPOULOS et al., 2013; SMYTHE et al., 2013; NEUMANN; MEDEIROS, 2015).

Os procedimentos de análises químicas aplicados englobaram técnicas de ICP para a análise das terras raras nas amostras totais e nas soluções de lixiviação, e de FRX para os demais produtos granulométricos e de concentração física gerados no decorrer dos estudos. Zawisza et al. (2011) apresentam os pontos favoráveis à utilização do ICP em relação a FRX inclusive em amostras sólidas, principalmente por conta dos limites de detecção das diferentes técnicas e possíveis

interferências na diferenciação entre os ETR na FRX. As determinações efetuadas, porém, mostraram elevada correlação linear entre essas técnicas ($R^2 > 0,900$) para os principais constituintes (La_2O_3 , CeO_2 , Pr_6O_{11} e Nd_2O_3), com desvio relativo médio de 10%, sendo os resultados obtidos pela FRX geralmente superiores aos do ICP. Esta elevada correlação suporta a qualidade dos resultados de FRX obtidos ao longo dos estudos de caracterização, mas o acompanhamento dos ETRP é inviável.

Nas análises mineralógicas, o sistema de análise de imagens automatizada MLA se mostrou uma ferramenta bastante robusta para a geração de informações de mineralogia modal, partição de elementos químicos nos minerais portadores, associações e liberação de fases de interesse, distribuição de tamanho de grãos e possibilidades de recuperação de teores de OTR, tendo em vista principalmente a complexidade do material em estudo. O maior obstáculo técnico identificado foi a ampla distribuição dos minerais de terras raras preferencialmente em produtos granulométricos finos e ultrafinos, onde a correta classificação e diferenciação dos mesmos em relação à ganga se torna, muitas vezes, limitada, considerando as condições operacionais e os critérios de resolução viáveis de serem aplicados aos sistemas de EDS e MLA (GRAMMATIKOPOULOS et al., 2013; SMYTHE et al., 2013; ANTONIASSI et al., 2015; NEUMANN; MEDEIROS, 2015). A eventual falta de condições operacionais adequadas à análise pode implicar desvios na mineralogia modal e, conseqüentemente, na partição dos óxidos de interesse entre os minerais portadores, bem como na subestimação da liberação e da recuperação dos OTR nos produtos finos (resultados apresentados apenas para o intervalo acima de 0,008 mm). A qualidade da confiabilidade dos resultados mineralógicos apresentados foi, entretanto, verificada por fração granulométrica, através da conciliação dos resultados químicos dosados por FRX com aqueles calculados a partir da mineralogia modal obtida pelo MLA. Os resultados foram considerados satisfatórios (R^2 entre 0,960 e 0,995 nas amostras), inclusive nas frações mais finas.

A fração mais fina analisada, referente ao produto Overflow da deslamagem, foi analisada também por DRX com o refinamento pelo método de Rietveld, para a determinação unicamente das proporções minerais presentes. A técnica se mostrou interessante para a análise de materiais finos (não prejudicada por tamanhos reduzidos de grãos e por complexidades nas formas de associações minerais), mesmo mostrando limites de detecção inferiores àqueles das técnicas de

microscopia. A possibilidade de obtenção de informações sobre grau de cristalinidade, tamanho de cristalitos e substituições químicas estruturais (TOLEDO et al., 2004) também indica um potencial para a exploração desta técnica aos estudos de aproveitamento desses recursos, já que tais informações poderiam ser confrontadas com os resultados de partição de elementos nos minerais portadores e com os potenciais níveis de solubilização dos minerais no processo químico.

Com relação à estimativa da liberação e da recuperação dos minerais de terras raras, calculadas pelo sistema MLA (acima de 0,008 mm), os resultados se mostram superestimados quando comparados aos obtidos pelas separações minerais, tendo em vista que não consideram a ineficiência do processo em função do tamanhos reduzidos de grãos e das possíveis propriedades físicas semelhantes entre minerais de interesse e ganga, além de que se baseiam unicamente em medidas de dimensões 2D de partículas (liberação 2D>3D).

A composição química dos minerais de terras raras foi avaliada por sistema de microanálise química por EDS e geralmente mostra baixos fechamentos quantitativos. Toledo et al. (2004) apresentam um estudo detalhado de microanálises em monazita de Catalão e associam os baixos fechamentos às características de microcristalinidade e porosidade desses minerais, as quais são frequentemente observadas nas amostras estudadas neste trabalho. A técnica de EDS apresenta também restrições para a identificação e quantificação de ETRP, de Y_2O_3 , de Sc_2O_3 , de ThO_2 e de U_3O_5 presentes em quantidades inferiores aos limites de detecção para os minerais portadores.

6 CONCLUSÕES

A complexidade de aproveitamento de recursos minerais de terras raras nos complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos estudados está essencialmente relacionada aos tamanhos reduzidos dos minerais de interesse presentes (monazita e/ou bastnaesita, além de traços de cerianita, xenotima e um fosfato de escândio) e a ocorrência dos mesmos preferencialmente em íntimas associações com a ganga.

Ensaio de separabilidade física são promissores apenas no que se refere à redução do conteúdo de minerais contaminantes magnéticos (essencialmente óxidos de ferro) nas frações acima de 0,020 mm. Abaixo desta, a separação não é efetiva.

Por outro lado, a dissolução seletiva de minerais de terras raras em meio ácido promove elevada solubilização das terras raras em relação à ganga (80-90%). As etapas seguintes a digestão dos elementos de terras raras deverão, entretanto, lidar com alguns contaminantes parcialmente solubilizados com o ataque ácido.

Frente às informações levantadas, têm-se as seguintes sugestões de trabalhos complementares:

- ampliar o universo de amostras considerando outras matrizes e/ou fácies dos depósitos como o estudo de rochas frescas. As amostras estudadas tratam-se exclusivamente de materiais lateríticos;
- desenvolver estudos relacionados a ocorrência do Sc-fosfato (eventual importância para o entendimento do comportamento químico das terras raras; importância de mercado);
- buscar alternativas para os estudos de caracterização aplicados a materiais ultrafinos. Procedimentos de dissolução seletiva da ganga, por exemplo, poderiam contribuir para uma melhor definição da partição das terras raras entre os minerais de interesse e a ganga;
- desenvolver um planejamento de experimentos considerando a granulometria como variável interferente na solubilização ácida de minerais. Correlacionar o grau de solubilização com eventuais variações no tamanho de grãos ou até mesmo no grau de cristalinidade dos minerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¹

- ABRÃO, A. Química e tecnologia das terras-raras. **Série Tecnologia Mineral**, 66, **CETEM**, 212p., 1994. Rio de Janeiro: CETEM.
- ANDRADE, R. H. P. Terras Raras. In: T. M. Lima; C. A. R. Neves (Eds.); **Sumário Mineral**. v. 35, p.108–109, 2016. Brasília: DNPM.
- ANTONIASI, J. L.; ULIANA, D.; KAHN, H.; TASSINARI, M. M. M. L.; ULSEN, C. Assessment and characterization of REE minerals from an alkali-carbonatitic complex. In: F. Dong (Ed.); **Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)**. p.173–186, 2015. Mianyang: Springer Geochemistry/Mineralogy.
- BAO, Z.; ZHAO, Z. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. **Ore Geology Reviews**, v. 33, n. 3–4, p.519–535, 2008.
- BARBOSA, J. P.; ARAÚJO, R. V. V.; CUNHA, O. G. Estudo dissolução seletiva da sílica do minério de terras-raras, Catalão - GO. 51º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. **Anais...** . p.27–41, 1996. ABM.
- BENEDETTO, J. S.; AQUINO, J. A.; LOBATO, L. M.; BRITO, W. **Ensaio preliminares de concentração de TR em amostras de sílexito mineralizado de Catalão-GO**. Nuclebrás - Projeto Nuclemon (fontes alternativas de terras raras) / CDTN, 1988.
- BENEDETTO, J. S.; MORAIS, C. A. **Estudo tecnológico de minério de terras raras de Catalão, CT5 007/97**. Fosfertil - Fertilizantes Fosfatados SA / CNEN-CDTN, 1997.
- BERBERT, C. O. Carbonatites and associated mineral deposits in Brazil. In: Y. Shimazaki (Ed.); **Geologic Evolution, Resources and Geologic Hazards - International centennial Symposium of the Geological Survey of Japan**, 263. p.269–290, 1984. Geological Survey Of Japan.
- BINNEMANS, K.; JONES, P. T.; BLANPAIN, B.; et al. Recycling of rare earths: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p.1–22, 2013.
- BINNEMANS, K.; JONES, P. T.; BLANPAIN, B.; GERVEN, T. V.; PONTIKES, Y. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p.17–38, 2015.
- BIONDI, J. C. Brazilian mineral deposits associated with alkaline and alkaline-carbonatite complexes. In: P. Comin-Chiaramonti; C. B. Gomes (Eds.); **Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform**. p.707–750, 2005. São Paulo: EDUSP.

¹ Norma ABNT

BISAKA, K.; THOBADI, I. C.; PAWLIK, C. Extraction of rare-earth elements from iron-rich rare-earth deposits. Hydrometallurgy Conference: Sustainable Hydrometallurgical Extraction of Metals. **Anais...** . p.25–36, 2016. Southern African Institute of Mining and Metallurgy.

BLAKELY, C.; COOTER, J.; KHAITAN, A.; SINCER, I.; WILLIAMS, R. Rare Earth Metals & China., 19p., 2011. An Arbor: Gerald R. Ford School of Public Policy.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. New Jersey: Willey, 2005.

BRISSON, V. L.; ZHUANG, W. Q.; ALVAREZ-COHEN, L. Bioleaching of rare earth elements from monazite sand. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 113, n. 2, p. 339–348, 2016.

CGEE. **Usos e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012 - 2030**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2012.

CHAKHMOURADIAN, A. R.; WALL, F. Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More). **Elements**, v. 8, n. 5, p.333–340, 2012.

CHAN, T. N. A new beneficiation process for the treatment of supergene monazite ore. In: R. G. Bautista; N. Jacksom (Eds.); **Rare Earths - Extraction, Preparation and Applications (Proceedings of an International Symposium held jointly by TMS and AusIMM during the TMS Annual Meeting)**. p.77–94, 1992. San Diego: TMS.

CHELGANI, S. C.; RUDOLPH, M.; LEISTNER, T.; GUTZMER, J.; PEUKER, U. A. A review of rare earth minerals flotation: monazite and xenotime. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 25, n. 6, p.877–883, 2015.

CHEN, Z. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. **Journal of Rare Earths**, v. 29, n. 1, p.1–6, 2011.

CORNELL, R. M.; SCHINDLER, P. W. Photochemical dissolution of goethite in acid/axalate solution. **Clays and Clay Minerals**, v. 35, n. 5, p.347–352, 1987.

DAS, N.; DAS, D. Recovery of rare earth metals through biosorption: An overview. **Journal of Rare Earths**, v. 31, n. 10, p.933–943, 2013. The Chinese Society of Rare Earths. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721\(13\)60009-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721(13)60009-5)>. .

DIAS, H. Processo recupera terras raras de lâmpadas fluorescentes. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/?p=192134>>. Acesso em: 1/5/2017.

FANDRICH, R.; GU, Y.; BURROWS, D.; MOELLER, K. Modern SEM-based mineral liberation analysis. **International Journal of Mineral Processing**, v. 84, p.310–320, 2007.

FLEISCHER, M.; ALTSCHULER, Z. S. The relationship of the rare-earth composition of minerals to geological environment. **Geochemica et Cosmochimica Acta**, v. 33, n. 10, p.725–732, 1969.

FORMOSO, M. L. L.; PEREIRA, V. P.; MENEGOTTO, E.; et al. Os elementos terras raras e sua importância para o setor mineral do Brasil. In: A. J. Melfi; A. Misi; D. A. Campos; U. G. Cordani (Eds.); **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**. p.68–83, 2016. Rio de Janeiro: Academina Brasileira de Ciências.

GOLEV, A.; SCOTT, M.; ERSKINE, P. D.; ALI, S. H.; BALLANTYNE, G. R. Rare earths supply chains: current status, constraints and opportunities. **Resources Policy**, v. 41, n. 1, p.52–59, 2014.

GOMES, C. B.; RUPERTI, E.; MORBIDELLI, L. Carbonatite complexes from Brazil: a review. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 3, n. 1, p.51–63, 1990.

GRAMMATIKOPOULOS, T.; MERCER, W.; GUNNING, C. Mineralogical characterisation using QEMSCAN of the Nechalacho heavy rare earth metal deposit, Northwest Territories, Canada. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 52, n. 3, p.265–277, 2013.

GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N. **Extractive Metallurgy of Rare Earths**. CRC Press, 2005.

HABASHI, F. Rare earth metals. In: F. Habashi (Ed.); **Handbook of Extractive Metallurgy, volume III**. p.1695–1741, 1997. Wiley-VCH.

HABASHI, F. Extractive metallurgy of rare earths. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 52, n. 3, p.224–233, 2013.

HASSANIEN, W. A. G.; DESOUKY, O. A. N.; HUSSIEN, S. S. E. Bioleaching of some rare earth elements from Egyptian monazite using *Aspergillus ficuum* and *Pseudomonas aeruginosa*. **Walailak Journal of Science and Technology**, v. 11, n. 9, p.809–823, 2014.

HAXEL, G. B.; HEDRICK, J. B.; ORRIS, G. J. Rare Earth Elements — Critical Resources for High Technology. **United States Geological Survey Fact Sheet**, v. 87–2, 4p., 2002.

HENDERSON, P. The rare earths elements: introduction and review. In: A. P. Jones; F. Wall; C. T. Williams (Eds.); **Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits**. p.1–20, 1996. London: Chapman & Hall.

HUANG, Z. L.; YAN, Z. F.; XU, C.; ZHANG, Z. L.; LIU, C. Q. Mineralization by mantle fluids in the Miaoniuping REE deposit, Sichuan Province, China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 89, p.165–169, 2006.

INDA JUNIOR, A. V.; KAMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p.1139–1147, 2003.

IPT. Didímio no Brasil - Projeto do IPT em parceria com a CBMM obtém pela primeira vez didímio metálico no país, base para os superímãs. Disponível em: <<http://www.ipt.br/noticia/1041.htm>>. Acesso em: 1/5/2017.

IUPAC. Periodic table of the elements. Disponível em: <<https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>>. Acesso em: 1/5/2017.

JENKINS, R. **X-Ray fluorescence spectrometry**. John Wiley, 1999.

JORDENS, A.; CHENG, Y. P.; WATERS, K. E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. **Minerals Engineering**, v. 41, p.97–114, 2013.

JUN, T.; JINGQUN, Y.; RUAN, C.; et al. Kinetics on leaching rare earth from the weathered crust elution-deposited rare earth ores with ammonium sulfate solution. **Hydrometallurgy**, v. 101, n. 3–4, p.166–170, 2010.

KAHN, H.; TASSINARI, M. M. M. L.; ULSEN, C.; ULIANA, D. Monazita em granulação fina. **Revista ABM - Metalurgia, Materiais & Mineração, Caderno Técnico 125**, v. 68, p.124–129, 2012.

KANAZAWA, Y.; KAMITANI, M. Rare earth minerals and resources in the world. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 408–412, p.1339–1343, 2006.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. Concentration Separation. **Introduction to Mineral Processing, Part IV**. p.250–322, 1982. John Wiley & Sons.

KIM, J.; DODDIBA, G.; TANIMURA, Y.; et al. Leaching of rare-earth elements and their adsorption by using blue-green algae. **Materials Transactions**, v. 52, n. 9, p.1799–1806, 2011.

KYNICKY, J.; SMITH, M. P.; XU, C. Diversity of rare earth deposits: the key example of China. **Elements**, v. 8, n. 5, p.361–367, 2012.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. Terras-raras no Brasil: depósitos, recursos identificados, reservas. **Série Estudos e Documentos, 21, CETEM**, p. 189, 1994. Rio de Janeiro: CETEM.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. **O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

LI, L. Z.; YANG, X. China's rare earth ore deposits and beneficiation techniques. 1st European Rare Earth Resources Conference (ERES). **Anais...** . p.26–36, 2014.

LIMA, P. C. R. **Terras-Raras: elementos estratégicos para o Brasil**. Brasília: Consultoria Legislativa - Câmara dos Deputados, 2012.

LONG, K. R.; GOSEN, B. S. V.; FOLEY, N. K.; CORDIER, D. The principal rare earth elements deposits of the United States: a summary of domestic deposits and a global perspective. **Scientific Investigations Report 2010–5220**, 96p., 2010. Reston: USGS.

LORENZI, M. L. B. **Caracterização mineralógica do depósito de terras raras no complexo alcalino-carbonatítico de Barra do Itapirapuã (SP/PR) - Área de detalhe I**, 102p., 1999. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica USP.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. Rio de

Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MARIANO, A. N. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. In: K. Bell (Ed.); **Carbonatites: genesis and evolution**. p.149–173, 1989. London: UNWIN HYMAN.

MARTINS, T. S.; ISOLANI, P. C. Terras raras: aplicações industriais e biológicas. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p.111–117, 2005.

MASSARI, S.; RUBERTI, M. Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies. **Resources Policy**, v. 38, n. 1, p.36–43, 2013.

METAL-PRICES. Metal Prices: Rare Earths. Disponível em: <<http://www.metalpages.com/metalprices/rareearths/>>. Acesso em: 1/5/2017.

MINDAT. Mineralogy Database. Disponível em: <<http://www.webmineral.com/>>. Acesso em: 1/5/2017.

MIYAWAKI, R.; NAKAI, I. Crystal chemical aspects of rare earth minerals. In: A. P. Jones; F. Wall; C. T. Williams (Eds.); **Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits**. p.21–40, 1996. London: Chapman & Hall.

MME. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM-2030)**. Brasília: MME/ SGM, 2010.

MOLDOVEANU, G. A.; PAPANGELAKIS, V. G. Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: I. desorption mechanism. **Hydrometallurgy**, v. 117–118, p.71–78, 2012.

MOLDOVEANU, G. A.; PAPANGELAKIS, V. G. Leaching of lanthanides from various weathered elution deposited ores. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 52, n. 3, p.257–264, 2013.

MORAIS, C. A.; BENEDETTO, J. S.; BARROS, L. A. F. Tratamento hidrometalúrgico do minério de terras raras de Catalão - Goiás. VI SHMMT / XVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME). **Anais...** . p.807–812, 2001.

MORTEANI, G.; PREINFALK, C. REE distribution and REE carriers in laterites formed on the alkaline complexes of Araxá and Catalão (Brazil). In: A. P. Jones; F. Wall; C. T. Williams (Eds.); **Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits**. p.227–255, 1996. London: Chapman & Hall.

NASCIMENTO, M.; TRINDADE, R. B. E.; SILVIO, E. Lixiviação de um concentrado de xenotima. XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME). **Anais...** , 2005.

NEUMANN, R. **Caracterização tecnológica dos potenciais minérios de terras-raras de Catalão I**, GO, 204p., 1999. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências. USP.

NEUMANN, R.; MEDEIROS, E. B. Comprehensive mineralogical and technological characterisation of the Araxá (SE Brazil) complex REE (Nb-P) ore, and the fate of its processing. **International Journal of Mineral Processing**, v. 144, p.1–10, 2015.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L. Prediction of monazite liberation from the silicified rare earth ore of Catalão I. **Minerals Engineering**, v. 14, n. 12, p.1601–1607, 2001.

NEUMANN, R.; VALARELLI, J. V. Technological characterization of the potential RE ores from Córrego do Garimpo, Catalão, Central Brazil. **Journal of African Earth Sciences - Carbonatite Workshop**, v. 32, n. 1, A27p., 2001.

NOLTE, J. **ICP Emission Spectrometry: a practical guide**. Wiley-VCH, 2003.

OLIVEIRA, S. M. B.; IMBERNON, R. A. L. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalao I carbonatite complex, central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 11, n. 4, p.379–388, 1998.

ORRIS, G. J.; GRAUCH, R. I. Rare earth element mines, deposits, and occurrences. **Open-File Report 02-189**, p.174, 2002. Denver: USGS.

OZBAYOGLU, G.; ATALAY, M. U. Beneficiation of bastnaesite by a multi-gravity separator. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 303–304, p.520–523, 2000.

PEELMAN, S.; SUN, Z. H.; SIETSMA, J.; YANG, Y. Leaching of rare earth elements: past and present. 1st European Rare Earth Resources Conference (ERES). **Anais...** . p.446–455, 2014.

PEIXOTO, R. H. C.; SANTOS, H. S. S. Lixiviação de monazita visando a extração de elementos de terras raras. XX Jornada de iniciação científica. **Anais...** . p.1–4, 2012. CETEM.

PIRES, A. C. **Xenotima, gagarinita, fluocerita e waimirita da Mina Pitinga (AM): mineralogia e avaliação preliminar do potencial do albita granito para exploração de elementos terras raras e ítrio**, 199p., 2010. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências. UFRGS.

RATTI, G. **Análises químicas na engenharia mineral**, 83p., 1999. Tese de Doutorado - Escola Politécnica. USP.

RIBEIRO, C. C. **Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO**, 472p, 2008. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências. UNB.

ROCHA, P. C. P.; TRINDADE, R. B. E. Extração de terras-raras do silicito de Catalão. VIII Seminário de metais não ferrosos. **Anais...** . p.243–254, 1993. ABM.

ROCIO, M. A. R.; SILVA, M. M. DA; CARVALHO, P. S. L. DE; CARDOSO, J. G. DA R. Terras-raras: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, v. 35, p.369–420, 2012. BNDES.

SANTAGOSTINO, L. M. **Caracterização tecnológica de um depósito mineral -**

Um estudo de caso: O nióbio de Catalão I, Goiás, 199p., 1996. Tese de Doutorado - Escola Politécnica. USP.

SCOPUS. Base de dados de resumos e citações de literaturas. Disponível em: <<https://www.scopus.com/>>. Acesso em: 1/5/2017.

SERRA, O. A. Terras Raras - Brasil x China. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 22, n. 5, p.809–812, 2011.

SERRAVERDE. O Projeto de Terras Raras. Disponível em: <<http://mineracaoserraverde.com.br/>>. Acesso em: 1/5/2017.

SMYTHE, D. M.; LOMBARD, A.; COETZEE, L. L. Rare Earth Element deportment studies utilising QEMSCAN technology. **Minerals Engineering**, v. 52, p.52–61, 2013.

SOUBIES, F.; MELFI, A. J.; AUTEFAGE, F. Comportamento geoquímico dos elementos terras raras nos alteritos da jazida de fosfato e titânio de Tapira (Minas Gerais, Brasil): a importância dos fosfatos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 1, n. 1, p.3–16, 1995.

SOUSA FILHO, P. C.; SERRA, O. A. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectiva. **Química Nova**, v. 37, n. 4, p.753–760, 2014.

TAKEHARA, L.; SHINTAKU, I.; RABELO, D. M.; SILVEIRA, F. V. **Avaliação do potencial de Terras Raras no Brasil**. Brasília: CPRM, 2015.

TASSINARI, M. M. L.; KAHN, H.; RATTI, G. Process mineralogy studies of Corrego do Garimpo REE ore, Catalão-I alkaline complex, Goiás, Brazil. **Minerals Engineering**, v. 14, n. 12, p.1609–1617, 2001.

TASSINARI, M. M. L. **Caracterização tecnológica do depósito de terras raras de Catalão I, GO. Áreas: Córrego do Garimpo e Lagoa Seca**, 157p., 2001. Tese de Doutorado - Escola Politécnica. USP.

TESTA, F. G.; AVELAR, A. N.; SILVA, R. G.; SOUZA, C. C. Caracterização mineralógica e alternativa para beneficiamento de litotipos mineralizados em terras raras do complexo alcalino de Catalão. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 14, n. 1, p.46–53, 2017.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; FONTAN, F.; FERRARI, V. C. Mineralogia, morfologia e cristalquímica da monazita de Catalão I (GO, Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 1, p.135–146, 2004.

TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. Ocorrência e variabilidade de composição dos fosfatos do grupo da monazita em carbonatitos. **Pesquisas em Geociências**, v. 30, n. 1, p.83–98, 2003.

USGS. Rare Earths. **Mineral Commodity Summaries**. p.134–135, 2017. USGS.

VIERA, E. V.; LINS, F. F. Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão.

Série Tecnologia Mineral, 73, CETEM, 53p., 1997. Rio de Janeiro: CETEM.

VILLELA, M. CBMM anuncia exploração de Terras Raras. Disponível em: <<http://noticiasmineracao.mining.com/2016/11/01/cbmm-surpreende-e-anuncia-exploracao-de-terras-raras/>>. Acesso em: 1/5/2017.

VLASOV, K. A. Rare elements in the earth's crust. In: K. A. Vlasov (Ed.); **Geochemistry of Rare Elements - Geochemistry and Mineralogy of Rare Elements and Genetic Types of Their Deposits**. 688p., 1966. Jerusalem: State Geological Committee of the USSR.

WABER, N. The supergene thorium and rare-earth element deposit at Morro do Ferro, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, n. 1–3, p.113–157, 1992.

WALTERS, A.; LUSTY, P. Rare earth Elements. **British Geological Survey - Commodity Profile**, 54p., 2011.

WEDOW JUNIOR, H. The Morro do Ferro thorium and rare-earth ore deposit, Poços de Caldas, Brazil. **Geological Survey Bulletin 1185-D**, 34p., 1967. USGS.

WU, C.; YUAN, Z.; BAI, G. Rare earth deposits in China. In: A. P. Jones; F. Wall; C. T. Williams (Eds.); **Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits**. p.281–310, 1996. London: Chapman & Hall.

WÜBBEKE, J. Rare earth elements in China: policies and narratives of reinventing an industry. **Resources Policy**, v. 38, n. 3, p.1–11, 2013.

XIE, F.; ZHANG, T. A.; DREISINGER, D.; DOYLE, F. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. **Minerals Engineering**, v. 56, p.10–28, 2014.

XIE, Y.; HOU, Z.; YIN, S.; et al. Continuous carbonatitic melt-fluid evolution of a REE mineralization system: Evidence from inclusions in the Maoniuping REE Deposit, Western Sichuan, China. **Ore Geology Reviews**, v. 36, n. 1–3, p.90–105, 2009.

YU, B.; CHE, X.; ZHENG, Q. Flotation of ultra-fine rare-earth minerals with selective flocculant PDHA. **Minerals Engineering**, v. 60, p.23–25, 2014.

ZAWISZA, B.; PYTLAKOWSKA, K.; FEIST, B.; et al. Determination of rare earth elements by spectroscopic techniques: a review. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 26, n. 12, p.2373–2390, 2011.

ZHANG, J.; EDWARDS, C. Mineral decomposition and leaching processes for treating rare earth ore concentrates. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 52, n. 3, p.243–248, 2013.

ZHANG, J.; ZHAO, B.; SCHREINER, B. Rare Earth Beneficiation and Hydrometallurgical Processing. **Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements**. p.19–54, 2016. Springer.

APÊNDICE A

Granuloquímica das amostras bulk e após cominuição

Tabela 23 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A1 bulk (sem tosize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+0,60	9,5	9,5	1,10	0,25	0,39	0,33	0,13	0,28	2,76	64,9	5,41	0,92	1,36	0,85	<0,10	6,32	4,71	3,68	0,47	<0,10	6,13
-0,60+0,30	7,8	17,3	1,35	0,32	0,49	0,40	0,14	0,34	4,11	59,7	6,51	0,92	1,35	0,67	<0,10	6,75	5,55	4,10	0,54	<0,10	6,88
-0,30+0,15	12,0	29,3	1,43	0,35	0,53	0,40	0,14	0,42	5,95	52,0	7,53	1,18	1,27	0,52	<0,10	8,41	6,70	4,73	0,67	<0,10	7,91
-0,15+0,074	10,8	40,1	1,65	0,43	0,65	0,42	0,15	0,51	6,23	46,8	7,42	1,31	1,28	0,46	<0,10	11,7	7,20	5,32	0,71	<0,10	8,21
-0,074+0,037	10,9	50,9	2,26	0,56	0,95	0,57	0,18	0,55	5,73	42,8	8,64	1,29	1,42	0,42	<0,10	12,0	7,98	5,79	0,77	<0,10	9,65
-0,037+0,020	9,3	60,2	2,72	0,69	1,15	0,68	0,20	0,62	5,03	39,7	9,40	1,27	1,52	0,38	<0,10	11,0	8,79	6,22	0,78	<0,10	10,6
Underflow1	21,9	82,2	3,88	0,90	1,70	1,04	0,24	0,70	3,54	47,1	9,24	0,87	1,88	0,33	<0,10	6,59	7,72	4,30	0,62	0,14	11,9
Underflow2	5,2	87,4	4,13	0,93	1,79	1,16	0,26	0,56	3,73	53,0	7,80	0,76	2,27	0,35	<0,10	4,54	6,53	3,05	0,54	0,14	12,7
Overflow	12,6	100,0	4,00	0,82	1,80	1,13	0,25	0,45	3,80	56,5	8,23	0,59	2,20	0,34	<0,10	3,20	5,24	1,95	0,36	0,14	12,9
Total cal.	100,0		2,63	0,61	1,11	0,71	0,19	0,51	4,51	50,7	8,01	1,00	1,63	0,46	<0,10	7,80	6,84	4,36	0,61	...	9,88

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+0,60	4,0	5,8	12,2	6,4	7,7	6,6	8,0	0,23	0,63	0,20
-0,60+0,30	4,0	7,1	9,2	6,3	6,7	6,3	7,3	0,24	0,66	0,17
-0,30+0,15	6,5	15,8	12,3	11,3	12,9	11,7	13,0	0,21	0,66	0,18
-0,15+0,074	6,8	14,9	9,9	10,0	16,1	11,3	13,1	0,23	0,66	0,18
-0,074+0,037	9,4	13,8	9,2	11,7	16,8	12,7	14,5	0,28	0,59	0,16
-0,037+0,020	9,6	10,4	7,3	10,9	13,1	12,0	13,3	0,31	0,60	0,14
Underflow1	32,4	17,2	20,4	25,3	18,5	24,7	21,6	0,50	0,53	0,11
Underflow2	8,1	4,3	5,4	5,0	3,0	4,9	3,6	0,63	0,52	0,12
Overflow	19,2	10,7	14,1	13,0	5,2	9,7	5,7	0,76	0,46	0,11
Total cal.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,38	0,55	0,15

Tabela 24 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A1 moída a -0,30 mm e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	
-0,30+0,15	19,1	19,1	1,15	7,63	56,0	6,44	1,06	<0,10	7,75	5,81	4,10	5,49	8,1	28,8	21,1	15,5	18,7	16,0	18,0	
-0,15+0,074	15,4	34,5	1,66	5,56	50,0	7,48	1,17	<0,10	10,5	6,87	4,95	7,70	9,4	16,9	15,2	14,6	20,4	15,3	17,5	
-0,074+0,037	13,0	47,5	2,09	5,19	44,7	8,10	1,17	<0,10	11,5	7,57	5,65	8,75	10,0	13,4	11,5	13,4	19,0	14,3	16,9	
-0,037+0,020	8,5	56,0	2,42	5,45	40,8	8,86	1,34	<0,10	11,7	9,07	6,61	9,67	7,5	9,1	6,8	9,5	12,5	11,1	12,9	
Underflow1	19,9	75,9	3,74	3,62	46,3	9,39	0,95	<0,10	7,43	8,20	4,96	10,9	27,4	14,3	18,2	23,6	18,8	23,7	22,7	
Overflow NAT	23,0	98,9	4,28	3,68	57,4	7,61	0,66	<0,10	3,38	5,56	2,10	11,8	36,2	16,7	26,0	22,1	9,9	18,5	11,1	
Overflow PM	1,1	100,0	3,22	3,45	53,5	9,87	1,10	<0,10	4,78	6,45	3,32	10,9	1,3	0,8	1,2	1,4	0,7	1,0	0,9	
Total cal.	100,0		2,72	5,05	50,7	7,92	1,00	<0,10	7,88	6,90	4,35	9,19	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo.

Tabela 25 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A2 bulk (sem topsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+0,60	8,6	8,6	2,03	0,50	0,85	0,51	0,16	0,40	17,5	36,0	8,53	0,85	0,98	0,34	<0,10	10,3	8,30	5,32	0,95	<0,10	7,73
-0,60+0,30	7,7	16,3	2,10	0,52	0,89	0,52	0,17	0,45	17,7	34,7	8,62	1,13	1,05	0,33	<0,10	10,7	8,46	5,17	0,94	<0,10	7,80
-0,30+0,15	11,6	27,9	2,08	0,53	0,89	0,51	0,16	0,48	20,6	29,3	8,87	1,93	1,01	0,33	<0,10	11,0	9,15	5,18	1,00	<0,10	7,68
-0,15+0,074	11,1	39,0	2,38	0,62	1,03	0,56	0,17	0,52	20,8	27,1	8,62	2,31	1,06	0,32	0,10	12,5	9,41	5,13	1,00	<0,10	7,87
-0,074+0,037	11,5	50,5	3,12	0,80	1,38	0,74	0,20	0,54	20,4	26,9	8,83	1,45	1,15	0,28	0,12	12,2	9,05	5,08	0,96	<0,10	8,51
-0,037+0,020	9,5	59,9	3,63	0,92	1,60	0,87	0,24	0,57	20,4	26,9	9,28	1,05	1,17	0,22	0,12	11,1	9,39	5,30	0,99	<0,10	9,07
Underflow1	19,5	79,5	5,28	1,26	2,35	1,34	0,32	0,66	14,7	32,0	9,83	0,91	1,26	0,20	<0,10	8,07	9,56	4,68	0,99	0,16	10,2
Underflow2	5,2	84,7	5,68	1,32	2,58	1,45	0,33	0,61	13,9	37,9	9,00	0,89	1,45	0,26	<0,10	5,91	8,94	3,91	0,98	0,18	10,4
Overflow	15,3	100,0	5,68	1,15	2,84	1,40	0,30	0,52	8,67	43,9	9,98	0,74	1,62	0,26	<0,10	4,81	7,58	2,99	0,81	0,17	12,4
Total calc.	100,0		3,74	0,88	1,70	0,92	0,23	0,54	16,8	32,7	9,19	1,24	1,21	0,27	...	9,45	8,89	4,69	0,95	...	9,30

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+0,60	4,7	9,0	9,4	8,0	9,4	8,0	9,8	0,24	0,59	0,10
-0,60+0,30	4,3	8,1	8,1	7,2	8,7	7,3	8,5	0,25	0,58	0,13
-0,30+0,15	6,4	14,2	10,4	11,2	13,5	11,9	12,8	0,23	0,60	0,21
-0,15+0,074	7,1	13,8	9,2	10,4	14,7	11,8	12,2	0,25	0,60	0,25
-0,074+0,037	9,6	14,0	9,4	11,0	14,8	11,7	12,5	0,35	0,58	0,16
-0,037+0,020	9,2	11,5	7,8	9,6	11,1	10,0	10,7	0,39	0,57	0,11
Underflow1	27,5	17,1	19,1	20,9	16,7	21,0	19,5	0,55	0,54	0,10
Underflow2	7,9	4,3	6,1	5,1	3,3	5,3	4,4	0,64	0,51	0,10
Overflow	23,2	7,9	20,5	16,6	7,8	13,0	9,7	0,75	0,41	0,10
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,42	0,52	0,14

Tabela 26 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A2 moída a -0,30 mm e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	
-0,30+0,15	18,6	18,6	1,92	25,6	29,7	7,70	1,50	<0,10	10,0	7,97	4,78	7,10	9,7	23,4	17,5	16,4	20,4	17,3	19,2	
-0,15+0,074	15,3	33,8	2,21	25,1	27,6	8,02	1,77	<0,10	11,2	8,52	5,01	7,42	9,1	18,9	13,4	14,1	18,8	15,2	16,5	
-0,074+0,037	13,6	47,4	2,65	24,2	26,2	8,47	1,28	0,11	11,5	8,54	5,16	7,81	9,8	16,2	11,3	13,2	17,1	13,6	15,1	
-0,037+0,020	9,3	56,7	2,97	25,5	24,7	8,45	1,05	0,11	11,7	9,03	5,64	7,72	7,5	11,8	7,3	9,1	12,0	9,9	11,4	
Underflow1	20,4	77,1	4,95	16,5	31,3	9,52	0,90	<0,10	8,29	9,33	4,83	9,59	27,4	16,6	20,2	22,3	18,6	22,3	21,2	
Overflow NAT	20,9	98,0	6,00	11,1	42,1	9,31	0,82	<0,10	5,16	8,13	3,32	10,8	34,0	11,4	27,9	22,3	11,8	19,9	15,0	
Overflow PM	2,0	100,0	4,43	16,2	36,9	11,4	0,80	<0,10	5,69	7,71	3,72	10,8	2,5	1,6	2,4	2,7	1,3	1,8	1,6	
Total cal.	100,0		3,68	20,2	31,5	8,71	1,19	...	9,10	8,54	4,63	8,67	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Tabela 27 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A3 bulk (sem toposize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+1,19	3,7	3,7	1,37	0,30	0,76	0,18	0,14	0,26	18,7	52,2	9,65	0,14	1,12	0,24	<0,10	1,25	2,68	1,49	0,36	<0,10	10,0
-1,19+0,30	6,5	10,2	0,93	0,23	0,46	0,14	0,10	0,30	45,4	31,2	8,91	0,14	1,12	0,17	<0,10	1,24	2,16	1,31	0,31	<0,10	6,92
-0,30+0,15	5,3	15,5	0,82	0,23	0,44	0,16	<0,10	0,30	57,5	19,3	8,78	0,18	1,13	0,14	0,14	1,48	2,06	1,28	0,29	<0,10	6,45
-0,15+0,074	6,5	22,0	0,87	0,26	0,45	0,16	<0,10	0,36	56,3	17,6	10,3	0,15	1,05	0,22	0,28	2,17	2,18	1,41	0,29	<0,10	7,11
-0,074+0,037	6,5	28,5	0,92	0,29	0,46	0,17	<0,10	0,41	56,9	15,3	10,3	0,15	1,00	0,24	0,48	2,87	2,33	1,56	0,30	<0,10	6,63
-0,037+0,020	7,2	35,7	1,11	0,35	0,48	0,19	0,10	0,42	47,3	14,8	17,5	0,16	0,88	0,29	0,94	2,84	2,59	1,74	0,30	<0,10	9,18
Underflow1	17,3	52,9	1,56	0,49	0,64	0,30	0,13	0,45	30,6	18,8	25,1	0,18	0,82	0,31	1,07	3,35	3,35	2,15	0,35	<0,10	11,9
Underflow2	7,0	59,9	1,47	0,44	0,60	0,31	0,12	0,33	29,7	18,8	27,2	0,18	0,71	0,37	1,45	2,70	2,73	1,54	0,27	<0,10	12,3
Overflow	40,1	100,0	1,42	0,36	0,66	0,28	0,11	0,26	28,9	20,0	28,9	0,17	0,70	0,26	0,82	1,95	1,95	0,87	0,20	<0,10	13,4
Total calc.	100,0		1,29	0,36	0,59	0,25	...	0,33	36,4	20,7	21,8	0,17	0,84	0,26	...	2,29	2,38	1,35	0,27	<0,10	11,0

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+1,19	3,9	1,9	9,2	1,6	2,0	4,1	4,0	0,51	0,39	0,05
-1,19+0,30	4,7	8,2	9,8	2,7	3,6	5,9	6,4	0,43	0,51	0,06
-030+0,15	3,4	8,4	4,9	2,1	3,4	4,6	5,0	0,40	0,52	0,09
-0,15+0,074	4,3	10,0	5,5	3,1	6,1	5,9	6,7	0,40	0,59	0,07
-0,074+0,037	4,7	10,2	4,8	3,1	8,2	6,4	7,5	0,40	0,64	0,06
-0,037+0,020	6,2	9,3	5,1	5,8	8,9	7,8	9,2	0,43	0,73	0,06
Underflow1	20,8	14,5	15,6	19,8	25,3	24,3	27,4	0,46	0,77	0,05
Underflow2	7,9	5,7	6,3	8,7	8,3	8,0	8,0	0,54	0,74	0,07
Overflow	44,1	31,8	38,6	53,1	34,2	32,9	25,8	0,73	0,54	0,09
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,54	0,61	0,07

Tabela 28 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A4 bulk (sem toposize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+1,19	7,0	7,0	1,68	0,64	0,76	0,14	0,14	0,32	9,00	37,8	14,1	0,33	1,57	0,30	<0,10	1,89	11,8	8,31	1,65	<0,10	10,4
-1,19+0,30	9,4	16,4	1,54	0,54	0,70	0,16	0,14	0,45	7,11	50,3	10,1	0,25	1,76	0,23	<0,10	2,13	8,32	5,81	1,08	<0,10	9,97
-0,30+0,15	5,6	21,9	2,02	0,69	0,95	0,23	0,15	0,58	12,0	39,2	11,4	0,30	2,46	0,18	<0,10	3,87	9,20	6,53	1,19	<0,10	10,5
-0,15+0,074	6,0	28,0	2,41	0,79	1,15	0,30	0,17	0,75	14,0	33,9	11,5	0,31	2,69	0,19	<0,10	5,93	9,37	6,67	1,18	<0,10	10,8
-0,074+0,037	6,9	34,9	3,15	1,00	1,55	0,41	0,20	0,84	13,7	30,3	12,1	0,34	2,72	0,16	<0,10	6,86	9,89	6,91	1,22	<0,10	10,7
-0,037+0,020	6,4	41,3	3,90	1,24	1,91	0,53	0,23	0,87	14,2	28,2	12,6	0,36	2,63	0,14	<0,10	6,27	10,5	7,10	1,22	0,11	11,2
Underflow1	19,7	61,0	5,22	1,55	2,59	0,78	0,31	0,95	9,94	33,7	12,8	0,44	2,52	0,20	0,10	3,96	10,2	6,37	1,11	0,18	11,5
Underflow2	6,6	67,6	5,01	1,34	2,60	0,77	0,30	0,95	9,61	41,0	12,2	0,35	2,65	0,22	<0,10	3,01	7,24	3,96	0,75	0,19	12,1
Overflow	32,4	100,0	5,22	1,17	2,95	0,81	0,30	0,95	10,8	43,7	12,5	0,32	3,19	0,15	<0,10	2,65	5,00	2,26	0,49	0,20	12,3
Total calc.	100,0		4,04	1,10	2,11	0,58	0,25	0,81	10,7	39,0	12,3	0,34	2,64	0,19	...	3,62	8,15	5,07	0,94	...	11,4

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+1,19	2,9	5,9	6,8	8,0	3,7	10,1	11,5	0,14	0,84	0,03
-1,19+0,30	3,6	6,2	12,1	7,7	5,5	9,6	10,7	0,19	0,78	0,03
-030+0,15	2,8	6,2	5,6	5,2	5,9	6,3	7,1	0,22	0,72	0,03
-0,15+0,074	3,6	7,9	5,3	5,7	9,9	7,0	7,9	0,26	0,69	0,03
-0,074+0,037	5,4	8,9	5,4	6,8	13,1	8,4	9,4	0,32	0,64	0,03
-0,037+0,020	6,2	8,4	4,6	6,5	11,0	8,2	8,9	0,37	0,65	0,03
Underflow1	25,5	18,2	17,0	20,6	21,6	24,7	24,8	0,51	0,60	0,04
Underflow2	8,2	5,9	7,0	6,6	5,5	5,9	5,2	0,69	0,51	0,05
Overflow	41,9	32,5	36,3	32,9	23,7	19,9	14,4	1,04	0,40	0,06
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,50	0,52	0,04

Tabela 29 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A5 bulk (sem toptsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+1,19	4,8	4,8	3,41	0,71	1,92	0,56	0,22	0,23	14,7	36,2	15,6	0,20	4,68	0,22	0,19	2,31	5,69	4,13	0,61	<0,10	11,9
-1,19+0,30	8,6	13,4	3,03	0,54	1,79	0,48	0,21	0,17	18,5	36,4	14,3	0,18	4,32	0,20	0,25	2,18	4,34	3,23	0,38	<0,10	12,4
-0,30+0,15	4,9	18,3	3,04	0,59	1,69	0,53	0,23	0,21	23,5	31,9	13,8	0,21	3,94	0,19	0,27	3,02	4,30	3,23	0,33	<0,10	11,8
-0,15+0,074	4,5	22,9	2,93	0,59	1,60	0,51	0,23	0,26	23,8	30,0	14,0	0,26	2,78	0,21	0,33	4,26	4,92	3,70	0,37	<0,10	12,0
-0,074+0,037	6,4	29,2	3,03	0,64	1,59	0,54	0,26	0,31	20,5	28,1	16,8	0,23	1,79	0,22	0,45	5,52	5,68	4,12	0,41	<0,10	12,1
-0,037+0,020	6,6	35,8	2,55	0,60	1,26	0,50	0,19	0,25	21,5	25,0	21,3	0,22	1,26	0,27	0,53	4,16	4,99	3,63	0,36	<0,10	13,6
Underflow1	17,3	53,1	2,56	0,63	1,25	0,49	0,19	0,25	21,4	25,1	23,7	0,22	0,91	0,26	0,53	3,78	4,60	3,18	0,32	<0,10	13,0
Underflow2	7,3	60,4	2,06	0,49	1,02	0,40	0,16	0,18	25,1	23,8	25,8	0,19	0,78	0,35	0,79	2,80	2,86	1,69	0,20	<0,10	13,1
Overflow	39,6	100,0	2,27	0,47	1,19	0,46	0,16	0,15	26,4	23,0	27,7	0,18	0,91	0,22	0,46	2,05	1,76	0,71	0,13	<0,10	13,8
Total calc.	100,0		2,56	0,55	1,34	0,48	0,19	0,20	23,2	26,4	22,7	0,20	1,69	0,24	0,45	2,94	3,47	2,26	0,27	<0,10	13,1

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+1,19	6,4	3,0	6,6	3,3	3,8	7,9	8,8	0,60	0,37	0,04
-1,19+0,30	10,2	6,8	11,8	5,4	6,4	10,7	12,3	0,70	0,30	0,04
-030+0,15	5,8	5,0	5,9	3,0	5,0	6,1	7,0	0,71	0,35	0,05
-0,15+0,074	5,2	4,6	5,2	2,8	6,6	6,4	7,4	0,60	0,37	0,05
-0,074+0,037	7,5	5,6	6,8	4,7	12,0	10,4	11,6	0,53	0,41	0,04
-0,037+0,020	6,6	6,1	6,2	6,2	9,4	9,5	10,6	0,51	0,48	0,04
Underflow1	17,3	15,9	16,4	18,0	22,3	22,9	24,3	0,56	0,51	0,05
Underflow2	5,9	7,9	6,6	8,3	7,0	6,0	5,5	0,72	0,48	0,07
Overflow	35,2	45,0	34,5	48,3	27,7	20,1	12,5	1,29	0,40	0,10
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,74	0,41	0,06

Tabela 30 – Resultado da análise granuloquímica na amostra B1 bulk (topsize de 1,19 mm) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
-1,19+0,60	21,8	21,8	1,03	0,28	0,58	0,17	<0,10	0,12	15,5	34,7	1,28	6,08	0,48	1,42	<0,10	35,4	0,94	0,48	<0,10	<0,10	1,18
-0,60+0,30	16,5	38,3	0,96	0,26	0,55	0,15	<0,10	0,12	13,7	36,7	1,61	6,05	0,49	1,52	<0,10	35,0	0,94	0,46	<0,10	<0,10	1,18
-0,30+0,15	15,9	54,2	0,93	0,26	0,52	0,15	<0,10	0,12	12,7	36,1	2,04	6,07	0,53	1,51	<0,10	35,1	1,10	0,52	0,11	<0,10	1,83
-0,15+0,074	11,0	65,2	1,00	0,30	0,52	0,17	<0,10	0,11	15,1	35,0	3,03	4,69	0,64	1,64	<0,10	32,2	1,40	0,55	0,12	<0,10	2,90
-0,074+0,037	8,0	73,2	1,10	0,32	0,57	0,21	<0,10	0,10	18,9	34,0	4,08	2,57	0,77	1,73	<0,10	29,2	1,76	0,55	0,12	<0,10	4,60
-0,037+0,020	5,0	78,2	1,26	0,37	0,64	0,25	<0,10	0,10	20,8	32,6	5,13	1,62	0,76	1,24	<0,10	26,9	2,03	0,56	0,12	<0,10	6,09
Underflow1	10,5	88,7	1,90	0,55	0,81	0,40	0,13	<0,10	16,6	36,3	7,10	1,06	0,70	0,66	<0,10	23,4	2,70	0,59	0,14	<0,10	8,30
Underflow2	2,9	91,7	2,10	0,61	0,86	0,47	0,17	<0,10	16,3	38,9	8,55	0,80	0,70	0,53	<0,10	19,2	2,97	0,56	0,15	<0,10	9,57
Overflow	8,3	100,0	2,09	0,58	0,85	0,49	0,17	<0,10	14,6	42,0	12,4	0,60	0,66	0,35	<0,10	13,0	2,80	0,38	...	<0,10	11,4
Total calc.	100,0		1,23	0,35	0,62	0,23	...	0,09	15,3	36,0	3,81	4,28	0,59	1,30	<0,10	30,4	1,54	0,51	0,07	<0,10	3,84

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
-1,19+0,60	18,3	22,1	21,0	7,3	31,0	25,4	13,4	1,10	0,48	6,47
-0,60+0,30	12,9	14,7	16,8	7,0	23,4	19,0	10,1	1,02	0,48	6,44
-0,30+0,15	12,0	13,2	15,9	8,5	22,6	18,3	11,4	0,84	0,50	5,52
-0,15+0,074	8,9	10,8	10,6	8,7	12,0	11,6	10,0	0,71	0,58	3,35
-0,074+0,037	7,2	9,9	7,6	8,6	4,8	7,7	9,2	0,63	0,57	1,46
-0,037+0,020	5,2	6,8	4,5	6,7	1,9	4,4	6,6	0,62	0,58	0,80
Underflow1	16,3	11,4	10,6	19,6	2,6	8,1	18,5	0,70	0,68	0,39
Underflow2	5,0	3,1	3,2	6,6	0,5	1,9	5,7	0,71	0,71	0,27
Overflow	14,2	7,9	9,7	27,0	1,2	3,6	15,2	0,75	0,69	0,21
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,80	0,56	2,78

Tabela 31 – Resultado da análise granuloquímica na amostra B1 moída a -0,30 mm e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)						
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅
-0,30+0,21	16,0	16,0	0,93	14,2	37,5	1,08	6,53	<0,10	34,0	0,80	0,45	1,14	11,7	15,0	16,5	4,6	24,4	18,0	8,4
-0,21+0,15	17,0	33,1	0,93	13,6	36,8	1,51	6,60	<0,10	34,6	0,90	0,48	1,30	12,5	15,3	17,2	6,8	26,2	19,5	10,0
-0,15+0,074	19,1	52,1	0,95	14,8	35,9	1,77	5,79	<0,10	33,5	1,06	0,48	2,14	14,2	18,6	18,9	9,0	25,8	21,1	13,2
-0,074+0,037	12,5	64,7	1,04	17,4	34,3	2,56	3,98	<0,10	33,0	1,38	0,54	3,19	10,3	14,3	11,8	8,5	11,6	13,6	11,3
-0,037+0,020	7,2	71,8	1,16	18,7	31,9	3,43	2,75	<0,10	32,1	1,67	0,57	4,29	6,6	8,8	6,3	6,5	4,6	7,6	7,8
Underflow1	11,2	83,0	1,76	15,7	34,0	5,38	1,58	<0,10	28,8	2,43	0,61	6,50	15,5	11,6	10,5	16,0	4,1	10,7	17,8
Overflow NAT	15,8	98,8	2,18	14,7	41,6	11,4	0,67	<0,10	15,0	2,87	0,44	10,6	27,0	15,3	18,0	47,6	2,5	7,8	29,6
Overflow PM	1,2	100,0	2,28	15,2	22,3	3,42	2,69	<0,10	44,9	2,33	0,68	4,68	2,1	1,2	0,7	1,1	0,7	1,8	1,8
Total cal.	100,0		1,27	15,2	36,3	3,77	4,29	<0,10	30,3	1,53	0,50	3,97	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo.

Tabela 32 – Resultado da análise granuloquímica na amostra B2 bulk (topsize de 1,19 mm) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
-1,19+0,60	13,9	13,9	1,11	0,30	0,60	0,20	<0,10	0,27	0,44	48,2	2,24	1,45	0,94	2,62	<0,10	36,5	2,54	0,53	0,14	<0,10	1,68
-0,60+0,30	13,3	27,2	0,98	0,28	0,53	0,18	<0,10	0,29	0,91	49,5	2,29	1,69	0,92	2,71	<0,10	34,8	2,66	0,54	0,18	<0,10	1,91
-0,30+0,15	14,5	41,7	1,03	0,31	0,54	0,18	<0,10	0,32	1,63	48,3	2,73	2,43	0,98	3,01	<0,10	31,6	3,35	0,55	0,22	<0,10	2,39
-0,15+0,074	12,0	53,7	1,21	0,35	0,63	0,23	<0,10	0,41	4,04	43,5	3,36	3,31	1,16	3,62	<0,10	29,9	4,52	0,57	0,30	<0,10	2,64
-0,074+0,037	9,6	63,4	1,45	0,42	0,76	0,28	<0,10	0,43	9,83	37,5	4,13	3,10	1,36	3,21	<0,10	27,0	5,14	0,63	0,42	<0,10	4,25
-0,037+0,020	7,9	71,2	1,89	0,48	0,92	0,36	0,13	0,40	14,5	36,3	5,82	2,43	1,46	1,96	<0,10	21,4	5,65	0,67	0,53	<0,10	6,68
Underflow1	12,3	83,5	2,57	0,66	1,21	0,51	0,19	0,40	10,7	40,0	7,73	2,06	1,35	0,76	<0,10	15,8	7,13	0,77	0,75	<0,10	9,65
Underflow2	4,6	88,2	2,67	0,66	1,24	0,57	0,20	0,37	8,11	41,5	9,67	1,95	1,35	0,41	<0,10	11,4	7,79	0,73	0,76	<0,10	11,6
Overflow	11,8	100,0	2,35	0,54	1,11	0,52	0,18	0,36	7,82	47,6	10,2	1,51	1,27	0,31	<0,10	9,14	6,23	0,48	0,54	<0,10	12,5
Total calc.	100,0		1,58	0,42	0,79	0,31	...	0,35	5,61	44,5	4,87	2,19	1,16	2,21	<0,10	25,7	4,65	0,59	0,38	<0,10	5,29

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
-1,19+0,60	9,7	1,1	15,1	6,4	9,2	19,7	7,6	0,44	0,50	0,57
-0,60+0,30	8,2	2,2	14,8	6,2	10,3	18,0	7,6	0,37	0,53	0,64
-0,30+0,15	9,5	4,2	15,8	8,1	16,1	17,9	10,5	0,31	0,57	0,73
-0,15+0,074	9,1	8,6	11,7	8,3	18,1	13,9	11,7	0,27	0,55	0,73
-0,074+0,037	8,8	16,9	8,1	8,2	13,6	10,1	10,6	0,28	0,56	0,60
-0,037+0,020	9,3	20,3	6,4	9,4	8,7	6,5	9,5	0,33	0,52	0,43
Underflow1	20,0	23,5	11,1	19,6	11,6	7,6	18,9	0,36	0,54	0,29
Underflow2	7,8	6,7	4,3	9,2	4,1	2,1	7,7	0,34	0,53	0,25
Overflow	17,5	16,5	12,7	24,7	8,2	4,2	15,8	0,38	0,48	0,24
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,34	0,53	0,47

Tabela 33 – Resultado da análise granuloquímica na amostra B2 moída a -0,30 mm e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	
-0,30+0,21	15,5	15,5	0,90	1,25	52,3	1,56	1,83	<0,10	32,5	2,51	0,50	1,62	8,8	3,4	18,0	5,0	12,9	20,1	8,5	
-0,21+0,15	11,7	27,2	0,95	1,26	51,2	2,02	2,09	<0,10	31,7	2,78	0,50	1,80	7,0	2,6	13,3	4,9	11,1	14,8	7,1	
-0,15+0,074	17,4	44,6	1,09	2,89	46,5	2,35	2,77	<0,10	31,8	3,62	0,53	2,15	12,0	8,9	18,0	8,5	22,0	22,1	13,8	
-0,074+0,037	12,4	57,1	1,26	7,24	40,0	3,27	2,77	<0,10	30,3	4,29	0,60	3,42	9,9	15,9	11,0	8,5	15,7	15,0	11,7	
-0,037+0,020	8,0	65,1	1,66	11,5	37,0	4,37	2,35	<0,10	26,2	4,86	0,65	5,53	8,4	16,3	6,6	7,3	8,6	8,4	8,5	
Underflow1	13,5	78,6	2,38	9,92	39,7	6,98	2,12	<0,10	18,8	6,60	0,77	8,32	20,3	23,6	11,9	19,7	13,1	10,1	19,6	
Overflow NAT	20,8	99,5	2,50	7,94	45,4	10,5	1,68	<0,10	10,2	6,60	0,56	11,9	32,8	29,1	21,0	45,6	16,0	8,5	30,1	
Overflow PM	0,5	100,0	2,79	2,07	28,4	3,99	2,52	<0,10	44,6	5,03	0,79	5,79	0,9	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0	0,6	
Total cal.	100,0		1,59	5,68	45,1	4,80	2,19	<0,10	25,1	4,56	0,58	5,34	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo.

Tabela 34 – Resultado da análise granuloquímica na amostra C1 bulk (sem topsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+1,19	13,8	13,8	4,96	0,57	3,61	0,56	0,23	0,16	5,29	60,1	7,17	0,18	7,68	<0,10	1,12	4,33	0,35	0,19	<0,10	0,57	5,75
-1,19+0,30	14,0	27,7	5,79	1,05	3,68	0,77	0,29	0,22	9,86	48,3	12,2	0,12	5,65	0,11	1,45	4,39	0,50	0,16	<0,10	0,87	7,90
-0,30+0,074	10,8	38,6	6,20	1,56	3,37	0,93	0,34	0,26	14,3	36,4	18,9	0,27	3,33	0,16	1,78	4,14	0,65	0,12	<0,10	1,03	10,4
-0,074+0,020	10,7	49,3	4,93	1,43	2,40	0,81	0,29	0,25	20,3	22,2	28,4	0,37	1,57	0,25	2,52	2,97	0,64	<0,10	<0,10	0,87	13,0
Underflow1	27,2	76,5	3,00	0,91	1,40	0,51	0,17	0,16	34,4	10,9	31,9	0,18	0,57	0,30	3,75	1,49	0,54	<0,10	<0,10	0,58	11,3
Underflow2	5,4	81,9	2,22	0,72	0,97	0,40	0,13	0,10	38,1	7,80	33,0	0,30	0,36	0,33	3,88	0,83	0,44	<0,10	<0,10	0,49	11,9
Overflow	18,1	100,0	2,31	0,77	0,99	0,41	0,14	<0,10	38,2	7,61	33,9	0,15	0,35	0,31	2,92	0,53	0,38	<0,10	<0,10	0,69	12,1
Total calc.	100,0		4,05	0,97	2,25	0,61	0,22	...	24,2	26,1	24,4	0,20	2,61	...	2,58	2,52	0,50	...	<0,10	0,71	10,3

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+1,19	16,9	3,0	31,7	4,1	6,0	23,7	9,7	14,2	0,16	0,51
-1,19+0,30	20,0	5,7	25,8	7,0	7,8	24,3	14,1	11,6	0,29	0,24
-0,30+0,074	16,6	6,4	15,1	8,4	7,5	17,8	14,2	9,54	0,46	0,42
-0,074+0,020	13,1	9,0	9,1	12,5	10,5	12,6	13,8	7,71	0,60	0,58
Underflow1	20,1	38,7	11,4	35,5	39,5	16,1	29,6	5,55	0,65	0,33
Underflow2	3,0	8,5	1,6	7,3	8,1	1,8	4,8	5,05	0,75	0,68
Overflow	10,3	28,6	5,3	25,2	20,5	3,8	13,9	6,07	0,78	0,39
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,15	0,43	0,41

Tabela 35 – Resultado da análise granuloquímica na amostra C1 moída a -0,125 mm e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)						
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
+0,125	11,1	11,1	4,71	3,79	61,0	6,41	0,11	0,85	5,31	0,39	0,18	6,49	13,1	1,8	26,1	2,9	3,7	23,5	8,7
-0,125+0,074	13,4	24,5	5,70	9,05	47,2	12,9	0,13	1,33	4,38	0,53	0,15	9,60	19,1	5,1	24,4	7,2	7,0	23,4	14,3
-0,074+0,037	9,3	33,8	5,69	14,0	37,5	18,8	0,14	1,80	3,66	0,57	0,12	10,4	13,2	5,4	13,4	7,2	6,5	13,5	10,6
-0,037+0,020	7,1	40,9	4,93	16,8	29,3	24,6	0,16	2,21	3,30	0,57	<0,10	12,3	8,8	5,0	8,0	7,2	6,2	9,4	8,2
Underflow1	25,2	66,1	3,86	29,3	17,0	28,7	0,15	3,42	2,05	0,59	<0,10	11,0	24,3	30,9	16,4	29,9	33,7	20,6	29,9
Underflow2	7,9	74,0	2,49	36,4	9,46	32,2	0,15	3,95	0,98	0,46	<0,10	11,6	4,9	12,0	2,9	10,5	12,2	3,1	7,3
Overflow	26,0	100,0	2,56	36,6	8,76	32,7	0,17	3,02	0,62	0,40	<0,10	13,0	16,6	39,8	8,8	35,1	30,7	6,4	20,9
Total cal.	100,0		4,00	23,9	26,0	24,2	0,15	2,56	2,51	0,50	...	10,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Tabela 36 – Resultado da análise granuloquímica na amostra D1 bulk (sem topsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+0,60	21,2	21,2	1,78	0,40	0,77	0,44	0,16	0,32	6,77	62,0	2,06	1,24	1,31	0,63	<0,10	15,8	3,62	1,52	0,34	<0,10	2,10
-0,60+0,30	8,1	29,4	2,15	0,49	0,99	0,50	0,17	0,47	7,61	47,8	2,60	4,72	1,33	0,49	<0,10	18,1	6,78	1,81	0,46	<0,10	3,30
-0,30+0,15	9,1	38,4	1,76	0,40	0,80	0,43	0,14	0,50	8,69	44,1	3,28	5,45	1,33	0,47	0,13	18,1	7,65	2,00	0,54	<0,10	3,85
-0,15+0,074	12,3	50,8	1,79	0,42	0,81	0,42	0,14	0,47	16,3	36,0	4,16	4,11	1,27	0,47	0,31	18,4	7,40	2,33	0,66	<0,10	5,12
-0,074+0,037	12,0	62,7	2,43	0,57	1,14	0,57	0,16	0,41	27,5	31,0	4,08	2,79	1,09	0,34	0,22	12,8	6,89	2,33	0,63	<0,10	5,72
-0,037+0,020	9,7	72,4	3,15	0,72	1,47	0,76	0,20	0,38	29,7	30,5	4,65	2,23	1,01	0,34	0,16	9,97	7,34	2,71	0,70	<0,10	6,69
Underflow1	13,2	85,7	6,16	1,37	2,91	1,53	0,36	0,32	19,5	37,7	4,92	1,67	1,10	0,38	<0,10	7,06	8,56	2,83	0,83	<0,10	8,50
Underflow2	3,8	89,5	8,29	1,72	3,87	2,21	0,49	0,20	12,3	49,3	3,11	1,60	1,36	0,49	<0,10	4,17	7,57	1,57	0,62	<0,10	9,26
Overflow	10,5	100,0	10,7	2,12	5,02	2,91	0,61	0,19	5,63	54,5	2,33	1,44	1,76	0,52	<0,10	3,51	7,67	1,11	0,56	<0,10	9,85
Total calc.	100,0		3,78	0,82	1,76	0,96	0,25	0,37	14,7	44,8	3,41	2,63	1,27	0,47	...	12,7	6,69	2,03	0,58	<0,10	5,54

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)								Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+0,60	10,0	9,8	29,4	12,8	10,0	26,4	11,5	15,9	0,49	0,51	0,34
-0,60+0,30	4,6	4,2	8,7	6,2	14,6	11,6	8,2	7,2	0,32	0,50	0,70
-0,30+0,15	4,2	5,4	8,9	8,7	18,8	12,9	10,4	8,9	0,23	0,50	0,71
-0,15+0,074	5,8	13,7	9,9	15,1	19,3	17,9	13,7	14,2	0,24	0,51	0,56
-0,074+0,037	7,7	22,4	8,3	14,3	12,7	12,1	12,3	13,7	0,35	0,50	0,40
-0,037+0,020	8,1	19,6	6,6	13,2	8,2	7,6	10,6	12,9	0,43	0,49	0,30
Underflow1	21,6	17,6	11,2	19,1	8,4	7,4	16,9	18,4	0,72	0,47	0,20
Underflow2	8,3	3,2	4,2	3,5	2,3	1,2	4,3	2,9	1,09	0,44	0,21
Overflow	29,7	4,0	12,9	7,2	5,8	2,9	12,1	5,7	1,39	0,42	0,19
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,57	0,47	0,39

Tabela 37 – Resultado da análise granuloquímica na amostra D1 moída a -0,30 mm e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
-0,30+0,15	22,5	22,5	1,63	7,61	53,4	2,58	3,60	<0,10	16,7	5,76	1,76	2,67	9,4	11,4	27,2	16,7	32,7	30,1	19,2	18,8
-0,15+0,074	20,7	43,2	1,90	14,0	43,1	3,45	3,11	0,20	17,3	6,26	2,11	3,77	10,0	19,3	20,1	20,4	25,9	28,4	19,1	20,7
-0,074+0,037	13,7	56,9	2,33	24,0	35,6	3,79	2,44	0,19	14,0	6,46	2,35	4,95	8,2	21,9	11,1	14,9	13,5	15,3	13,1	15,3
-0,037+0,020	10,6	67,6	2,77	28,4	32,4	4,54	1,95	0,13	11,0	6,91	2,73	5,75	7,5	20,1	7,8	13,8	8,4	9,4	10,9	13,8
Underflow1	14,6	82,1	5,72	18,0	38,0	5,01	1,62	<0,10	9,45	8,39	3,00	7,34	21,2	17,4	12,5	20,9	9,5	11,0	18,1	20,7
Overflow NAT	16,3	98,4	9,90	8,20	53,4	2,49	1,34	<0,10	3,10	7,49	1,20	9,66	41,0	8,9	19,6	11,6	8,8	4,0	18,0	9,2
Overflow PM	1,6	100,0	6,95	8,42	45,5	3,40	1,81	<0,10	14,0	6,82	1,92	7,27	2,8	0,9	1,6	1,5	1,2	1,8	1,6	1,4
Total cal.	100,0		3,93	15,0	44,2	3,49	2,48	...	12,5	6,76	2,11	5,43	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Obs: OTR = óxidos de terras raras (somatória de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Tabela 38 – Resultado da análise granuloquímica na amostra D2 bulk (topsize de 6,35 mm) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																			
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF	
-6,35+3,35	12,8	12,8	3,34	0,88	1,74	0,51	0,21	0,11	44,4	28,6	0,79	4,98	0,57	0,23	<0,10	4,18	6,44	0,76	0,31	<0,10	2,91	
-3,35+1,19	18,1	30,9	2,44	0,62	1,26	0,38	0,19	0,17	37,5	34,0	1,34	4,41	0,79	0,26	<0,10	6,21	5,97	1,20	0,29	<0,10	3,37	
-1,19+0,60	9,2	40,1	2,73	0,67	1,41	0,44	0,20	0,23	29,1	31,4	1,76	7,63	0,99	0,19	<0,10	7,96	9,07	1,37	0,39	<0,10	2,99	
-0,60+0,30	8,8	49,0	3,05	0,76	1,57	0,49	0,23	0,32	24,0	28,4	2,08	10,1	1,04	0,14	<0,10	10,1	11,4	1,60	0,46	<0,10	3,85	
-0,30+0,15	6,9	55,9	2,68	0,65	1,39	0,44	0,21	0,37	21,1	29,9	2,07	9,57	1,05	0,12	<0,10	11,9	10,8	1,55	0,43	<0,10	3,80	
-0,15+0,074	6,2	62,2	2,88	0,71	1,47	0,47	0,24	0,49	17,2	31,1	3,13	7,18	1,17	0,13	0,15	15,2	9,92	2,12	0,48	<0,10	4,37	
-0,074+0,020	10,6	72,7	4,58	1,15	2,37	0,71	0,35	0,60	13,5	30,2	5,51	4,97	1,13	0,10	0,15	13,6	11,1	3,68	0,73	<0,10	6,52	
Underflow1	13,2	85,9	13,5	3,33	7,17	2,27	0,77	0,60	7,47	36,9	3,59	3,25	0,85	0,10	<0,10	6,10	12,3	1,73	0,99	<0,10	8,30	
Underflow2	4,9	90,8	14,5	3,52	7,73	2,45	0,83	0,47	7,31	40,0	3,14	3,21	0,78	0,12	<0,10	4,30	12,2	1,54	0,98	<0,10	8,91	
Overflow	9,2	100,0	17,2	4,12	9,17	2,97	0,95	0,27	3,88	45,1	2,20	2,22	0,92	0,13	<0,10	2,07	11,8	0,42	0,95	<0,10	9,87	
Total calc.	100,0		6,32	1,56	3,33	1,05	0,39	0,34	22,9	33,4	2,44	5,46	0,90	0,16	...	7,69	9,60	1,55	0,57	<0,10	5,26	

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)								Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
-6,35+3,35	6,8	24,7	10,9	4,1	11,7	6,9	8,6	6,3	0,52	0,51	0,77
-3,35+1,19	7,0	29,7	18,5	10,0	14,7	14,7	11,3	14,0	0,41	0,49	0,74
-1,19+0,60	4,0	11,7	8,6	6,6	12,9	9,5	8,7	8,1	0,30	0,48	0,84
-0,60+0,30	4,3	9,2	7,5	7,5	16,3	11,6	10,5	9,1	0,27	0,49	0,88
-0,30+0,15	2,9	6,4	6,2	5,9	12,2	10,7	7,8	6,9	0,25	0,47	0,89
-0,15+0,074	2,8	4,7	5,8	8,0	8,2	12,3	6,4	8,5	0,29	0,48	0,72
-0,074+0,020	7,6	6,2	9,5	23,8	9,6	18,6	12,2	25,0	0,41	0,49	0,45
Underflow1	28,2	4,3	14,5	19,4	7,8	10,4	16,9	14,7	1,10	0,47	0,26
Underflow2	11,2	1,6	5,9	6,3	2,9	2,7	6,2	4,8	1,19	0,46	0,26
Overflow	25,1	1,6	12,4	8,3	3,7	2,5	11,3	2,5	1,46	0,45	0,19
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,66	0,47	0,57

Tabela 39 – Resultado da análise granuloquímica na amostra D2 moída a -0,30 mm e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
-0,30+0,15	24,8	24,8	2,37	32,9	32,8	1,90	6,48	<0,10	8,03	7,55	1,16	3,26	8,9	35,1	23,8	16,7	30,0	27,2	19,8	18,0
-0,15+0,074	17,6	42,4	2,89	30,0	32,1	2,42	6,45	<0,10	9,03	8,22	1,49	4,42	7,7	22,6	16,4	15,0	21,1	21,6	15,3	16,3
-0,074+0,020	21,1	63,4	4,70	25,2	31,2	3,49	5,58	<0,10	8,88	9,33	2,04	6,28	15,0	22,8	19,2	26,0	21,9	25,5	20,8	26,8
Underflow1	19,4	82,8	10,6	15,3	34,8	3,61	4,57	<0,10	6,80	11,5	2,01	7,07	31,1	12,7	19,7	24,7	16,5	18,0	23,5	24,3
Overflow	17,2	100,0	14,4	9,26	41,6	2,89	3,27	<0,10	3,28	11,4	1,35	8,87	37,3	6,8	20,9	17,6	10,5	7,7	20,7	14,5
Total cal.	100,0		6,61	23,3	34,2	2,83	5,36	<0,10	7,33	9,46	1,60	5,80	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo.

APÊNDICE B

Dados de composição mineralógica

Tabela 40 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra A1 (-0,30 mm).

Mineral /Fração (mm)	Total	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	100,0	19,1	15,4	21,5	19,9	24,1
monazita	3,1	1,0	1,6	2,0	4,5	5,6
bastnaesita						
cerianita	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1
Fe-óxidos	21	30	20	16	6,3	32
goethita	37	27	29	29	43	50
goethita-monazita						
quartzo	2,6	4,1	4,0	3,6	2,0	0,2
quartzo-monazita	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1	0,1
Al-fosfatos	19	20	22	25	25	5,2
apatita	0,8	1,2	1,1	1,1	0,8	0,1
gibbsita-caulinita	2,0	2,1	2,3	2,1	2,2	1,7
mica	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
ilmenita	3,8	3,9	5,0	5,0	3,6	2,2
Ti-óxidos	5,9	6,1	9,0	9,5	6,3	0,3
perovskita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
Mn-óxidos	1,6	1,6	1,9	1,9	2,0	0,7
outros	3,0	2,8	3,3	3,8	3,8	1,7

Tabela 41 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra A2 (-0,30 mm).

Mineral /Fração (mm)	Total	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	100,0	18,6	15,3	22,9	20,4	22,9
monazita	4,1	1,7	2,2	3,6	6,4	5,9
bastnaesita						
cerianita	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2
Fe-óxidos	7,7	9,4	6,8	4,1	3,3	14
goethita	28	19	19	21	28	48
goethita-monazita						
quartzo	18	25	25	22	16	3,7
quartzo-monazita	0,7	0,4	0,2	0,2	0,3	2,3
Al-fosfatos	23	23	25	26	26	14
apatita	1,1	1,7	2,1	1,3	0,6	0,1
gibbsita-caulinita	3,0	2,8	2,9	2,9	3,3	3,3
mica	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2
ilmenita	3,7	4,5	3,7	3,8	3,4	3,1
Ti-óxidos	7,0	8,3	9,5	10	7,6	0,5
perovskita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Mn-óxidos	1,4	1,4	1,4	1,7	1,9	0,6
outros	2,4	2,0	2,0	2,3	2,5	3,2

Tabela 42 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra A3.

Mineral /Fração (mm)	Total	-1,19+0,30	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	96,3	6,5	5,3	6,5	13,7	17,3	47,1
monazita	1,1	0,4	0,4	0,6	0,6	1,4	1,5
bastnaesita							
cerianita	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	<0,1
Fe-óxidos	8,4	26	15	11	12	13	2,1
goethita	10	4,6	4,6	4,9	4,8	7,5	15
goethita-monazita							
quartzo	14	38	50	36	31	9,0	0,4
quartzo-monazita							
Al-fosfatos	8,1	7,6	7,3	7,2	8,6	13	6,3
apatita	<0,1	<0,1	0,2	0,1	0,1	<0,1	
gibbsita-caulinita	45	18	15	32	28	38	62
mica	8,2	0,6	1,2	2,2	6,7	9,3	11
ilmenita	0,6	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	0,5
Ti-óxidos	0,8	0,3	0,7	1,2	1,7	1,9	0,2
perovskita							
Mn-óxidos	2,1	2,2	3,0	3,1	3,5	3,4	1,0
outros	0,8	0,7	1,1	1,2	2,0	2,1	<0,1

Tabela 43 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra A4.

Mineral /Fração (mm)	Total	-1,19+0,30	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	93,0	9,4	5,6	6,0	13,3	19,7	39,0
monazita	4,4	0,8	1,2	2,2	4,0	5,4	5,6
bastnaesita							
cerianita	0,3	0,1	0,2	0,4	0,3	0,4	0,2
Fe-óxidos	29	53	40	29	25	30	22
goethita	13	2,2	3,2	3,9	4,9	6,6	23
goethita-monazita							
quartzo	3,9	3,6	7,8	9,9	9,0	4,8	0,4
quartzo-monazita							
Al-fosfatos	32	31	34	36	35	34	30
apatita	<0,1			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
gibbsita-caulinita	6,6	2,4	4,1	4,8	5,4	4,8	9,7
mica	0,2	<0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,2
ilmenita	0,9	0,7	0,9	1,0	1,0	0,9	0,7
Ti-óxidos	1,8	1,7	2,7	5,2	5,0	1,8	0,1
perovskita							
Mn-óxidos	7,6	3,1	5,3	5,8	7,3	7,8	9,3
outros	0,8	0,7	1,1	2,1	2,8	3,0	<0,1

Tabela 44 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra A5.

Mineral /Fração (mm)	Total	-1,19+0,30	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	95,2	8,6	4,9	4,5	13,0	17,3	46,9
monazita	2,4	2,1	2,4	3,1	2,8	2,5	2,2
bastnaesita							
cerianita	0,6	1,6	1,1	0,7	0,7	0,6	0,2
Fe-óxidos	13	27	26	24	23	19	2,5
goethita	16	9,7	7,7	8,5	8,2	11	22
goethita-monazita							
quartzo	3,9	14	17	12	5,9	1,5	0,1
quartzo-monazita							
Al-fosfatos	10	11	11	14	15	15	6,4
apatita	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
gibbsita-caulinita	45	22	23	25	33	38	60
mica	4,2	2,1	2,1	2,3	3,3	4,3	5,2
ilmenita	0,8	0,5	0,8	1,0	1,1	1,1	0,7
Ti-óxidos	1,1	0,9	1,5	2,7	2,8	2,3	0,1
perovskita							
Mn-óxidos	2,7	7,5	6,4	5,1	3,2	3,2	0,9
outros	0,3	0,4	0,8	1,2	1,3	1,4	<0,1

Tabela 45 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra B1 (-0,30 mm).

Mineral /Fração (mm)	Total	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	100,0	33,1	19,1	19,7	11,2	17,0
monazita	0,9	0,3	0,5	0,7	1,2	2,5
bastnaesita						
cerianita						
Fe-óxidos	18	28	23	16	8,3	2,0
goethita	13	2,8	5,2	10	22	38
goethita-monazita						
quartzo	13	15	15	17	14	3,5
quartzo-monazita						
Al-fosfatos	3,4	1,0	1,7	2,4	4,4	10
apatita	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1
gibbsita-caulinita	8,6	2,4	4,0	5,9	9,0	29
mica						
ilmenita	11	9,8	13	15	10	5,7
Ti-óxidos	21	25	23	23	26	6,7
perovskita	9,3	15	13	7,3	2,5	0,4
Mn-óxidos	0,6	0,3	0,6	0,9	1,2	0,6
outros	0,6	0,3	0,3	0,5	0,5	1,8

Tabela 46 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra B2 (-0,30 mm).

Mineral /Fração (mm)	Total	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	100,0	27,2	17,4	20,5	13,5	21,4
monazita	1,3	0,6	1,0	1,2	1,4	2,4
bastnaesita						
cerianita						
Fe-óxidos	20	37	28	17	8,6	1,9
goethita	21	3,9	6,3	14	32	57
goethita-monazita						
quartzo	3,8	1,0	3,1	8,2	8,0	1,2
quartzo-monazita						
Al-fosfatos	8,1	3,7	5,3	7,9	15	12
apatita	2,1	1,9	3,4	2,8	1,9	0,6
gibbsita-caulinita	5,7	2,1	2,6	3,9	4,9	15
mica						
ilmenita	16	18	25	22	9,9	4,6
Ti-óxidos	19	29	23	19	16	3,2
perovskita	0,5	1,1	0,7	0,4	0,1	<0,1
Mn-óxidos	1,2	0,5	0,6	1,8	2,6	1,1
outros	0,9	0,6	0,8	1,1	0,8	1,2

Tabela 47 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra C1 (-0,125 mm).

Mineral /Fração (mm)	Total	-0,125+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	100,0	24,5	16,4	25,2	33,9
monazita	0,5	0,4	0,6	0,7	0,4
bastnaesita	3,0	3,7	5,0	3,3	1,4
cerianita	2,5	3,8	3,3	2,2	1,4
Fe-óxidos	9,2	25	12	4,5	0,1
goethita	18	31	27	18	4,3
goethita-monazita					
quartzo	0,1	<0,1	0,1	0,1	0,1
quartzo-monazita					
Al-fosfatos	0,6	0,3	0,4	0,7	0,8
apatita					
gibbsita-caulinita	26	12	23	30	34
mica	32	9,1	18	33	55
ilmenita	0,9	1,4	1,1	0,6	0,6
Ti-óxidos	1,9	2,9	2,6	2,2	0,5
perovskita					
Mn-óxidos	4,2	9,8	5,3	2,5	0,8
outros	1,1	1,2	1,6	1,3	0,7

Tabela 48 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra D1 (-0,30 mm).

Mineral /Fração (mm)	Total	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	100,0	22,5	20,7	24,4	14,6	17,9
monazita	6,4	2,1	2,6	4,7	9,4	16
bastnaesita						
cerianita						
Fe-óxidos	17	40	23	11	5,0	0,4
goethita	27	8,9	14	21	31	69
goethita-monazita						
quartzo	14	7,2	15	24	18	4,9
quartzo-monazita						
Al-fosfatos	12	11	13	16	19	3,3
apatita	2,9	5,0	3,9	2,5	1,4	0,7
gibbsita-caulinita						
mica						
ilmenita	10	14	15	11	7,0	2,5
Ti-óxidos	8,0	10	12	8,3	6,5	1,3
perovskita						
Mn-óxidos	1,3	0,5	0,5	1,3	2,4	2,0
outros	1,2	1,7	1,8	1,3	0,7	0,1

Tabela 49 – Composição mineralógica por fração granulométrica (% massa; MLA) - Amostra D2 (-0,30 mm).

Mineral /Fração (mm)	Total	-0,30+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Underflow	Overflow
%Massa	100,0	24,8	17,6	21,1	19,4	17,2
monazita	9,8	4,6	4,8	9,9	15	17
bastnaesita						
cerianita						
Fe-óxidos	12	22	19	10	4,7	1,9
goethita	20	7,7	10	24	28	36
goethita-monazita	6,2	0,7	0,9	3,0	6,1	24
quartzo	21	34	30	18	14	6,6
quartzo-monazita						
Al-fosfatos	8,7	6,4	7,8	12	11	5,3
apatita	8,2	12	11	6,7	6,8	3,3
gibbsita-caulinita						
mica						
ilmenita	8,4	8,5	11	11	8,2	2,5
Ti-óxidos	1,9	2,1	2,1	1,7	2,1	1,3
perovskita						
Mn-óxidos	0,8	1,0	0,7	1,0	0,7	0,3
outros	2,1	1,7	2,2	2,2	2,4	1,9

Figura 39 – Difrátogramas da fração +1,19 mm (não analisada ao MLA) - Amostras A3, A4, A5.

Figura 40 – Quantificação mineral do overflow da amostra A1 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 41 – Quantificação mineral do overflow da amostra A2 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 42 – Quantificação mineral do overflow da amostra A3 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 43 – Quantificação mineral do overflow da amostra A4 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 44 – Quantificação mineral do overflow da amostra A5 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 45 – Quantificação mineral do overflow da amostra B1 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 46 – Quantificação mineral do overflow da amostra B2 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 47 – Quantificação mineral do overflow da amostra C1 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 48 – Quantificação mineral do overflow da amostra D1 pelo método de DRX-Rietveld.

Figura 49 – Quantificação mineral do overflow da amostra D2 pelo método de DRX-Rietveld.

APÊNDICE C

Composição química dos minerais adotada pelo MLA

APÊNDICE D

Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores

Tabela 51 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra A1.

Mineral	Distribuição (%)						
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
monazita	70		<1			10	1
bastnaesita							
cerianita	6					<1	
Fe-óxidos			40		5		
goethita	7	14	53	25	2	23	26
goethita-monazita							
quartzo		63					
quartzo-monazita	1	<1				<1	
Al-fosfatos	15	3	2	65	2	63	53
apatita						4	
gibbsita-caulinita		14	<1	9	<1		
mica		1	<1	<1	<1		
ilmenita			3		22		
Ti-óxidos		1	<1		66		
perovskita							
Mn-óxidos		<1	<1	<1		<1	4
outros	1	4	1	<1	2	<1	17

Tabela 52 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra A2.

Mineral	Distribuição (%)						
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
monazita	61		<1			12	1
bastnaesita							
cerianita	8					<1	
Fe-óxidos			23		2		
goethita	3	2	65	16	2	15	21
goethita-monazita							
quartzo		88					
quartzo-monazita	15						
Al-fosfatos	12	1	4	70	2	68	68
apatita						5	
gibbsita-caulinita		5	1	12	<1		
mica		<1	<1	<1	<1		
ilmenita			5		20		
Ti-óxidos		<1	1		73		
perovskita							
Mn-óxidos			<1	<1		<1	4
outros	1	3	1	2	1	<1	7

Tabela 53 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra A3.

Mineral	Distribuição (%)						
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
monazita	50	<1	<1	<1		7	
bastnaesita	<1						
cerianita	14		<1	<1	<1	<1	
Fe-óxidos	10	<1	40	<1	6		
goethita	13	4	31	7	3	1	
goethita-monazita							
quartzo		38					
quartzo-monazita							
Al-fosfatos	9		3	9	5	90	89
apatita							
gibbsita-caulinita		48	20	72			
mica		9	1	11	1		
ilmenita			1	<1	17		
Ti-óxidos					47		
perovskita							
Mn-óxidos	1	<1	4	1	1	1	9
outros	3	1	<1	<1	20	1	2

Tabela 54 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra A4.

Mineral	Distribuição (%)						
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
monazita	70	<1	<1	<1		5	
bastnaesita	<1						
cerianita	7	<1	<1	<1	<1	<1	
Fe-óxidos	9	6	61	<1	8		
goethita	5	10	16	8	4	<1	
goethita-monazita							
quartzo		44					
quartzo-monazita							
Al-fosfatos	9		12	71	15	94	92
apatita						<1	
gibbsita-caulinita		35	3	18			
mica		1	<1	1	<1		
ilmenita		<1	1	<1	11		
Ti-óxidos					46		
perovskita							
Mn-óxidos	<1	1	7	2	1	<1	7
outros	<1	3	<1	<1	15	<1	<1

Tabela 55 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra A5.

Mineral	Distribuição (%)						
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
monazita	55	<1	<1	<1		13	
bastnaesita	<1						
cerianita	24	<1	<1	<1	<1	1	
Fe-óxidos	7	1	43	<1	8		
goethita	8	8	34	10	3	1	
goethita-monazita							
quartzo		15					
quartzo-monazita							
Al-fosfatos	5		2	11	5	84	88
apatita						<1	
gibbsita-caulinita		69	15	72			
mica		7	<1	6	<1		
ilmenita		<1	1	<1	19		
Ti-óxidos					49		
perovskita							
Mn-óxidos	<1	<1	3	1	1	1	11
outros	<1	1	<1	<1	14	<1	<1

Tabela 56 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra B1.

Mineral	Distribuição (%)						
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO
monazita	40	<1	<1			16	1
bastnaesita							
cerianita							
Fe-óxidos	11	2	77		1	14	<1
goethita							
goethita-monazita							
quartzo		85					
quartzo-monazita							
Al-fosfatos	4		1	19	3	38	4
apatita						7	4
gibbsita-caulinita	3	12	6	66	1	12	1
mica							
ilmenita			11		18		
Ti-óxidos	31	1	5	6	59	12	
perovskita	10		<1		17		89
Mn-óxidos			<1	5		<1	<1
outros	1	<1	<1	4	<1		1

Tabela 57 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra B2.

Mineral	Distribuição (%)					
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO
monazita	47	<1	<1			2
bastnaesita						
cerianita						
Fe-óxidos	15	8	80		2	10
goethita						
goethita-monazita						
quartzo		70				
quartzo-monazita						
Al-fosfatos	12		1	51	3	50
apatita						21
gibbsita-caulinita	2	19	4	35	1	4
mica						
ilmenita			12		31	
Ti-óxidos	22	2	3	5	61	5
perovskita	<1		<1		1	
Mn-óxidos			<1	8		<1
outros	2	1	<1	2	1	4

Tabela 58 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra C1.

Mineral	Distribuição (%)					
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O
monazita	7		<1			25
bastnaesita	39		<1			5
cerianita	39	1	1	1	2	7
Fe-óxidos	1		33		11	
goethita	10	1	52	3	8	23
goethita-monazita						
quartzo		<1				
quartzo-monazita						
Al-fosfatos	1		<1	1		31
apatita						
gibbsita-caulinita		38		49		
mica	4	58	10	45	2	93
ilmenita		<1	1	<1	16	
Ti-óxidos		<1	<1	<1	59	<1
perovskita						
Mn-óxidos	<1	1	3	1	2	7
outros	<1	1	1	<1	<1	8

Tabela 59 – Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra D1.

Mineral	Distribuição (%)							
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	CaO
monazita	95		<1			26		6
bastnaesita								
cerianita								
Fe-óxidos			37		6			
goethita		7	49	19	2	3		
goethita-monazita								
quartzo		93						
quartzo-monazita								
Al-fosfatos	3		2	81		51	83	19
apatita						17		70
gibbsita-caulinita								
mica								
ilmenita			10		39			
Ti-óxidos		<1	1		52			
perovskita								
Mn-óxidos						2	16	
outros	2	<1	<1		2		1	5

Tabela 60 - Partição dos principais óxidos entre os minerais portadores na amostra D2.

Mineral	Distribuição (%)							
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	CaO
monazita	70	4				23		4
bastnaesita								
cerianita								
Fe-óxidos			33		4			
goethita	9	1	41	20		12	11	1
goethita-monazita	19		11	1		6		2
quartzo		94						
quartzo-monazita								
Al-fosfatos	2	<1	2	78	1	24	79	4
apatita						35		87
gibbsita-caulinita								
mica								
ilmenita			11		58			
Ti-óxidos					25			
perovskita								
Mn-óxidos			<1			<1	7	<1
outros	<1	<1	<1	2	12		3	2

APÊNDICE E

Resultados das separações minerais

Tabela 61 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A1 atricionada (sem toptsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+0,60	10,1	10,1	1,18	0,26	0,42	0,36	0,14	0,29	2,94	65,1	5,56	0,88	1,35	0,86	<0,10	6,36	4,83	3,76	0,49	<0,10	5,60
-0,60+0,30	9,1	19,3	1,37	0,32	0,51	0,41	0,14	0,36	4,47	58,0	6,70	1,00	1,37	0,63	<0,10	7,19	5,93	4,30	0,60	<0,10	7,06
-0,30+0,15	8,8	28,1	1,41	0,34	0,53	0,40	0,14	0,42	6,25	52,5	7,11	1,26	1,29	0,51	<0,10	8,90	6,85	4,82	0,70	<0,10	7,12
-0,15+0,074	10,5	38,6	1,65	0,43	0,66	0,42	0,15	0,52	6,43	46,4	7,54	1,35	1,29	0,48	<0,10	11,9	7,36	5,31	0,73	<0,10	7,94
-0,074+0,037	10,8	49,4	2,10	0,53	0,86	0,53	0,17	0,58	5,91	42,5	8,00	1,27	1,38	0,41	<0,10	13,5	8,03	5,95	0,80	<0,10	8,37
-0,037+0,020	8,8	58,2	2,65	0,68	1,10	0,66	0,21	0,65	5,51	39,3	9,33	1,40	1,52	0,32	<0,10	11,8	9,30	6,57	0,92	<0,10	9,85
Underflow1	16,4	74,6	3,87	0,95	1,65	1,01	0,26	0,80	3,55	45,1	9,00	1,08	1,83	0,31	<0,10	8,02	8,65	5,25	0,81	0,12	11,2
Underflow2 NAT	3,7	78,3	4,16	0,91	1,81	1,18	0,26	0,52	3,63	55,8	7,45	0,69	2,75	0,34	<0,10	3,78	5,94	2,42	0,47	0,15	11,8
Underflow2 ATR	2,8	81,2	4,30	0,98	1,85	1,19	0,28	0,61	3,75	52,8	7,91	0,81	2,21	0,34	<0,10	4,70	6,84	3,06	0,59	0,15	11,8
Overflow NAT	10,5	91,6	4,05	0,83	1,83	1,14	0,25	0,45	3,73	58,2	7,85	0,56	2,29	0,34	<0,10	2,99	5,09	1,73	0,35	0,15	12,2
Overflow ATR	8,4	100,0	4,15	0,87	1,88	1,15	0,25	0,46	3,86	56,9	8,53	0,75	2,24	0,33	<0,10	2,98	5,27	1,83	0,37	0,15	12,2
Total cal.	100,0		2,68	0,63	1,13	0,73	0,20	0,53	4,59	51,3	7,79	1,04	1,69	0,45	<0,10	7,99	6,90	4,35	0,64	...	9,34

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo, NAT = natural, ATR = gerado na atrição.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+0,60	4,4	6,5	12,8	7,2	8,1	7,1	8,7	0,24	0,62	0,18
-0,60+0,30	4,7	8,9	10,4	7,9	8,2	7,9	9,0	0,23	0,63	0,17
-0,30+0,15	4,6	12,0	9,0	8,0	9,8	8,7	9,7	0,21	0,64	0,18
-0,15+0,074	6,5	14,7	9,5	10,2	15,6	11,2	12,8	0,22	0,65	0,18
-0,074+0,037	8,5	13,9	9,0	11,1	18,3	12,6	14,8	0,26	0,62	0,16
-0,037+0,020	8,7	10,6	6,7	10,5	13,0	11,9	13,3	0,28	0,62	0,15
Underflow1	23,6	12,7	14,4	19,0	16,5	20,6	19,8	0,45	0,57	0,12
Underflow2 NAT	5,7	2,9	4,0	3,5	1,7	3,2	2,1	0,70	0,50	0,12
Underflow2 ATR	4,5	2,3	2,9	2,9	1,7	2,8	2,0	0,63	0,53	0,12
Overflow NAT	15,8	8,5	11,9	10,5	3,9	7,7	4,2	0,80	0,46	0,11
Overflow ATR	12,9	7,0	9,3	9,2	3,1	6,4	3,5	0,79	0,46	0,14
Total cal.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,39	0,55	0,15

Tabela 62 – Resultado da análise granuloquímica na amostra A5 atricionada (sem toptsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+1,19	4,5	4,5	3,11	0,57	1,88	0,66	<0,10	<0,10	16,1	38,0	15,6	0,28	5,13	0,20	0,27	1,70	4,77	3,64	0,49	0,05	12,0
-0,19+0,30	7,8	12,2	2,50	0,49	1,50	0,51	<0,10	0,13	20,9	34,1	17,5	0,27	3,53	0,26	0,31	2,60	3,70	2,79	0,33	0,06	12,3
-0,30+0,15	3,9	16,2	2,99	0,61	1,74	0,64	<0,10	0,14	25,7	31,4	13,7	0,34	4,24	0,19	0,35	2,98	3,65	2,84	0,30	0,11	10,8
-0,15+0,074	4,9	21,1	2,81	0,60	1,53	0,68	<0,10	0,20	25,6	29,5	14,7	0,36	2,88	0,22	0,39	4,04	4,48	3,43	0,35	0,08	11,1
-0,074+0,037	6,1	27,2	2,88	0,63	1,49	0,76	<0,10	0,25	22,3	29,0	16,3	0,34	2,03	0,21	0,47	5,20	5,40	4,03	0,40	0,07	11,7
-0,037+0,020	6,7	33,9	2,48	0,59	1,24	0,65	<0,10	0,24	21,5	26,3	20,8	0,33	1,33	0,21	0,55	4,57	5,00	3,72	0,36	0,06	13,1
Underflow1	19,9	53,8	2,30	0,57	1,17	0,56	<0,10	0,21	20,6	25,5	23,8	0,40	0,96	0,19	0,54	3,79	4,28	3,05	0,31	0,06	13,9
Underflow2 NAT	5,5	59,2	1,96	0,49	1,00	0,47	<0,10	0,13	25,5	24,2	25,7	0,35	0,85	0,20	0,82	2,65	2,61	1,60	0,19	0,05	14,1
Underflow2 ATR	3,0	62,3	1,81	0,48	0,91	0,42	<0,10	0,14	24,0	23,6	25,2	0,47	0,82	0,23	0,83	2,81	2,83	1,85	0,21	0,05	15,4
Overflow NAT	29,6	91,9	2,06	0,47	1,11	0,48	<0,10	0,11	27,7	22,5	27,9	0,28	0,94	0,15	0,52	2,08	1,68	0,76	0,13	0,06	14,0
Overflow ATR	8,1	100,0	1,81	0,44	0,98	0,39	<0,10	0,11	23,4	23,8	28,3	0,35	0,77	0,17	0,51	2,10	1,78	0,83	0,14	0,06	16,6
Total cal.	100,0		2,31	0,52	1,24	0,54	<0,10	...	23,7	26,3	23,2	0,33	1,63	0,19	0,51	2,99	3,25	2,20	0,25	0,06	13,5

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo, NAT = natural, ATR = gerado na atrição.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+1,19	6,0	3,0	6,5	3,0	2,6	6,6	7,4	0,65	0,30	0,06
-0,19+0,30	8,4	6,8	10,1	5,9	6,8	8,8	9,9	0,68	0,33	0,07
-0,30+0,15	5,1	4,3	4,7	2,3	3,9	4,4	5,1	0,82	0,35	0,09
-0,15+0,074	6,0	5,3	5,5	3,1	6,7	6,8	7,7	0,63	0,39	0,08
-0,074+0,037	7,6	5,7	6,7	4,3	10,6	10,1	11,2	0,53	0,42	0,06
-0,037+0,020	7,2	6,0	6,7	6,0	10,2	10,3	11,3	0,50	0,48	0,07
Underflow1	19,8	17,3	19,3	20,4	25,3	26,2	27,6	0,54	0,49	0,09
Underflow2 NAT	4,6	5,9	5,0	6,1	4,9	4,4	4,0	0,75	0,49	0,13
Underflow2 ATR	2,4	3,1	2,7	3,3	2,9	2,6	2,6	0,64	0,53	0,17
Overflow NAT	26,4	34,5	25,4	35,6	20,6	15,3	10,2	1,23	0,42	0,17
Overflow ATR	6,4	8,0	7,4	9,9	5,7	4,5	3,1	1,02	0,45	0,20
Total cal.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,71	0,42	0,10

Tabela 63 – Resultado da análise granuloquímica na amostra B1 atricionada (topsize de 1,19 mm) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																			
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF	
+0,60	19,6	19,6	0,97	0,27	0,56	0,15	<0,10	0,12	16,4	34,5	0,95	6,08	0,46	1,47	<0,10	35,2	0,85	0,47	<0,10	<0,10	1,08	
-0,60+0,30	17,7	37,4	0,94	0,26	0,54	0,15	<0,10	0,13	14,7	35,1	1,35	6,13	0,48	1,50	<0,10	35,4	0,91	0,45	<0,10	<0,10	1,31	
-0,30+0,15	13,9	51,3	0,92	0,26	0,52	0,15	<0,10	0,12	12,8	35,7	1,76	6,44	0,55	1,56	<0,10	35,7	1,04	0,52	0,11	<0,10	1,54	
-0,15+0,074	9,6	60,9	0,93	0,27	0,51	0,15	<0,10	0,13	15,3	34,8	1,87	5,33	0,63	1,76	<0,10	34,3	1,22	0,52	0,11	<0,10	1,87	
-0,074+0,037	6,9	67,8	0,94	0,27	0,51	0,17	<0,10	0,10	20,1	32,0	2,60	3,14	0,75	2,00	<0,10	31,6	1,47	0,55	0,11	<0,10	3,14	
-0,037+0,020	4,5	72,4	1,11	0,33	0,57	0,21	<0,10	0,11	22,8	29,9	3,32	1,90	0,76	1,51	<0,10	30,5	1,82	0,59	0,11	<0,10	4,39	
Underflow1	6,8	79,2	1,69	0,50	0,77	0,33	0,10	0,12	17,9	32,8	4,12	1,33	0,73	0,79	<0,10	29,6	2,55	0,66	0,15	<0,10	6,27	
Underflow2 NAT	2,7	81,9	2,02	0,58	0,82	0,46	0,15	<0,10	17,1	37,0	7,98	0,83	0,89	0,57	<0,10	19,3	2,88	0,54	0,14	<0,10	9,50	
Underflow2 ATR	1,5	83,5	1,92	0,57	0,80	0,41	0,14	<0,10	16,5	35,8	7,54	1,02	0,83	0,65	<0,10	20,9	3,02	0,61	0,18	<0,10	9,75	
Overflow NAT	11,7	95,1	2,05	0,56	0,84	0,49	0,17	<0,10	14,4	41,4	12,3	0,56	0,66	0,37	<0,10	13,2	2,76	0,38	<0,10	<0,10	11,4	
Overflow ATR	4,9	100,0	2,13	0,56	0,94	0,46	0,17	<0,10	11,9	40,8	13,2	0,43	0,65	0,50	<0,10	13,8	3,07	0,45	0,16	<0,10	12,6	
Total cal.	100,0		1,23	0,35	0,62	0,23	...	...	15,7	35,5	3,88	4,21	0,59	1,29	<0,10	30,11	1,55	0,49	...	<0,10	4,04	

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo, NAT = natural, ATR = gerado na atrição.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+0,60	15,5	20,5	19,1	4,8	28,3	22,9	10,8	1,15	0,48	7,15
-0,60+0,30	13,6	16,6	17,5	6,2	25,8	20,9	10,5	1,04	0,49	6,74
-0,30+0,15	10,4	11,4	14,0	6,3	21,3	16,5	9,4	0,89	0,51	6,19
-0,15+0,074	7,2	9,4	9,4	4,6	12,2	11,0	7,6	0,76	0,52	4,37
-0,074+0,037	5,3	8,8	6,2	4,6	5,1	7,2	6,6	0,64	0,53	2,14
-0,037+0,020	4,1	6,6	3,8	3,9	2,1	4,6	5,4	0,61	0,57	1,04
Underflow1	9,4	7,8	6,3	7,3	2,2	6,7	11,3	0,66	0,65	0,52
Underflow2 NAT	4,5	3,0	2,9	5,7	0,5	1,8	5,1	0,70	0,71	0,29
Underflow2 ATR	2,3	1,6	1,5	2,9	0,4	1,0	3,0	0,64	0,71	0,34
Overflow NAT	19,4	10,7	13,6	37,2	1,6	5,1	20,9	0,74	0,66	0,20
Overflow ATR	8,4	3,7	5,6	16,5	0,5	2,2	9,6	0,69	0,60	0,14
Total cal.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,80	0,56	2,72

Tabela 64 – Resultado da análise granuloquímica na amostra B2 atricionada (topsize de 1,19 mm) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																		
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF
+0,60	13,3	13,3	1,08	0,29	0,59	0,20	<0,10	0,28	0,78	47,5	1,87	1,56	0,90	2,60	<0,10	37,3	2,45	0,54	0,15	<0,10	1,73
-0,60+0,30	13,9	27,2	0,98	0,28	0,52	0,18	<0,10	0,28	0,78	49,7	2,22	1,71	0,91	2,72	<0,10	34,2	2,58	0,52	0,16	<0,10	1,92
-0,30+0,15	13,6	40,8	1,01	0,29	0,54	0,18	<0,10	0,34	1,73	48,5	2,50	2,76	1,01	3,24	<0,10	31,3	3,55	0,54	0,23	<0,10	2,02
-0,15+0,074	11,2	52,0	1,15	0,34	0,60	0,21	<0,10	0,42	3,70	44,3	2,80	3,32	1,16	3,70	<0,10	30,4	4,36	0,56	0,29	<0,10	2,22
-0,074+0,037	9,1	61,1	1,46	0,40	0,71	0,25	0,10	0,44	9,66	37,1	3,62	3,30	1,32	3,56	<0,10	28,7	4,95	0,62	0,36	<0,10	3,39
-0,037+0,020	6,1	67,2	1,77	0,48	0,86	0,32	0,11	0,41	15,2	33,9	4,76	2,57	1,37	2,37	<0,10	24,1	5,38	0,69	0,47	<0,10	5,42
Underflow1	9,0	76,3	2,43	0,63	1,16	0,48	0,17	0,39	11,7	37,4	6,80	2,23	1,28	1,05	<0,10	18,8	6,90	0,82	0,68	<0,10	8,16
Underflow2 NAT	4,0	80,2	2,69	0,69	1,24	0,57	0,20	0,36	8,66	39,7	8,85	2,08	1,43	0,41	<0,10	11,7	7,92	0,78	0,86	<0,10	14,6
Underflow2 ATR	1,7	81,9	2,77	0,69	1,32	0,56	0,21	0,37	8,23	39,0	9,75	2,12	1,50	0,44	<0,10	13,2	7,99	0,79	0,87	<0,10	11,6
Overflow NAT	14,6	96,5	2,33	0,54	1,10	0,51	0,18	0,36	7,48	46,6	9,93	1,61	1,27	0,30	<0,10	8,87	6,28	0,49	0,52	<0,10	12,4
Overflow ATR	3,5	100,0	2,54	0,58	1,21	0,55	0,20	0,39	7,87	44,8	12,1	0,67	1,43	0,33	<0,10	9,69	5,66	0,49	0,47	<0,10	13,4
Total cal.	100,0		1,59	0,42	0,79	0,31	...	0,36	5,58	44,2	4,83	2,23	1,15	2,22	<0,10	25,5	4,62	0,59	0,37	<0,10	5,44

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo, NAT = natural, ATR = gerado na atrição.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+0,60	9,0	1,9	14,3	5,2	9,3	19,5	7,1	0,44	0,49	0,64
-0,60+0,30	8,5	1,9	15,6	6,4	10,7	18,6	7,7	0,38	0,54	0,66
-0,30+0,15	8,7	4,2	14,9	7,0	16,9	16,7	10,5	0,29	0,55	0,78
-0,15+0,074	8,1	7,4	11,2	6,5	16,6	13,3	10,5	0,26	0,57	0,76
-0,074+0,037	8,4	15,8	7,7	6,8	13,5	10,3	9,8	0,30	0,56	0,67
-0,037+0,020	6,8	16,7	4,7	6,0	7,1	5,8	7,1	0,33	0,55	0,48
Underflow1	13,8	18,9	7,6	12,7	9,0	6,7	13,5	0,35	0,54	0,32
Underflow2 NAT	6,7	6,1	3,6	7,2	3,7	1,8	6,8	0,34	0,55	0,26
Underflow2 ATR	2,9	2,5	1,5	3,4	1,6	0,9	2,9	0,35	0,52	0,27
Overflow NAT	21,4	19,5	15,4	29,9	10,5	5,1	19,8	0,37	0,49	0,26
Overflow ATR	5,6	5,0	3,6	8,8	1,1	1,3	4,3	0,45	0,48	0,12
Total cal.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,34	0,53	0,48

Tabela 65 – Resultado da análise granuloquímica na amostra C1 atricionada (sem toptsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																			
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF	
+1,19	13,1	13,1	4,91	0,56	3,88	0,47	<0,10	0,13	5,23	60,4	6,90	0,17	9,00	<0,01	1,11	4,76	0,31	0,14	<0,10	0,43	6,82	
-0,19+0,30	10,9	24,0	5,50	0,97	3,88	0,65	<0,10	0,17	9,05	52,3	10,7	0,19	6,57	<0,01	1,42	4,92	0,46	0,12	<0,10	0,65	8,30	
-0,30+0,074	9,03	33,0	5,95	1,55	3,54	0,86	<0,10	0,14	13,0	38,9	17,6	0,24	3,73	0,12	1,61	4,62	0,58	0,10	<0,10	0,80	11,4	
-0,074+0,020	11,8	44,9	4,71	1,43	2,49	0,79	<0,10	0,14	19,2	23,2	28,6	0,24	1,54	0,17	2,44	3,18	0,58	<0,10	<0,10	0,67	14,5	
Underflow1	15,9	60,8	3,18	0,97	1,67	0,54	<0,10	0,14	32,1	13,4	30,9	0,26	0,65	0,26	3,81	2,03	0,58	<0,10	<0,10	0,46	11,8	
Underflow2 NAT	6,12	66,9	1,83	0,64	0,86	0,33	<0,10	<0,10	38,4	7,65	33,2	0,23	0,30	0,26	4,23	0,92	0,40	<0,10	<0,10	0,31	11,9	
Underflow2 ATR	4,05	70,9	1,91	0,65	0,95	0,31	<0,10	<0,10	37,7	8,11	32,5	0,43	0,34	0,31	4,33	0,94	0,41	<0,10	<0,10	0,32	12,0	
Overflow NAT	23,9	94,8	1,89	0,68	0,88	0,33	<0,10	<0,10	39,4	7,26	34,4	0,26	0,27	0,26	3,14	0,55	0,33	<0,10	<0,10	0,46	12,1	
Overflow ATR	5,15	100,0	2,21	0,76	1,08	0,37	<0,10	<0,10	37,3	8,54	32,3	0,34	0,35	0,30	3,55	0,56	0,35	<0,10	<0,10	0,50	13,0	
Total cal.	100,0		3,60	0,91	2,17	0,52	<0,10	...	25,4	25,0	25,2	0,25	2,63	0,18	2,71	2,53	0,44	...	<0,10	0,52	11,2	

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo, NAT = natural, ATR = gerado na atrição.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)							Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+1,19	17,9	2,7	31,7	3,6	5,4	24,7	9,2	15,8	0,14	0,55
-0,19+0,30	16,6	3,9	22,8	4,6	5,7	21,1	11,3	12,0	0,25	0,41
-0,30+0,074	14,9	4,6	14,1	6,3	5,4	16,5	11,9	10,3	0,44	0,41
-0,074+0,020	15,5	8,9	11,0	13,4	10,7	14,9	15,5	8,12	0,57	0,41
Underflow1	14,1	20,1	8,5	19,5	22,4	12,8	20,9	5,48	0,58	0,45
Underflow2 NAT	3,1	9,2	1,9	8,1	9,6	2,2	5,5	4,58	0,74	0,58
Underflow2 ATR	2,1	6,0	1,3	5,2	6,5	1,5	3,8	4,66	0,68	1,05
Overflow NAT	12,6	37,0	7,0	32,7	27,7	5,2	17,9	5,73	0,77	0,79
Overflow ATR	3,2	7,6	1,8	6,6	6,8	1,1	4,1	6,31	0,70	0,97
Total cal.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,14	0,42	0,56

Tabela 66 – Resultado da análise granuloquímica na amostra D1 atricionada (sem toptsize) e distribuição dos principais óxidos.

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)																				
	ret.	acum.	OTR	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	SrO	ThO ₂	PF		
+0,60	16,9	16,9	1,52	0,32	0,66	0,39	0,15	0,36	4,92	64,4	1,93	1,13	1,29	0,64	<0,10	16,9	3,26	1,46	0,30	<0,10	1,17		
-0,60+0,30	7,2	24,1	1,81	0,41	0,84	0,42	0,15	0,48	6,73	50,8	2,46	4,71	1,37	0,50	<0,10	18,7	6,57	1,83	0,44	<0,10	1,37		
-0,30+0,15	9,6	33,7	1,68	0,38	0,76	0,40	0,14	0,51	9,81	43,9	3,50	5,60	1,32	0,47	0,13	17,9	8,00	2,19	0,57	<0,10	3,49		
-0,15+0,074	12,3	46,0	1,73	0,41	0,79	0,40	0,14	0,50	16,5	36,5	4,24	4,01	1,30	0,41	0,28	18,5	7,50	2,48	0,68	<0,10	4,44		
-0,074+0,037	12,8	58,8	2,07	0,48	0,97	0,48	0,14	0,46	27,5	30,1	4,36	2,71	1,11	0,34	0,25	14,3	6,99	2,53	0,66	<0,10	5,05		
-0,037+0,020	9,3	68,1	2,61	0,62	1,19	0,62	0,17	0,41	29,6	30,4	5,06	1,97	1,01	0,33	0,16	10,0	7,26	3,01	0,72	<0,10	6,23		
Underflow1	13,8	81,9	5,20	1,19	2,44	1,25	0,31	0,36	20,4	35,7	5,45	1,65	1,00	0,36	0,10	8,06	8,66	3,15	0,87	<0,10	8,02		
Underflow2 NAT	3,5	85,5	7,84	1,63	3,67	2,09	0,45	0,19	13,4	48,9	3,13	1,47	1,34	0,47	<0,10	4,00	7,49	1,63	0,65	<0,10	9,21		
Underflow2 ATR	1,4	86,8	6,62	1,45	3,10	1,69	0,39	0,24	15,8	45,1	3,80	1,62	1,23	0,44	<0,10	5,45	7,62	2,02	0,70	<0,10	9,04		
Overflow NAT	10,2	97,0	11,1	2,22	5,16	3,07	0,64	0,17	4,95	56,2	2,37	1,22	1,84	0,54	<0,10	2,50	7,56	0,98	0,53	<0,10	9,99		
Overflow ATR	3,0	100,0	10,5	2,18	4,91	2,77	0,60	0,18	5,69	54,7	2,57	1,45	1,71	0,59	<0,10	3,37	7,41	1,04	0,52	<0,10	9,80		
Total calc.	100,0		3,80	0,82	1,76	0,97	0,25	0,38	14,7	44,6	3,62	2,56	1,28	0,46	...	12,6	6,84	2,15	0,59	<0,10	5,27		

Obs: OTR = óxidos de terras raras (soma de La₂O₃, CeO₂, Nd₂O₃ e Pr₆O₁₁), PF = perda ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo, NAT = natural, ATR = gerado na atrição.

Fração (mm)	Distribuição no ensaio (%)								Relações		
	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR/P ₂ O ₅	La ₂ O ₃ /CeO ₂	CaO/P ₂ O ₅
+0,60	6,7	5,6	24,4	9,0	7,5	22,7	8,1	11,5	0,47	0,49	0,35
-0,60+0,30	3,4	3,3	8,2	4,9	13,2	10,6	6,9	6,1	0,28	0,49	0,72
-0,30+0,15	4,3	6,4	9,5	9,3	21,1	13,6	11,3	9,8	0,21	0,49	0,70
-0,15+0,074	5,6	13,7	10,1	14,4	19,2	18,0	13,5	14,2	0,23	0,51	0,53
-0,074+0,037	7,0	23,8	8,6	15,4	13,5	14,4	13,0	15,0	0,30	0,49	0,39
-0,037+0,020	6,4	18,7	6,4	13,0	7,2	7,4	9,9	13,1	0,36	0,52	0,27
Underflow1	18,9	19,2	11,1	20,8	8,9	8,8	17,5	20,3	0,60	0,49	0,19
Underflow2 NAT	7,3	3,2	3,9	3,1	2,0	1,1	3,9	2,7	1,05	0,45	0,20
Underflow2 ATR	2,4	1,5	1,4	1,4	0,9	0,6	1,5	1,3	0,87	0,47	0,21
Overflow NAT	29,8	3,4	12,9	6,7	4,9	2,0	11,3	4,7	1,47	0,43	0,16
Overflow ATR	8,2	1,1	3,6	2,1	1,7	0,8	3,2	1,4	1,41	0,44	0,20
Total calc.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,55	0,47	0,37

Tabela 67 – Resultado das separações minerais - amostra A1 (frações acima de 0,020 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO		
Fração -0,30+0,15 mm																											
FL 2,95	5,6	1,1	0,49	74,5	7,83	5,88	0,82	1,03	1,97	0,70	6,28	2,2	81,4	0,8	4,9	0,7	1,8	0,9	0,2	23,4	0,2	0,8	0,1	0,3	0,2		
INT 2,95-3,30	10,1	1,9	1,65	20,3	14,6	21,0	6,88	2,75	22,8	11,4	13,8	13,1	4,0	2,6	31,6	3,5	37,6	26,9	1,1	1,2	0,5	4,9	0,7	6,0	4,8		
MAG T.Davis 1,0A	37,9	7,2	0,66	0,35	84,9	2,41	0,18	5,58	1,46	0,70	1,37	19,8	2,6	56,1	13,6	26,6	9,1	6,2	1,6	0,7	11,8	2,1	5,0	1,5	1,1		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	39,6	7,5	1,59	1,29	55,7	6,92	0,51	10,5	6,31	4,28	9,08	49,7	10,0	38,4	40,9	52,3	40,9	39,5	4,0	2,9	8,1	6,3	9,8	6,6	7,1		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	6,9	1,3	2,77	1,49	17,9	8,61	1,00	19,5	9,33	16,4	12,3	15,2	2,0	2,2	8,9	16,9	10,6	26,5	1,2	0,6	0,5	1,4	3,2	1,7	4,8		
Total calculado	100,0	19,1	1,26	5,11	57,3	6,69	1,08	7,96	6,10	4,28	6,70	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		8,1	28,8	21,1	15,5	18,7	16,0	18,0		
Total dosado			1,15	7,63	56,0	6,44	1,06	7,75	5,81	4,10	5,49																
Fração -0,15+0,074 mm																											
FL 2,95	6,1	0,9	0,49	72,4	8,74	6,36	0,70	1,09	1,86	0,72	6,51	1,9	78,5	1,0	5,3	0,6	1,7	0,9	0,2	13,3	0,2	0,8	0,1	0,3	0,2		
INT 2,95-3,30	8,8	1,4	1,60	3,02	14,7	20,2	6,96	2,58	22,3	11,2	13,7	8,9	4,8	2,5	24,2	2,2	29,3	20,2	0,8	0,8	0,4	3,5	0,4	4,5	3,5		
MAG T.Davis 1,0A	31,0	4,8	0,80	0,48	81,3	3,23	0,20	6,66	1,77	0,85	2,24	15,8	2,7	49,4	13,6	19,7	8,2	5,4	1,5	0,4	7,5	2,0	4,0	1,3	0,9		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	48,2	7,4	2,02	1,43	48,4	7,76	0,62	14,0	7,32	4,87	9,25	62,0	12,3	45,9	51,0	64,6	52,8	48,0	5,8	2,1	7,0	7,4	13,2	8,1	8,4		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	5,9	0,9	3,03	1,65	9,64	7,24	1,94	22,9	9,03	20,9	11,0	11,4	1,8	1,1	5,9	13,0	8,0	25,4	1,1	0,3	0,2	0,9	2,6	1,2	4,5		
Total calculado	100,0	15,4	1,57	5,59	50,9	7,34	1,13	10,5	6,69	4,89	7,41	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		9,4	16,9	15,2	14,6	20,4	15,3	17,5		
Total dosado			1,66	5,56	50,0	7,48	1,17	10,5	6,87	4,95	7,70																
Fração -0,074+0,037 mm																											
FL 2,95	5,7	0,7	0,53	69,1	9,53	7,59	0,64	1,04	1,99	0,78	7,52	1,5	73,2	1,2	5,4	0,5	1,5	0,8	0,1	9,8	0,1	0,7	0,1	0,2	0,1		
INT 2,95-3,30	5,4	0,7	1,80	4,17	19,0	19,3	4,63	3,02	19,9	10,7	14,2	4,7	4,2	2,3	12,8	1,4	14,2	10,2	0,5	0,6	0,3	1,7	0,3	2,0	1,7		
MAG T.Davis 1,0A	20,3	2,6	0,88	0,48	80,7	3,49	0,19	6,60	1,87	0,91	2,39	8,7	1,8	35,9	8,7	11,4	5,0	3,3	0,9	0,2	4,1	1,2	2,2	0,7	0,6		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	64,6	8,4	2,63	1,62	42,5	8,99	0,88	14,8	8,75	5,59	10,1	82,6	19,3	60,2	71,4	81,4	74,6	63,8	8,3	2,6	6,9	9,5	15,5	10,7	10,8		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	4,0	0,5	1,24	2,04	4,69	3,37	7,32	15,4	8,83	3,01	5,84	2,4	1,5	0,4	1,7	5,2	4,7	21,9	0,2	0,2	0,0	0,2	1,0	0,7	3,7		
Total calculado	100,0	13,0	2,05	5,41	45,6	8,13	1,19	11,7	7,57	5,65	8,44	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		10,0	13,4	11,5	13,4	19,0	14,3	16,9		
Total dosado			2,09	5,19	44,7	8,10	1,17	11,5	7,57	5,65	8,75																
Fração -0,037+0,020 mm																											
FL 2,95	5,3	0,4	0,57	68,7	8,91	7,44	0,73	0,85	2,81	1,29	7,42	1,2	65,7	1,2	4,5	0,4	1,7	1,0	0,1	6,0	0,1	0,4	0,0	0,2	0,1		
INT 2,95-3,30	15,7	1,3	1,92	6,24	17,0	19,9	4,26	2,08	20,4	11,1	14,1	12,3	17,8	6,5	35,5	2,8	35,9	26,8	0,9	1,6	0,4	3,4	0,4	4,0	3,5		
MAG T.Davis 1,0A	9,1	0,8	0,61	0,30	86,9	1,84	0,15	4,50	1,11	0,51	1,01	2,3	0,5	19,3	1,9	3,5	1,1	0,7	0,2	0,0	1,3	0,2	0,4	0,1	0,1		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	67,2	5,7	3,00	1,28	44,3	7,48	0,78	15,1	7,94	5,63	9,87	82,2	15,5	72,8	57,0	88,1	59,7	57,9	6,2	1,4	5,0	5,4	11,0	6,6	7,4		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	2,7	0,2	1,81	0,98	4,35	3,61	1,89	21,6	4,98	32,4	6,65	2,0	0,5	0,3	1,1	5,1	1,5	13,5	0,2	0,0	0,0	0,1	0,6	0,2	1,7		
Total calculado	100,0	8,5	2,45	5,53	40,9	8,81	1,30	11,5	8,93	6,53	9,52	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		7,5	9,1	6,8	9,5	12,5	11,1	12,9		
Total dosado			2,42	5,45	40,8	8,86	1,34	11,7	9,07	6,61	9,67																
Fração -0,30+0,020 mm																											
FL 2,95	5,7	3,2	0,51	71,8	8,65	6,64	0,73	1,02	2,06	0,81	6,80	1,7	76,2	1,0	5,0	0,6	1,7	0,9	0,6	52,5	0,5	2,7	0,4	0,9	0,6		
INT 2,95-3,30	9,5	5,3	1,72	3,62	15,8	20,3	5,94	2,57	21,6	11,2	13,9	9,6	6,4	3,0	25,6	2,4	29,2	20,8	3,3	4,1	1,6	13,5	1,7	16,5	13,6		
MAG T.Davis 1,0A	27,5	15,4	0,74	0,41	83,2	2,82	0,19	6,04	1,61	0,77	1,80	11,9	2,1	45,5	10,3	16,5	6,3	4,2	4,1	1,5	24,8	5,4	11,6	3,6	2,7		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	52,0	29,1	2,27	1,42	47,8	7,84	0,70	13,6	7,59	5,07	9,58	69,0	13,7	49,3	54,2	69,9	56,1	51,6	24,3	9,0	26,9	28,7	49,5	32,0	33,8		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	5,3	3,0	2,51	1,60	12,0	6,89	2,46	20,0	8,82	2,16	7,03	7,8	1,6	1,3	4,9	10,6	6,7	22,5	2,7	1,1	0,7	2,6	7,5	3,8	14,7		
Total calculado	100,0	56,0	1,71	5,38	50,3	7,52	1,15	10,1	7,03	5,11	10,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		35,1	68,2	54,6	52,9	70,7	56,8	65,3		
Total dosado																											

Obs: PF = perda ao fogo, gf = ganho ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo ou massa insuficiente para análise.

Tabela 68 – Resultado das separações minerais - amostra A2 (frações acima de 0,020 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO		
Fração -0,30+0,15 mm																											
FL 2,95	27,5	5,1	0,86	82,6	7,59	2,52	0,17	0,75	1,09	0,56	3,60	12,6	87,9	6,9	9,0	2,1	3,8	3,2	1,2	20,6	1,2	1,5	0,4	0,7	0,6		
INT 2,95-3,30	15,9	2,9	2,52	12,0	10,5	18,0	7,07	3,15	20,9	10,0	12,1	21,3	7,3	5,5	37,1	5,0	42,3	33,6	2,1	1,7	1,0	6,1	1,0	7,3	6,4		
MAG T.Davis 1,0A	11,6	2,2	0,36	0,84	84,8	1,56	0,15	6,55	1,04	0,52	1,02	2,2	0,4	32,6	2,3	7,7	1,5	1,3	0,2	0,1	5,7	0,4	1,6	0,3	0,2		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	30,3	5,6	2,15	2,30	50,4	7,05	0,46	13,1	7,04	4,49	9,20	34,6	2,7	50,6	27,6	39,9	27,1	28,6	3,4	0,6	8,9	4,5	8,1	4,7	5,5		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	14,7	2,7	3,75	3,00	8,89	12,6	0,97	30,7	13,5	10,8	9,10	29,3	1,7	4,3	24,0	45,3	25,2	33,3	2,8	0,4	0,8	3,9	9,2	4,4	6,4		
Total calculado	100,0	18,6	1,88	25,9	30,2	7,72	1,47	9,93	7,86	4,75	7,15	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		9,7	23,4	17,5	16,4	20,4	17,3	19,2		
Total dosado			1,92	25,6	29,7	7,70	1,50	10,0	7,97	4,78	7,10																
Fração -0,15+0,074 mm																											
FL 2,95	25,9	3,9	0,69	83,2	6,66	2,57	0,15	0,71	0,99	0,41	3,63	8,4	88,2	6,2	8,4	1,6	3,0	2,1	0,8	16,7	0,8	1,2	0,3	0,5	0,4		
INT 2,95-3,30	16,7	2,5	2,12	10,6	10,1	18,0	8,53	3,06	22,0	9,93	12,0	16,7	7,2	6,1	37,8	4,5	43,1	33,1	1,5	1,4	0,8	5,3	0,8	6,6	5,5		
MAG T.Davis 1,0A	8,2	1,2	0,35	0,92	85,4	1,42	0,17	6,56	1,01	0,51	1,06	1,4	0,3	25,1	1,5	4,7	1,0	0,8	0,1	0,1	3,4	0,2	0,9	0,1	0,1		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	38,0	5,8	2,94	1,86	44,0	7,65	0,56	15,9	8,12	5,20	9,33	52,8	2,9	60,3	36,7	53,6	36,2	39,4	4,8	0,5	8,1	5,2	10,1	5,5	6,5		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	11,2	1,7	3,90	2,91	5,84	11,1	1,57	35,7	12,7	11,0	8,55	20,7	1,3	2,4	15,7	35,5	16,7	24,6	1,9	0,3	0,3	2,2	6,7	2,5	4,1		
Total calculado	100,0	15,3	2,12	24,4	27,8	7,93	1,87	11,3	8,53	5,01	7,54	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		9,1	18,9	13,4	14,1	18,8	15,2	16,5		
Total dosado			2,21	25,1	27,6	8,02	1,77	11,2	8,52	5,01	7,42																
Fração -0,074+0,037 mm																											
FL 2,95	25,8	3,5	0,75	79,8	6,74	4,01	0,19	0,89	1,35	0,50	5,43	7,3	88,8	6,5	12,1	2,0	4,1	2,5	0,7	14,4	0,7	1,6	0,3	0,6	0,4		
INT 2,95-3,30	12,9	1,7	2,16	9,51	13,1	19,1	5,37	3,39	20,5	10,6	12,9	10,5	5,3	6,4	28,9	3,8	30,9	26,5	1,0	0,9	0,7	3,8	0,6	4,2	4,0		
MAG T.Davis 1,0A	4,3	0,6	0,34	0,96	85,7	1,29	0,19	5,58	0,92	0,45	1,27	0,6	0,2	13,8	0,6	2,1	0,5	0,4	0,1	0,0	1,6	0,1	0,4	0,1	0,1		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	51,1	6,9	3,93	2,17	37,7	8,70	0,69	16,8	9,41	5,76	9,64	75,9	4,8	72,5	52,1	74,1	56,2	56,9	7,4	0,8	8,2	6,9	12,7	7,6	8,6		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	6,0	0,8	2,56	3,80	3,58	8,93	4,19	35,0	12,0	11,9	8,44	5,8	1,0	0,8	6,3	18,1	8,4	13,7	0,6	0,2	0,1	0,8	3,1	1,1	2,1		
Total calculado	100,0	13,6	2,65	23,2	26,6	8,53	1,35	11,6	8,56	5,16	8,55	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		9,8	16,2	11,3	13,2	17,1	13,6	15,1		
Total dosado			2,65	24,2	26,2	8,47	1,28	11,5	8,54	5,16	7,81																
Fração -0,037+0,020 mm																											
FL 2,95	24,4	2,3	0,66	83,6	5,89	2,69	0,21	0,75	1,48	0,63	3,76	5,4	86,2	5,8	7,5	1,6	4,0	2,7	0,4	10,2	0,4	0,7	0,2	0,4	0,3		
INT 2,95-3,30	19,3	1,8	1,98	11,9	12,5	19,5	3,31	2,91	20,0	11,6	12,8	12,7	9,7	9,7	43,0	4,9	42,2	39,8	1,0	1,1	0,7	3,9	0,6	4,2	4,5		
MAG T.Davis 1,0A	2,0	0,2	0,14	0,68	89,8	0,67	0,15	3,63	0,53	0,25	0,11	0,1	0,1	7,1	0,2	0,6	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	50,8	4,7	4,58	1,72	37,7	7,22	0,68	18,0	9,01	5,51	9,43	77,4	3,7	76,8	46,3	80,1	50,2	50,1	5,8	0,4	5,6	4,2	9,6	5,0	5,7		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	3,6	0,3	3,72	2,22	5,23	7,94	1,27	40,0	8,91	11,3	...	4,5	0,3	0,8	3,0	12,7	3,5	7,3	0,3	0,0	0,1	0,3	1,5	0,3	0,8		
Total calculado	100,0	9,3	3,01	23,6	24,9	8,71	1,08	11,4	9,12	5,62	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		7,5	11,8	7,3	9,1	12,0	9,9	11,4		
Total dosado			2,97	25,5	24,7	8,45	1,05	11,7	9,03	5,64	7,72																
Fração -0,30+0,020 mm																											
FL 2,95	26,2	14,8	0,76	82,2	6,88	2,91	0,18	0,77	1,18	0,52	4,06	8,6	87,9	6,5	9,4	1,8	3,7	2,7	3,1	61,9	3,2	4,9	1,3	2,1	1,7		
INT 2,95-3,30	15,9	9,0	2,23	11,1	11,3	18,5	6,41	3,12	21,0	10,4	12,4	15,4	7,2	6,5	36,2	4,6	39,7	32,8	5,6	5,1	3,2	19,1	3,1	22,3	20,4		
MAG T.Davis 1,0A	7,3	4,2	0,35	0,87	85,3	1,44	0,16	6,29	0,99	0,49	1,03	1,1	0,3	22,5	1,3	4,2	0,9	0,7	0,4	0,2	11,1	0,7	2,9	0,5	0,4		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	40,7	23,1	3,38	2,03	42,2	7,88	0,60	15,9	8,43	5,26	9,41	59,5	3,4	62,1	39,4	59,3	40,8	42,3	21,4	2,4	30,7	20,8	40,5	22,8	26,3		
AF 3,30 NIMAG Frantz 0,20A	9,9	5,6	3,62	3,04	6,96	11,3	1,64	33,4	12,8	11,0	...	15,4	1,2	2,5	13,7	30,1	14,9	21,5	5,6	0,9	1,2	7,2	20,5	8,4	13,4		
Total calculado	100,0	56,7	2,31	24,5	27,8	8,14	1,48	10,9	8,42	5,06	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		36,2	70,4	49,5	52,7	68,3	56,0	62,4		

Tabela 69 – Resultado das separações minerais - amostra A3 (frações acima de 0,037 mm).

Produto	% Massa		% Massa									Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)						
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO
Fração -1,19+0,30 mm																									
FL 2,95	56,7	3,7	0,29	72,8	9,31	8,37	0,11	0,59	1,19	0,64	5,53	20,0	96,4	15,0	65,7	28,5	33,8	30,8	0,9	7,9	1,5	1,8	1,0	2,0	2,0
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	36,3	2,4	0,99	2,96	76,8	3,27	0,12	1,55	1,40	0,88	7,66	43,4	2,5	79,2	16,4	47,9	25,4	26,9	2,0	0,2	7,8	0,4	1,7	1,5	1,7
AF 2,95 NMAG Frantz 0,15A	7,0	0,5	4,34	6,45	29,5	18,4	0,34	3,95	11,7	7,19	9,64	36,6	1,1	5,9	17,8	23,5	40,8	42,3	1,7	0,1	0,6	0,5	0,8	2,4	2,7
Total calculado	100,0	6,5	0,83	42,8	35,2	7,22	0,13	1,17	2,00	1,19	6,59	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,7	8,2	9,8	2,7	3,6	5,9	6,4
Total dosado			0,93	45,4	31,2	8,91	0,14	1,24	2,16	1,31	6,92														
Fração -0,30+0,15 mm																									
FL 2,95	69,3	3,7	<0,10*	85,6	4,69	6,32	0,11	0,43	0,51	0,23	0,94	0,0	97,6	17,1	59,4	21,6	16,9	11,9	0,0	8,2	0,8	1,3	0,7	0,8	0,6
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	22,9	1,2	1,91	4,03	60,5	6,72	0,16	2,45	3,41	2,51	11,7	55,0	1,5	73,1	20,8	40,6	37,4	43,3	1,8	0,1	3,6	0,4	1,4	1,7	2,2
AF 2,95 NMAG Frantz 0,15A	7,9	0,4	4,54	6,48	23,5	18,5	0,45	6,60	12,1	7,54	13,4	45,0	0,8	9,8	19,8	37,8	45,7	44,8	1,5	0,1	0,5	0,4	1,3	2,1	2,2
Total calculado	100,0	5,3	...	60,7	18,9	7,37	0,15	1,38	2,09	1,33	4,38	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,4	8,4	4,9	2,1	3,4	4,6	5,0
Total dosado			0,82	57,5	19,3	8,78	0,18	1,48	2,06	1,28	6,45														
Fração -0,15+0,074 mm																									
FL 2,95	71,8	4,6	0,11	72,2	6,15	11,8	0,14	0,90	0,60	0,24	7,09	8,6	97,2	25,8	73,0	29,2	20,0	13,1	0,4	9,7	1,4	2,2	1,8	1,2	0,9
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	19,8	1,3	2,19	4,68	56,9	7,45	0,18	3,69	3,17	2,27	12,4	46,1	1,7	65,8	12,7	33,0	29,1	33,9	2,0	0,2	3,6	0,4	2,0	1,7	2,3
AF 2,95 NMAG Frantz 0,15A	8,5	0,5	5,04	6,61	16,9	19,5	0,44	9,89	13,0	8,26	13,4	45,3	1,1	8,4	14,3	37,8	50,9	52,9	2,0	0,1	0,5	0,4	2,3	3,0	3,6
Total calculado	100,0	6,5	0,94	53,3	17,1	11,6	0,17	2,21	2,15	1,32	8,67	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,3	10,0	5,5	3,1	6,1	5,9	6,7
Total dosado			0,87	56,3	17,6	10,3	0,15	2,17	2,18	1,41	7,11														
Fração -0,074+0,037 mm																									
FL 2,95	70,0	4,6	<0,10*	75,4	4,19	11,8	0,11	0,60	0,42	0,18	5,31	0,0	97,1	18,8	71,0	14,5	12,9	8,8	0,0	9,9	0,9	2,2	1,2	0,8	0,7
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	24,5	1,6	2,99	5,06	49,4	9,77	0,22	6,22	5,22	3,39	10,9	70,9	2,3	77,6	20,5	52,6	56,1	57,4	3,3	0,2	3,7	0,6	4,3	3,6	4,3
AF 2,95 NMAG Frantz 0,15A	5,5	0,4	5,43	6,05	10,2	17,9	0,38	17,3	12,8	8,85	12,2	29,1	0,6	3,6	8,5	32,9	30,9	33,8	1,4	0,1	0,2	0,3	2,7	2,0	2,5
Total calculado	100,0	6,5	...	54,3	15,6	11,7	0,15	2,90	2,27	1,44	7,06	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,7	10,2	4,8	3,1	8,2	6,4	7,5
Total dosado			0,92	56,9	15,3	10,3	0,15	2,87	2,33	1,56	6,63														
Fração -1,19+0,037 mm																									
FL 2,95	66,8	16,6	...	76,2	5,99	9,82	0,12	0,64	0,66	0,31	4,89	7,2	97,1	18,3	68,7	22,2	20,8	15,8	1,3	35,7	4,6	7,5	4,7	4,8	4,1
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	26,0	6,5	1,89	4,02	63,0	6,35	0,16	3,30	3,07	2,08	10,2	54,5	2,0	75,0	17,3	44,2	37,5	41,0	9,2	0,7	18,7	1,9	9,4	8,5	10,5
AF 2,95 NMAG Frantz 0,15A	7,2	1,8	4,82	6,43	20,3	18,6	0,40	9,09	12,4	7,94	12,2	38,3	0,9	6,7	14,0	33,6	41,7	43,2	6,6	0,3	1,7	1,6	7,2	9,5	11,0
Total calculado	100,0	24,8	...	52,4	21,9	9,55	0,15	1,94	2,13	1,32	6,78	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	17,1	36,7	25,1	11,0	21,3	22,9	25,6

Obs: PF = perda ao fogo, gf = ganho ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo ou massa insuficiente para análise, * = para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de OTR <0,10% igual zero para determinados produtos.

Tabela 70 – Resultado das separações minerais - amostra A4 (frações acima de 0,037 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)									Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)								
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO		
Fração -1,19+0,30 mm																											
FL 2,95	10,1	0,9	1,59	37,0	12,7	15,9	0,34	1,56	10,9	7,08	10,7	9,2	61,8	2,6	16,0	6,8	12,9	12,0	0,3	3,8	0,3	1,2	0,4	1,2	1,3		
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	53,2	5,0	0,62	1,92	77,3	1,97	0,13	1,55	1,70	1,17	9,02	18,8	17,0	83,0	10,5	35,7	10,6	10,6	0,7	1,1	10,0	0,8	2,0	1,0	1,1		
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	19,3	1,8	3,65	3,05	25,5	17,5	0,41	3,87	15,7	11,0	13,8	40,5	9,8	10,0	33,9	32,4	35,6	36,1	1,5	0,6	1,2	2,6	1,8	3,4	3,9		
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	17,4	1,6	3,15	3,94	12,7	22,7	0,50	3,35	20,1	14,1	14,3	31,4	11,4	4,5	39,6	25,2	40,9	41,3	1,1	0,7	0,5	3,1	1,4	3,9	4,4		
Total calculado	100,0	9,4	1,74	6,02	49,6	9,96	0,27	2,31	8,54	5,92	11,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,6	6,2	12,1	7,7	5,5	9,6	10,7		
Total dosado			1,54	7,11	50,3	10,1	0,25	2,13	8,32	5,81	9,97																
Fração -0,30+0,15 mm																											
FL 2,95	12,1	0,7	0,51	68,6	6,96	8,87	0,20	0,87	3,26	2,00	7,24	2,8	75,7	2,2	9,5	2,6	4,2	3,7	0,1	4,7	0,1	0,5	0,2	0,3	0,3		
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	47,6	2,6	1,38	2,05	67,1	3,70	0,17	2,42	3,12	2,48	11,0	29,4	8,9	83,3	15,7	28,9	15,9	18,2	0,8	0,6	4,7	0,8	1,7	1,0	1,3		
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	28,9	1,6	3,94	2,73	16,2	21,1	0,49	4,50	18,9	12,7	14,0	51,1	7,2	12,2	54,4	32,6	58,6	56,8	1,3	0,4	0,7	2,8	1,9	3,7	4,1		
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	11,4	0,6	3,27	7,80	7,88	20,1	0,48	12,6	17,5	12,2	12,2	16,7	8,1	2,3	20,3	35,9	21,3	21,3	0,4	0,5	0,1	1,0	2,1	1,3	1,5		
Total calculado	100,0	5,6	2,23	10,9	38,4	11,2	0,30	4,00	9,35	6,49	11,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,6	6,2	5,6	5,2	5,9	6,3	7,1		
Total dosado			1,87	12,0	39,2	11,4	0,30	3,87	9,20	6,53	10,5																
Fração -0,15+0,074 mm																											
FL 2,95	14,9	0,9	0,31	79,2	5,05	6,36	0,16	0,59	1,22	0,66	5,65	1,5	82,8	2,5	7,8	1,4	1,8	1,4	0,1	6,5	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1		
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	41,6	2,5	2,45	2,17	56,1	6,28	0,24	3,89	5,51	4,20	11,5	33,1	6,4	78,9	21,5	25,1	22,3	24,8	1,1	0,5	4,1	1,2	2,5	1,5	2,0		
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	33,6	2,0	4,80	3,02	14,0	20,4	0,51	7,78	18,6	12,3	13,4	52,1	7,1	15,9	56,3	40,5	60,7	58,6	1,8	0,6	0,8	3,2	4,0	4,2	4,7		
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	10,0	0,6	4,12	5,23	7,96	17,4	0,48	21,3	15,8	10,7	10,9	13,3	3,7	2,7	14,3	33,0	15,3	15,1	0,4	0,3	0,1	0,8	3,3	1,1	1,2		
Total calculado	100,0	6,0	3,09	14,2	29,6	12,1	0,34	6,44	10,3	7,03	11,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,4	7,9	5,3	5,7	9,9	7,0	7,9		
Total dosado			2,24	14,0	33,9	11,5	0,31	5,93	9,37	6,67	10,8																
Fração -0,074+0,037 mm																											
FL 2,95	14,5	1,0	0,42	74,4	6,23	8,38	0,17	0,70	1,28	0,67	7,06	1,6	76,2	3,4	9,7	1,3	1,7	1,4	0,1	6,7	0,2	0,7	0,2	0,1	0,1		
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	60,1	4,2	4,09	2,57	38,0	11,4	0,37	5,67	10,6	7,20	12,8	64,6	11,0	86,8	54,9	44,1	60,1	61,0	3,3	1,0	4,7	3,7	5,8	5,1	5,8		
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	22,5	1,6	5,36	3,64	10,6	18,2	0,49	15,9	17,1	11,3	12,0	31,7	5,8	9,1	33,0	46,4	36,4	35,8	1,6	0,5	0,5	2,2	6,1	3,1	3,4		
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	2,9	0,2	2,69	34,3	6,02	10,3	0,31	21,9	6,51	4,56	7,80	2,0	7,0	0,7	2,4	8,2	1,8	1,8	0,1	0,6	0,0	0,2	1,1	0,1	0,2		
Total calculado	100,0	6,9	18,8	14,1	26,3	12,5	0,37	7,73	10,6	7,10	11,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,1	8,9	5,4	6,8	13,1	8,4	9,4		
Total dosado			2,96	13,7	30,3	12,1	0,34	6,86	9,89	6,91	10,7																
Fração -1,19+0,037 mm																											
FL 2,95	12,6	3,5	0,72	64,4	7,80	9,97	0,22	0,94	4,23	2,64	7,70	3,5	75,3	2,6	11,1	2,4	5,5	5,1	0,5	21,8	0,8	2,8	0,8	1,8	1,8		
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	51,3	14,3	2,09	2,18	60,3	5,78	0,23	3,32	5,22	3,70	10,9	40,6	10,4	83,0	26,2	34,9	27,9	28,9	5,9	3,1	23,5	6,6	12,0	8,6	10,2		
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	25,1	7,0	4,43	3,10	16,7	19,3	0,48	7,83	17,6	11,8	13,3	42,1	7,2	11,3	42,9	40,3	46,1	45,3	6,2	2,1	3,2	10,9	13,8	14,3	16,0		
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	11,0	3,1	3,33	6,97	10,4	20,3	0,48	10,0	17,8	12,4	12,8	13,8	7,1	3,1	19,7	22,5	20,4	20,7	2,1	2,1	0,8	5,1	7,9	6,5	7,3		
Total calculado	100,0	27,9	2,64	10,8	37,2	11,3	0,32	4,89	9,59	6,57	11,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	14,7	29,1	28,3	25,4	34,5	31,2	35,3		

Tabela 71 – Resultado das separações minerais - amostra A5 (frações acima de 0,037 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)								Distribuição na amostra (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO			
Fração -1,19+0,30 mm																												
FL 2,95	36,7	3,1	0,89	43,3	14,9	20,5	0,13	1,67	2,22	1,32	13,3	11,2	84,7	14,8	55,3	28,1	20,1	16,0	1,1	5,8	1,7	3,0	1,8	2,2	2,0			
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	48,0	4,1	3,23	38,2	58,2	6,91	0,15	2,06	2,78	2,35	11,6	53,5	9,8	75,4	24,4	45,4	32,9	37,3	5,4	0,7	8,9	1,3	2,9	3,5	4,6			
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	10,6	0,9	8,62	3,95	30,1	14,9	0,31	3,04	11,5	7,96	13,7	31,4	2,2	8,6	11,6	14,7	29,9	27,8	3,2	0,2	1,0	0,6	0,9	3,2	3,4			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	4,8	0,4	2,34	12,7	9,30	24,7	0,35	5,38	14,6	12,0	13,8	3,9	3,2	1,2	8,7	11,8	17,2	19,0	0,4	0,2	0,1	0,5	0,8	1,8	2,3			
Total calculado	100,0	8,6	2,90	18,7	37,0	13,6	0,17	2,18	4,06	3,02	12,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	10,2	6,8	11,8	5,4	6,4	10,7	12,3			
Total dosado			3,03	18,5	36,4	14,3	0,18	2,18	4,34	3,23	12,4																	
Fração -0,30+0,15 mm																												
FL 2,95	39,8	1,9	0,60	51,9	10,1	18,9	0,20	1,75	2,20	1,45	11,7	8,2	87,7	12,5	57,0	25,0	20,5	17,7	0,5	4,3	0,7	1,7	1,3	1,2	1,2			
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	43,7	2,1	3,00	3,86	57,5	6,26	0,16	2,46	2,53	2,47	11,8	44,9	7,2	78,0	20,8	38,7	25,9	33,1	2,6	0,4	4,6	0,6	1,9	1,6	2,3			
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	11,2	0,5	11,1	3,74	23,4	15,2	0,38	4,54	13,8	8,90	12,8	42,4	1,8	8,1	12,9	18,2	36,2	30,5	2,5	0,1	0,5	0,4	0,9	2,2	2,1			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	5,4	0,3	2,43	14,7	7,84	22,7	0,49	9,30	13,8	11,3	13,2	4,5	3,4	1,3	9,3	18,1	17,5	18,7	0,3	0,2	0,1	0,3	0,9	1,1	1,3			
Total calculado	100,0	4,9	2,92	23,5	32,2	13,2	0,22	2,78	4,27	3,26	11,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,8	5,0	5,9	3,0	5,0	6,1	7,0			
Total dosado			3,04	23,5	31,9	13,8	0,21	3,02	4,30	3,23	11,8																	
Fração -0,15+0,074 mm																												
FL 2,95	39,4	1,8	0,50	53,7	8,96	19,9	0,21	1,71	1,90	1,30	10,9	6,7	89,1	11,7	55,8	16,2	14,9	13,7	0,3	4,1	0,6	1,6	1,1	1,0	1,0			
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	41,3	1,9	3,09	3,87	58,4	6,27	0,16	3,61	2,82	2,27	11,7	42,9	6,7	80,1	18,4	35,9	23,1	25,0	2,2	0,3	4,1	0,5	2,4	1,5	1,9			
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	12,6	0,6	10,8	3,50	16,6	16,4	0,43	9,07	15,7	10,5	12,1	46,1	1,9	7,0	14,8	27,6	39,4	35,2	2,4	0,1	0,4	0,4	1,8	2,5	2,6			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	6,7	0,3	1,91	8,18	5,37	23,1	0,58	12,6	17,1	14,7	12,8	4,3	2,3	1,2	11,0	20,3	22,6	26,1	0,2	0,1	0,1	0,3	1,3	1,5	1,9			
Total calculado	100,0	4,5	2,97	23,7	30,1	14,1	0,24	4,15	5,04	3,75	11,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,2	4,6	5,2	2,8	6,6	6,4	7,4			
Total dosado			2,93	23,8	30,0	14,0	0,26	4,26	4,92	3,70	12,0																	
Fração -0,074+0,037 mm																												
FL 2,95	38,5	2,4	0,41	45,4	8,27	24,9	0,17	1,82	2,23	1,66	13,5	5,4	86,9	11,3	58,8	13,2	15,0	15,1	0,4	4,9	0,8	2,8	1,6	1,6	1,7			
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	48,9	3,1	4,06	4,07	48,7	8,73	0,23	5,72	5,67	4,06	12,5	67,4	9,9	84,5	26,2	52,6	48,4	46,9	5,1	0,6	5,7	1,2	6,3	5,0	5,4			
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	8,8	0,6	8,33	3,30	11,4	17,9	0,44	13,8	16,8	12,3	12,0	24,8	1,4	3,5	9,6	22,8	25,8	25,5	1,9	0,1	0,2	0,5	2,7	2,7	2,9			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	3,9	0,2	1,82	8,98	4,84	22,1	0,49	15,4	15,8	13,6	13,3	2,4	1,7	0,7	5,3	11,3	10,8	12,6	0,2	0,1	0,0	0,3	1,4	1,1	1,5			
Total calculado	100,0	6,4	2,94	20,1	28,1	16,3	0,24	5,31	5,72	4,23	12,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7,5	5,6	6,8	4,7	12,0	10,4	11,6			
Total dosado			3,03	20,5	28,1	16,8	0,23	5,52	5,68	4,12	12,1																	
Fração -1,19+0,037 mm																												
FL 2,95	38,3	9,3	0,63	47,6	11,0	21,2	0,17	1,73	2,16	1,43	12,5	8,2	86,9	13,0	56,8	19,0	17,5	15,6	2,4	19,2	3,9	9,0	5,7	5,9	6,0			
AF 2,95 MAG Frantz 0,15A	46,1	11,2	3,39	3,90	55,4	7,18	0,18	3,41	3,54	2,83	11,9	53,4	8,6	78,8	23,2	45,1	34,6	37,1	15,4	1,9	23,4	3,7	13,5	11,6	14,2			
AF 2,95 MAG Frantz 0,30A	10,6	2,6	9,56	3,67	21,7	15,9	0,38	7,02	14,1	9,64	12,8	34,7	1,9	7,1	11,8	21,4	31,6	29,0	9,9	0,4	2,1	1,9	6,4	10,6	11,1			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,30A	5,0	1,2	2,15	11,3	7,11	23,4	0,47	10,0	15,3	12,8	13,3	3,7	2,7	1,1	8,2	14,5	16,3	18,3	1,1	0,6	0,3	1,3	4,4	5,5	7,0			
Total calculado	100,0	24,4	2,93	21,0	32,4	14,3	0,21	3,48	4,72	3,52	12,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	28,7	22,0	29,7	15,9	30,0	33,6	38,3			

Obs: PF = perda ao fogo, gf = ganho ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo ou massa insuficiente para análise.

Tabela 72 – Resultado das separações minerais - amostra B1 (frações acima de 0,020 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)						
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	
Fração -0,30+0,21 mm																										
FL 2,95	16,4	2,6	<0,10*	81,2	9,97	0,51	0,28	3,46	0,37	<0,10	2,63	0,0	93,9	4,5	7,7	0,7	1,6	7,2	0,0	14,0	0,7	0,4	0,2	0,3	0,6	
INT 2,95-3,30	6,0	1,0	1,27	7,63	14,7	7,07	2,11	51,5	4,33	1,11	7,70	8,7	3,2	2,4	38,8	1,9	8,8	30,7	1,0	0,5	0,4	1,8	0,5	1,6	2,6	
MAG T.Davis 1,0A	38,3	6,1	0,27	0,65	73,7	0,47	2,49	17,8	0,30	0,21	gf	11,7	1,7	77,4	16,6	14,5	19,5	13,7	1,4	0,3	12,8	0,8	3,5	3,5	1,1	
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	16,0	2,6	1,13	0,78	30,4	1,37	6,80	51,8	1,04	0,73	1,44	20,7	0,9	13,3	20,2	16,6	23,7	19,8	2,4	0,1	2,2	0,9	4,0	4,3	1,7	
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	23,3	3,7	2,20	0,17	3,70	0,78	18,7	69,8	1,03	0,83	1,97	58,9	0,3	2,4	16,7	66,3	46,5	28,6	6,9	0,0	0,4	0,8	16,2	8,4	2,4	
Total calculado	100,0	16,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	11,7	15,0	16,5	4,6	24,4	18,0	8,4	
Total dosado			0,93	14,2	37,5	1,08	6,53	34,0	0,80	0,45	1,14															
Fração -0,21+0,15 mm																										
FL 2,95	16,1	2,7	<0,10*	81,2	9,53	0,86	0,27	3,32	0,37	<0,10	2,86	0,0	94,9	4,3	11,1	0,7	1,5	6,6	0,0	14,5	0,7	0,8	0,2	0,3	0,7	
INT 2,95-3,30	5,5	0,9	1,24	7,73	17,1	8,75	2,66	45,2	5,13	1,13	8,35	7,9	3,1	2,6	38,5	2,2	7,0	31,3	1,0	0,5	0,4	2,6	0,6	1,4	3,1	
MAG T.Davis 1,0A	34,3	5,8	0,12	0,33	77,9	0,47	1,66	14,8	0,25	0,18	gf	4,8	0,8	74,1	12,9	8,6	14,5	9,5	0,6	0,1	12,8	0,9	2,3	2,8	1,0	
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	17,9	3,0	1,05	0,71	33,3	1,49	5,42	49,8	1,09	0,73	1,61	21,8	0,9	16,5	21,3	14,7	25,2	21,6	2,7	0,1	2,8	1,5	3,8	4,9	2,2	
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	26,2	4,5	2,15	0,15	3,54	0,77	18,6	69,5	1,06	0,82	1,95	65,5	0,3	2,6	16,2	73,8	51,7	30,9	8,2	0,0	0,4	1,1	19,4	10,1	3,1	
Total calculado	100,0	17,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	12,5	15,3	17,2	6,8	26,2	19,5	10,0	
Total dosado			0,93	13,6	36,8	1,51	6,60	34,6	0,90	0,48	1,30															
Fração -0,15+0,074 mm																										
FL 2,95	17,4	3,3	<0,10*	80,2	9,20	1,66	0,24	3,21	0,40	<0,10	3,17	0,0	94,6	4,5	16,7	0,7	1,6	6,4	0,0	17,6	0,8	1,5	0,2	0,3	0,8	
INT 2,95-3,30	6,3	1,2	1,38	7,98	21,9	10,4	3,65	35,4	5,86	1,06	9,70	9,6	3,4	3,9	37,9	3,9	6,5	33,5	1,4	0,6	0,7	3,4	1,0	1,4	4,4	
MAG T.Davis 1,0A	28,0	5,3	0,10	0,14	82,2	0,36	0,80	11,9	0,23	0,15	gf	3,0	0,3	64,5	5,8	3,9	9,7	5,9	0,4	0,0	12,2	0,5	1,0	2,1	0,8	
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	24,2	4,6	1,11	1,03	36,6	2,00	3,48	46,7	1,31	0,74	1,31	30,1	1,7	24,9	28,1	14,6	33,1	29,0	4,3	0,3	4,7	2,5	3,8	7,0	3,8	
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	24,2	4,6	2,12	<0,10*	3,30	0,81	18,5	69,4	1,14	0,84	2,11	57,3	0,0	2,2	11,4	76,9	49,1	25,2	8,1	0,0	0,4	1,0	19,8	10,4	3,3	
Total calculado	100,0	19,1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	14,2	18,6	18,9	9,0	25,8	21,1	13,2	
Total dosado			0,95	14,8	35,9	1,77	5,79	33,5	1,06	0,48	2,14															
Fração -0,074+0,037 mm																										
FL 2,95	19,8	2,5	<0,10*	79,0	8,53	3,69	0,28	1,85	0,45	<0,10	4,04	0,0	91,2	5,1	26,6	1,4	1,1	6,1	0,0	13,1	0,6	2,3	0,2	0,2	0,7	
INT 2,95-3,30	9,3	1,2	1,55	7,35	24,8	10,5	3,94	31,3	5,97	1,02	10,6	14,5	4,0	7,0	35,3	9,3	8,7	38,0	1,5	0,6	0,8	3,0	1,1	1,2	4,3	
MAG T.Davis 1,0A	18,2	2,3	0,11	<0,10*	85,5	0,47	0,29	9,32	0,21	0,12	gf	2,0	0,0	47,2	3,1	1,3	5,1	2,6	0,2	0,0	5,6	0,3	0,2	0,7	0,3	
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	36,1	4,5	1,35	1,85	35,9	2,26	2,19	45,0	1,59	0,75	3,34	48,8	3,9	39,3	29,7	20,2	48,9	39,3	5,0	0,6	4,6	2,5	2,3	6,7	4,5	
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	16,7	2,1	2,07	0,92	2,82	0,86	15,9	71,8	1,22	0,82	2,16	34,7	0,9	1,4	5,2	67,7	36,1	14,0	3,6	0,1	0,2	0,4	7,9	4,9	1,6	
Total calculado	100,0	12,5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	10,3	14,3	11,8	8,5	11,6	13,6	11,3	
Total dosado			1,04	17,4	34,3	2,56	3,98	33,0	1,38	0,54	3,19															
Fração -0,037+0,020 mm																										
FL 2,95	21,6	1,5	<0,10*	77,2	8,59	4,82	0,29	1,74	0,50	<0,10	4,96	0,0	91,2	6,0	29,0	2,4	1,2	5,8	0,0	8,0	0,4	1,9	0,1	0,1	0,5	
INT 2,95-3,30	13,3	0,9	1,64	6,73	28,7	9,77	3,15	29,3	5,73	0,97	11,3	18,7	4,9	12,3	36,1	16,0	12,0	40,6	1,2	0,4	0,8	2,3	0,7	0,9	3,2	
MAG T.Davis 1,0A	11,2	0,8	0,10	<0,10*	87,1	0,45	0,17	7,90	0,23	0,11	gf	1,0	0,0	31,5	1,4	0,7	2,7	1,4	0,1	0,0	2,0	0,1	0,0	0,2	0,1	
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	46,0	3,3	1,64	1,58	33,2	2,42	2,54	46,3	1,83	0,75	5,08	64,7	4,0	49,3	30,9	44,6	65,9	44,9	4,2	0,3	3,1	2,0	2,0	5,0	3,5	
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	7,9	0,6	2,32	<0,10*	3,61	1,18	12,1	74,4	1,74	0,91	2,66	15,7	0,0	0,9	2,6	36,4	18,2	7,3	1,0	0,0	0,1	0,2	1,7	1,4	0,6	
Total calculado	100,0	7,2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	6,6	8,8	6,3	6,5	4,6	7,6	7,8	
Total dosado			1,16	18,7	31,9	3,43	2,75	32,1	1,67	0,57	4,29															
Fração -0,30+0,020 mm																										
FL 2,95	17,7	12,7	<0,10	80,0	9,23	2,03	0,27	2,84	0,41	<0,10	3,38	0,0	93,5	4,7	19,6	0,9	1,5	6,4	0,0	67,2	3,3	6,8	0,8	1,2	3,3	
INT 2,95-3,30	7,2	5,2	1,42	7,50	21,6	9,40	3,16	38,1	5,45	1,06	9,57	11,1	3,6	4,5	37,1	4,2	8,0	34,8	6,1	2,6	3,2	13,2	3,9	6,4	17,6	
MAG T.Davis 1,0A	28,4	20,4	0,16	...	...	...	...	...	...	...	...	4,8	0,6	64,1	6,8	7,6	11,7	6,4	2,7	0,4	45,3	2,5	7,0	9,3	3,3	
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	25,1	18,0	1,26	1,25	34,4	1,97	3,78	47,4	1,40	0,74	2,57	34,1	2,1	24,7	26,9	17,2	34,8	31,0	18,7	1,5	17,5	9,4	16,0	27,8	15,6	
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	21,5	15,5	2,15	...	...	...	...	...	...	...	...	50,0	0,3	2,1	9,5	70,2	44,0	21,4	27,8	0,2	1,5	3,5	64,9	35,1	11,0	
Total calculado	100,0	71,8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	55,3	71,9	70,8	35,4	92,7	79,8	50,8	

Obs: PF = perda ao fogo, gf = ganho ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo ou massa insuficiente para análise, * = para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de OTR e SiO₂ <0,10% igual zero para determinados produtos.

Tabela 73 – Resultado das separações minerais - amostra B2 (frações acima de 0,020 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅		
Fração -0,30+0,21 mm																											
FL 2,95	2,1	0,3	0,48	42,4	10,1	14,1	1,29	12,2	2,72	0,28	12,7	1,2	94,8	0,4	15,4	1,4	0,8	2,1	0,1	3,2	0,1	0,8	0,2	0,2	0,2		
INT 2,95-3,30	10,4	1,6	2,23	0,46	6,70	7,07	10,2	47,2	13,9	1,15	7,63	28,4	5,2	1,4	38,9	55,0	14,7	54,9	2,5	0,2	0,2	2,0	7,1	3,0	4,7		
MAG T.Davis 1,0A	50,7	7,9	<0,10*	<0,10*	81,8	0,35	0,27	12,4	0,45	0,17	gf	0,0	0,0	81,8	9,4	7,1	18,9	8,7	0,0	0,0	14,7	0,5	0,9	3,8	0,7		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	21,8	3,4	0,87	<0,10*	34,5	1,83	1,17	48,5	1,77	0,68	1,73	23,1	0,0	14,8	21,1	13,3	31,7	14,6	2,0	0,0	2,7	1,1	1,7	6,4	1,2		
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	15,0	2,3	2,55	<0,10*	5,54	1,92	2,96	75,3	3,44	0,94	4,28	47,2	0,0	1,6	15,3	23,2	34,0	19,7	4,1	0,0	0,3	0,8	3,0	6,8	1,7		
Total calculado	100,0	15,5	...	...	50,7	1,89	1,92	33,3	2,63	0,50	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,8	3,4	18,0	5,0	12,9	20,1	8,5		
Total dosado			0,90	1,25	52,3	1,56	1,83	32,5	2,51	0,50	1,62																
Fração -0,21+0,15 mm																											
FL 2,95	3,7	0,4	0,29	40,6	12,5	17,6	0,91	10,0	1,79	0,20	14,8	1,2	94,0	1,0	25,8	1,5	1,1	2,3	0,1	2,4	0,1	1,3	0,2	0,2	0,2		
INT 2,95-3,30	10,2	1,2	2,41	0,94	7,14	8,00	13,4	38,2	16,9	1,11	8,29	26,8	6,0	1,5	32,3	61,8	12,0	58,8	1,9	0,2	0,2	1,6	6,9	1,8	4,2		
MAG T.Davis 1,0A	45,7	5,3	0,10	<0,10*	81,5	1,03	0,23	10,7	0,42	0,15	gf	4,8	0,0	77,4	18,6	4,8	15,0	6,5	0,3	0,0	10,3	0,9	0,5	2,2	0,5		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	25,2	2,9	0,78	<0,10*	35,4	1,11	0,94	48,1	1,65	0,69	1,71	21,5	0,0	18,5	11,0	10,7	37,1	14,1	1,5	0,0	2,5	0,5	1,2	5,5	1,0		
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	15,2	1,8	2,76	<0,10*	5,10	2,04	3,08	74,5	3,53	0,96	4,53	45,7	0,0	1,6	12,3	21,2	34,8	18,3	3,2	0,0	0,2	0,6	2,4	5,1	1,3		
Total calculado	100,0	11,7	0,92	...	48,1	2,53	2,21	32,6	2,94	0,51	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7,0	2,6	13,3	4,9	11,1	14,8	7,1		
Total dosado			0,95	1,26	51,2	2,02	2,09	31,7	2,78	0,50	1,80																
Fração -0,15+0,074 mm																											
FL 2,95	5,6	1,0	0,41	55,2	8,44	11,2	0,81	9,39	2,02	0,21	9,64	2,0	95,7	1,1	25,9	1,6	1,6	3,0	0,2	8,5	0,2	2,2	0,4	0,4	0,4		
INT 2,95-3,30	9,6	1,7	2,41	1,43	6,58	9,16	20,7	21,0	23,2	1,06	12,0	20,8	4,3	1,4	36,4	71,8	6,3	59,5	2,5	0,4	0,3	3,1	15,8	1,4	8,2		
MAG T.Davis 1,0A	35,2	6,1	0,10	<0,10*	85,4	0,25	0,17	8,99	0,37	0,13	gf	3,2	0,0	67,2	3,6	2,2	9,8	3,5	0,4	0,0	12,1	0,3	0,5	2,2	0,5		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	35,1	6,1	0,86	<0,10*	36,6	1,38	0,67	45,7	1,85	0,69	1,78	27,0	0,0	28,7	20,0	8,5	49,7	17,3	3,2	0,0	5,2	1,7	1,9	11,0	2,4		
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	14,5	2,5	3,61	<0,10*	4,97	2,36	3,05	72,3	4,32	0,99	4,78	46,9	0,0	1,6	14,1	15,9	32,5	16,7	5,6	0,0	0,3	1,2	3,5	7,2	2,3		
Total calculado	100,0	17,4	1,12	...	44,7	2,42	2,78	32,2	3,75	0,54	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	12,0	8,9	18,0	8,5	22,0	22,1	13,8		
Total dosado			1,09	2,89	46,5	2,35	2,77	31,8	3,62	0,53	2,15																
Fração -0,074+0,037 mm																											
FL 2,95	10,8	1,3	0,10	70,0	7,17	8,51	0,51	2,45	1,36	0,11	7,68	0,8	95,2	2,0	26,2	1,9	0,9	3,3	0,1	15,1	0,2	2,2	0,3	0,1	0,4		
INT 2,95-3,30	12,8	1,6	2,73	2,98	10,6	11,0	16,4	20,0	21,0	1,15	9,61	26,8	4,8	3,6	40,2	74,0	8,4	60,0	2,6	0,8	0,4	3,4	11,6	1,3	7,0		
MAG T.Davis 1,0A	22,2	2,8	0,10	<0,10*	86,2	0,33	0,16	8,31	0,41	0,15	gf	1,8	0,0	49,9	2,1	1,3	6,0	2,0	0,2	0,0	5,5	0,2	0,2	0,9	0,2		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	45,1	5,6	1,33	<0,10*	36,9	1,98	0,67	42,8	2,50	0,74	3,32	45,9	0,0	43,5	25,5	10,7	63,3	25,1	4,5	0,0	4,8	2,2	1,7	9,5	2,9		
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	9,2	1,1	3,54	<0,10*	4,49	2,28	3,77	71,4	4,70	0,99	4,93	24,8	0,0	1,1	6,0	12,2	21,4	9,6	2,4	0,0	0,1	0,5	1,9	3,2	1,1		
Total calculado	100,0	12,4	1,31	...	38,3	3,49	2,83	30,5	4,49	0,62	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	9,9	15,9	11,0	8,5	15,7	15,0	11,7		
Total dosado			1,26	7,24	40,0	3,27	2,77	30,3	4,29	0,60	3,42																
Fração -0,037+0,020 mm																											
FL 2,95	15,9	1,3	0,15	71,6	7,30	7,45	0,73	1,59	2,01	0,15	6,57	1,5	92,8	3,2	25,8	5,0	1,0	6,4	0,1	15,1	0,2	1,9	0,4	0,1	0,6		
INT 2,95-3,30	15,7	1,3	3,12	4,17	15,7	12,5	10,4	18,7	17,7	1,31	11,3	31,0	5,4	6,9	43,1	70,6	11,2	56,4	2,6	0,9	0,5	3,1	6,1	0,9	4,8		
MAG T.Davis 1,0A	14,1	1,1	0,11	<0,10*	86,7	0,77	0,23	7,33	0,56	0,14	gf	1,0	0,0	34,1	2,4	1,4	3,9	1,6	0,1	0,0	2,2	0,2	0,1	0,3	0,1		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	50,9	4,1	1,83	0,42	38,8	2,42	0,84	38,7	3,15	0,76	5,46	58,7	1,7	55,0	26,9	18,4	75,2	32,4	4,9	0,3	3,6	2,0	1,6	6,3	2,8		
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	3,4	0,3	3,62	0,12	8,01	2,49	3,07	66,8	4,57	1,06	5,73	7,8	0,0	0,8	1,9	4,5	8,7	3,2	0,7	0,0	0,1	0,1	0,4	0,7	0,3		
Total calculado	100,0	8,0	1,58	...	35,9	4,58	2,32	26,2	4,94	0,67	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,4	16,3	6,6	7,3	8,6	8,4	8,5		
Total dosado			1,66	11,5	37,0	4,37	2,35	26,2	4,86	0,65	5,53																
Fração -0,30+0,020 mm																											
FL 2,95	6,7	4,3	0,23	62,1	8,25	10,1	0,74	5,24	1,84	0,16	8,87	1,4	94,4	1,2	24,2	2,0	1,1	3,4	0,6	44,4	0,8	8,4	1,4	0,9	1,7		
INT 2,95-3,30	11,3	7,3	2,56	1,95	9,15	9,48	14,5	28,9	18,7	1,15	9,79	26,2	5,0	2,3	38,4	67,4	10,4	58,2	12,1	2,4	1,5	13,2	47,5	8,3	28,9		
MAG T.Davis 1,0A	35,7	23,2	...	<0,10	83,4	0,50	0,22	10,4	0,42	0,15	gf	2,2	0,0	67,0	6,4	3,2	11,8	4,2	1,0	0,0	44,8	2,1	2,2	9,4	2,1		
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	34,0	22,1	1,15	...	36,6	1,76	0,81	44,4	2,22	0,71	2,83	35,4	0,6	28,0	21,4	11,4	47,9	20,8	16,2	0,3	18,7	7,4	8,0	38,7	10,4		
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	12,4	8,1	3,11	...	5,20	2,15	3,13	73,4	3,95	0,97	4,63	34,9	0,0	1,4	9,6	16,0	28,8	13,5	16,1	0,0	1,0	3,2	11,2	23,1	6,7		
Total calculado	100,0	65,1	...	...	44,5	2,79	2,43	31,5	3,63	0,56	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	46,0	47,0	66,8	34,3	70,4	80,4	49,7		

Obs: PF = perda ao fogo, gf = ganho ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo ou massa insuficiente para análise, * = para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de OTR e SiO₂ <0,10% igual zero para determinados produtos.

Tabela 74 – Resultado das separações minerais - amostra C1 (frações acima de 0,020 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	
Fração +0,125 mm																											
FL 3,30	8,5	0,9	1,14	19,7	11,7	41,8	0,13	2,41	1,16	0,49	<0,10	19,8	2,1	47,0	1,6	56,7	25,3	1,8	10,7	0,3	0,8	0,4	1,7	0,9	0,4	0,9	0,9
MAG T.Davis 1,5A	37,5	4,2	1,35	0,41	85,5	1,18	<0,10	0,11	5,13	0,14	0,10	1,44	10,9	4,3	51,3	7,1	5,1	35,2	13,4	1,4	0,1	13,4	0,2	0,2	8,3	1,2	1,2
AF 3,30 MAG Frantz 0,10A	41,7	4,6	3,50	2,72	64,6	3,85	<0,10	0,88	4,76	0,39	0,22	6,16	31,6	31,8	43,1	25,6	45,1	36,3	41,7	4,1	0,6	11,2	0,8	1,7	8,5	3,6	3,6
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	8,1	0,9	14,0	4,64	26,6	6,29	0,19	2,17	8,03	0,89	0,52	10,3	24,6	10,5	3,4	8,1	21,5	11,9	18,4	3,2	0,2	0,9	0,2	0,8	2,8	1,6	1,6
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	4,2	0,5	33,4	5,33	9,42	3,72	0,37	0,58	19,2	1,45	0,45	9,21	30,7	6,3	0,6	2,5	3,0	14,9	15,8	4,0	0,1	0,2	0,1	0,1	3,5	1,4	1,4
Total calculado	100,0	11,1	4,61	3,57	62,5	6,27	...	0,81	5,47	0,39	...	6,01	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	13,1	1,8	26,1	2,9	3,7	23,5	8,7	8,7
Total dosado			4,71	3,79	61,0	6,41	0,11	0,85	5,31	0,39	0,18	6,49															
Fração -0,125+0,074 mm																											
FL 3,30	23,8	3,2	0,94	26,8	7,74	42,1	0,11	3,15	0,91	0,37	<0,10	17,0	3,9	72,6	3,8	77,2	57,3	4,8	17,0	0,7	3,7	0,9	5,5	4,0	1,1	2,4	2,4
MAG T.Davis 1,5A	21,5	2,9	1,36	0,38	86,5	1,19	<0,10	<0,10*	5,23	0,13	0,10	1,29	5,1	0,9	38,0	2,0	0,0	24,7	5,4	1,0	0,0	9,3	0,1	0,0	5,8	0,8	0,8
AF 3,30 MAG Frantz 0,10A	38,5	5,2	4,42	3,48	64,0	4,59	0,12	0,87	4,47	0,49	0,19	6,55	29,6	15,3	50,5	13,6	25,6	37,8	36,5	5,7	0,8	12,3	1,0	1,8	8,9	5,2	5,2
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	11,6	1,6	17,6	5,04	30,3	6,29	0,25	1,67	6,38	1,17	0,41	10,9	35,4	6,7	7,2	5,6	14,8	16,2	26,2	6,8	0,3	1,8	0,4	1,0	3,8	3,7	3,7
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	4,6	0,6	32,5	8,69	6,62	4,33	0,36	0,65	16,3	1,68	0,36	8,88	26,0	4,6	0,6	1,5	2,3	16,5	14,9	5,0	0,2	0,2	0,1	0,2	3,9	2,1	2,1
Total calculado	100,0	13,4	5,75	8,79	48,9	13,0	...	...	4,55	0,52	...	8,52	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	19,1	5,1	24,4	7,2	7,0	23,4	14,3	14,3
Total dosado			5,70	9,05	47,2	12,9	0,13	1,33	4,38	0,53	0,15	9,60															
Fração -0,074+0,037 mm																											
FL 3,30	36,0	3,3	0,83	27,4	6,66	42,8	0,12	3,36	0,88	0,32	<0,10	16,7	5,3	80,9	6,0	84,9	71,7	8,3	20,6	0,7	4,4	0,8	6,1	4,7	1,1	2,2	2,2
MAG T.Davis 1,5A	14,6	1,4	1,33	0,36	85,9	1,22	<0,10	<0,10*	5,17	0,13	0,10	1,12	3,4	0,4	31,7	1,0	0,0	19,8	3,4	0,5	0,0	4,2	0,1	0,0	2,7	0,4	0,4
AF 3,30 MAG Frantz 0,10A	38,8	3,6	6,11	4,06	58,9	5,23	0,13	0,98	4,32	0,65	0,21	7,62	42,0	12,9	57,6	11,2	22,5	44,0	45,0	5,5	0,7	7,7	0,8	1,5	6,0	4,8	4,8
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	8,1	0,8	28,3	5,12	21,7	5,50	0,35	1,03	9,09	1,79	0,34	11,6	40,9	3,4	4,5	2,5	5,0	19,4	26,0	5,4	0,2	0,6	0,2	0,3	2,6	2,8	2,8
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	2,4	0,2	19,8	12,0	3,30	3,75	0,22	0,58	13,5	1,18	0,29	5,38	8,4	2,3	0,2	0,5	0,8	8,4	5,0	1,1	0,1	0,0	0,0	0,1	1,1	0,5	0,5
Total calculado	100,0	9,3	5,64	12,2	39,7	18,2	...	...	3,81	0,56	...	10,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	13,2	5,4	13,4	7,2	6,5	13,5	10,6	10,6
Total dosado			5,69	14,0	37,5	18,8	0,14	1,80	3,66	0,57	0,12	10,4															
Fração -0,037+0,020 mm																											
FL 3,30	50,5	3,6	0,53	28,5	3,63	44,7	0,11	3,56	0,58	0,21	<0,10	17,7	5,1	85,7	6,6	89,4	82,0	8,8	14,2	0,5	4,3	0,5	6,5	5,1	0,8	1,2	1,2
MAG T.Davis 1,5A	8,0	0,6	1,24	0,39	86,2	1,25	<0,10	<0,10*	5,24	0,12	0,10	0,98	1,9	0,2	24,8	0,4	0,0	12,6	1,3	0,2	0,0	2,0	0,0	0,0	1,2	0,1	0,1
AF 3,30 MAG Frantz 0,10A	35,6	2,5	8,94	5,24	51,5	6,13	0,95	0,93	5,54	1,41	0,21	8,67	61,3	11,1	65,7	8,7	15,1	59,2	67,4	5,4	0,6	5,3	0,6	0,9	5,6	5,5	5,5
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	2,9	0,2	24,5	6,57	21,9	6,94	0,36	1,27	8,42	1,98	0,34	12,0	13,9	1,2	2,3	0,8	1,7	7,4	7,8	1,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,7	0,6	0,6
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	3,0	0,2	30,4	10,3	6,28	6,06	0,38	0,84	13,1	2,27	0,32	9,42	17,7	1,9	0,7	0,7	1,2	11,9	9,2	1,6	0,1	0,1	0,1	0,1	1,1	0,8	0,8
Total calculado	100,0	7,1	5,19	16,8	27,9	25,2	...	...	3,33	0,74	...	12,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,8	5,0	8,0	7,2	6,2	9,4	8,2	8,2
Total dosado			4,93	16,8	29,3	24,6	0,16	2,21	3,30	0,57	<0,10	12,3															
Fração -0,125+0,020 mm																											
FL 3,30	27,1	11,1	0,79	26,9	6,41	43,1	0,11	3,28	0,82	0,31	<0,10	17,4	4,0	76,4	3,7	80,7	63,4	5,0	15,9	2,2	13,2	2,7	19,8	14,7	3,5	6,7	6,7
MAG T.Davis 1,5A	21,9	9,0	1,34	0,39	85,9	1,19	<0,10	...	5,18	0,13	0,10	1,31	5,5	0,9	40,2	1,8	0,0	25,7	5,5	3,0	0,2	28,9	0,4	0,2	17,9	2,4	2,4
AF 3,30 MAG Frantz 0,10A	38,9	15,9	5,25	3,67	61,0	4,76	...	0,91	4,69	0,64	0,21	7,02	38,5	15,0	50,7	12,8	25,2	41,3	47,1	20,7	2,6	36,5	3,2	5,9	28,9	19,2	19,2
AF 3,30 MAG Frantz 0,20A	8,3	3,4	19,4	5,05	26,9	6,16	0,26	1,64	7,54	1,28	0,42	10,9	30,5	4,4	4,8	3,6	9,7	14,2	20,1	16,6	0,8	3,4	0,9	2,3	9,9	8,8	8,8
AF 3,30 NMAG Frantz 0,20A	3,7	1,5	30,7	8,36	6,96	4,30	0,35	0,65	16,4	1,62	0,37	8,55	21,5	3,3	0,6	1,1	1,7	13,8	11,3	11,7	0,6	0,4	0,3	0,4	9,6	4,8	4,8
Total calculado	100,0	40,9	5,32	9,54	46,8	14,5	...	...	4,42	0,53	...	8,96	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	54,1	17,3	71,9	24,5	23,4	69,9	41,9	41,9

Obs: PF = perda ao fogo, gf = ganho ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo ou massa insuficiente para análise, * = para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de K₂O <0,10% igual zero para determinados produtos.

Tabela 75 – Resultado das separações minerais - amostra D1 (frações acima de 0,020 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅		
Fração -0,30+0,15 mm																											
Flut2,92	6,5	1,5	0,29	89,0	6,52	0,15	0,59	0,80	0,98	0,14	1,33	1,3	86,6	0,8	0,4	1,0	0,3	1,1	0,1	9,9	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2		
Intern 2,95-3,30	11,1	2,5	1,01	4,04	5,89	10,3	29,3	2,64	31,8	5,04	6,88	8,0	6,7	1,2	44,9	85,7	1,8	60,5	0,7	0,8	0,3	7,5	28,1	0,5	11,6		
Mag T.Davis 1,0A	41,9	9,4	0,21	<0,10*	83,9	<0,10*	0,11	11,7	0,43	0,31	gf	6,1	0,0	64,3	0,0	1,2	29,5	3,1	0,6	0,0	17,5	0,0	0,4	8,9	0,6		
Af 3,30 Magn 0,20A	29,1	6,5	1,78	0,91	56,3	2,84	0,75	23,7	3,89	2,01	2,17	36,6	3,9	30,0	32,6	5,7	41,2	19,4	3,4	0,4	8,2	5,4	1,9	12,4	3,7		
Af 3,30 Nmag 0,20A	11,4	2,6	5,92	1,62	17,9	4,88	2,09	39,6	8,14	3,73	5,82	48,0	2,8	3,8	22,1	6,3	27,2	16,0	4,5	0,3	1,0	3,7	2,1	8,2	3,1		
Total calculado	100,0	22,5	1,41	...	54,6	...	3,79	16,7	5,83	1,71	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	9,4	11,4	27,2	16,7	32,7	30,1	19,2		
Total dosado			1,63	7,61	53,4	2,58	3,60	16,7	5,76	1,76	2,67																
Fração -0,15+0,074 mm																											
Flut2,92	13,3	2,8	0,11	91,1	5,06	0,13	0,14	0,36	0,52	<0,10*	1,23	0,9	91,1	1,6	0,5	0,6	0,3	1,1	0,1	17,6	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2		
Intern 2,95-3,30	12,4	2,6	0,88	5,43	8,54	14,3	20,5	1,82	28,7	6,68	9,38	6,6	5,0	2,4	51,2	78,6	1,3	55,8	0,7	1,0	0,5	10,5	20,4	0,4	10,7		
Mag T.Davis 1,0A	23,4	4,8	0,21	<0,10*	84,6	<0,10*	0,10	11,0	0,42	0,28	gf	2,9	0,0	45,6	0,0	0,7	14,5	1,5	0,3	0,0	9,2	0,0	0,2	4,1	0,3		
Af 3,30 Magn 0,20A	45,3	9,4	2,44	0,97	47,2	3,21	0,90	26,9	4,68	2,25	4,89	66,4	3,3	49,2	42,0	12,6	69,1	33,3	6,6	0,6	9,9	8,6	3,3	19,6	6,4		
Af 3,30 Nmag 0,20A	5,6	1,2	6,89	1,23	9,51	3,85	4,25	46,5	9,32	3,35	4,24	23,3	0,5	1,2	6,3	7,4	14,9	8,3	2,3	0,1	0,2	1,3	1,9	4,2	1,6		
Total calculado	100,0	20,7	1,67	...	43,4	...	3,23	17,6	6,36	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	10,0	19,3	20,1	20,4	25,9	28,4	19,1		
Total dosado			1,90	14,0	43,1	3,45	3,11	17,3	6,26	2,11	3,77																
Fração -0,074+0,037 mm																											
Flut2,92	23,1	3,2	0,12	92,5	4,15	0,16	0,16	0,22	0,53	<0,10*	1,13	1,2	91,6	2,7	0,9	1,4	0,3	1,9	0,1	20,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2		
Intern 2,95-3,30	3,2	0,4	0,96	17,9	10,7	13,1	14,3	2,00	23,0	6,27	8,71	1,4	2,5	1,0	10,9	18,1	0,4	11,4	0,1	0,5	0,1	1,6	2,4	0,1	1,5		
Mag T.Davis 1,0A	10,3	1,4	0,12	0,22	86,6	0,13	0,12	9,49	0,36	0,24	gf	0,5	0,1	25,2	0,3	0,5	6,4	0,6	0,0	0,0	2,8	0,1	0,1	0,1	0,1		
Af 3,30 Magn 0,20A	55,1	7,6	3,30	1,64	44,8	5,24	1,36	22,0	7,30	3,18	6,83	79,7	3,9	69,7	73,9	29,2	79,5	61,4	6,5	0,8	7,7	11,0	4,0	12,2	8,1		
Af 3,30 Nmag 0,20A	8,2	1,1	4,74	5,45	5,96	6,62	15,8	24,8	19,6	4,38	5,09	17,1	1,9	1,4	14,0	50,7	13,4	24,7	1,4	0,4	0,2	2,1	6,9	2,1	3,2		
Total calculado	100,0	13,7	2,28	23,3	35,4	3,91	2,56	15,3	6,55	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,2	21,9	11,1	14,9	13,5	15,3	13,1		
Total dosado			2,33	24,0	35,6	3,79	2,44	14,0	6,46	2,35	4,95																
Fração -0,037+0,020 mm																											
Flut2,92	27,4	2,9	0,27	90,6	4,22	0,54	0,32	0,39	1,00	0,27	1,24	2,7	90,8	3,6	3,1	4,1	0,9	3,8	0,2	18,3	0,3	0,4	0,3	0,1	0,4		
Intern 2,95-3,30	11,3	1,2	1,30	14,4	13,4	15,9	9,36	1,60	22,0	8,43	10,6	5,4	5,9	4,7	37,9	49,1	1,6	34,7	0,4	1,2	0,4	5,2	4,1	0,1	3,8		
Mag T.Davis 1,0A	5,3	0,6	0,12	0,50	87,4	0,25	0,24	8,48	0,28	0,19	...	0,2	0,1	14,6	0,3	0,6	4,0	0,2	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,4	0,0		
Af 3,30 Magn 0,20A	54,0	5,7	4,37	1,55	45,4	4,97	1,59	18,2	7,66	3,05	7,74	86,6	3,1	76,6	56,9	40,1	86,8	58,1	6,5	0,6	6,0	7,9	3,3	8,1	6,3		
Af 3,30 Nmag 0,20A	2,0	0,2	7,07	1,60	8,78	4,25	6,68	38,2	11,4	7,90	...	5,1	0,1	0,5	1,8	6,1	6,6	3,2	0,4	0,0	0,0	0,2	0,5	0,6	0,3		
Total calculado	100,0	10,6	2,73	27,3	32,0	4,72	2,14	11,3	7,13	2,84	5,72	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7,5	20,1	7,8	13,8	8,4	9,4	10,9		
Total dosado			2,77	28,4	32,4	4,54	1,95	11,0	6,91	2,73	5,75																
Fração -0,30+0,020 mm																											
Flut2,92	15,3	10,3	0,18	91,1	4,75	0,26	0,26	0,39	0,72	...	1,22	1,5	90,5	1,7	1,1	1,3	0,4	1,7	0,5	65,8	1,1	0,7	1,0	0,3	1,1		
Intern 2,95-3,30	9,9	6,7	1,01	7,33	8,56	13,0	21,4	2,10	28,3	6,35	8,62	5,3	4,7	1,9	37,5	68,2	1,3	44,2	1,9	3,5	1,3	24,8	55,0	0,1	27,5		
Mag T.Davis 1,0A	24,0	16,3	0,20	...	84,5	...	0,11	11,2	0,42	0,29	...	2,5	0,1	46,5	0,1	0,9	17,0	1,6	0,9	0,0	30,6	0,1	0,7	14,4	1,0		
Af 3,30 Magn 0,20A	43,2	29,2	2,89	1,24	48,2	4,00	1,12	23,2	5,77	2,59	5,34	66,8	3,5	47,7	50,3	15,6	63,3	39,3	23,0	2,6	31,7	32,9	12,5	52,4	24,5		
Af 3,30 Nmag 0,20A	7,5	5,1	5,93	2,38	13,0	5,01	5,82	37,8	11,1	3,96	...	23,8	1,2	2,2	11,0	14,1	18,0	13,2	8,6	0,9	1,5	7,3	11,4	15,1	8,2		
Total calculado	100,0	67,6	1,87	...	43,7	...	3,11	15,8	6,34	...	...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	35,0	72,8	66,2	65,9	80,5	83,2	62,3		

Obs: PF = perda ao fogo, gf = ganho ao fogo, ... = impossibilidade de cálculo ou massa insuficiente para análise, * = para viabilizar o cálculo da distribuição considerou-se teores de SiO₂ e Al₂O₃ <0,10% igual zero para determinados produtos.

Tabela 76 – Resultado das separações minerais - amostra D2 (frações acima de 0,020 mm).

Produto	% Massa		Teores (%)										Distribuição ensaio (%)								Distribuição ensaio (%)							
	ret.	acum.	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	BaO	PF	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	OTR	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅			
Fração -1,19+0,60 mm																												
FL 2,95	31,2	2,9	2,35	79,0	8,09	1,03	1,29	1,05	2,77	0,34	2,13	24,8	83,2	7,6	16,1	5,8	4,0	10,3	1,0	9,7	0,7	1,1	0,8	0,4	0,9			
AF 2,95 MAG Frantz 0,0A	25,8	2,4	0,77	2,86	76,2	0,57	1,00	12,4	1,43	0,75	0,52	6,7	2,5	58,8	7,3	3,7	39,3	4,4	0,3	0,3	5,1	0,5	0,5	3,7	0,4			
AF 2,95 MAG Frantz 0,20A	14,5	1,3	1,75	7,09	47,6	2,76	3,21	17,9	5,79	2,48	4,84	8,6	3,5	20,7	20,0	6,8	31,9	10,1	0,3	0,4	1,8	1,3	0,9	3,0	0,9			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,20A	28,4	2,6	6,24	11,3	15,3	4,00	20,4	7,09	22,2	2,66	5,83	59,9	10,8	13,0	56,6	83,7	24,7	75,2	2,4	1,3	1,1	3,8	10,8	2,4	6,5			
Total calculado	100,0	9,2	2,96	29,7	33,5	2,01	6,91	8,13	8,37	1,42	3,16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,0	11,7	8,6	6,6	12,9	9,5	8,7			
Total dosado			2,73	29,1	31,4	1,76	7,63	7,96	9,07	1,37	2,99																	
Fração -0,60+0,30 mm																												
FL 2,95	27,8	2,5	2,35	75,3	7,98	1,18	2,23	1,17	3,70	0,46	2,41	19,4	86,9	7,7	14,1	6,2	3,3	9,1	0,8	8,0	0,6	1,1	1,0	0,4	1,0			
AF 2,95 MAG Frantz 0,0A	15,9	1,4	0,81	1,79	75,9	0,59	0,78	13,8	1,37	0,85	0,51	3,8	1,2	42,1	4,0	1,2	22,0	1,9	0,2	0,1	3,2	0,3	0,2	2,6	0,2			
AF 2,95 MAG Frantz 0,20A	20,5	1,8	1,67	3,53	51,8	2,36	1,92	21,2	4,38	2,03	3,81	10,2	3,0	37,0	20,8	3,9	43,8	8,0	0,4	0,3	2,8	1,6	0,6	5,1	0,8			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,20A	35,7	3,2	6,31	6,02	10,7	3,97	24,8	8,62	25,6	2,53	5,21	66,7	8,9	13,2	61,0	88,6	30,9	81,0	2,8	0,8	1,0	4,6	14,5	3,6	8,5			
Total calculado	100,0	8,8	3,38	24,1	28,7	2,32	10,0	9,95	11,3	1,58	3,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	4,3	9,2	7,5	7,5	16,3	11,6	10,5			
Total dosado			3,05	24,0	28,4	2,08	10,1	10,1	11,4	1,60	3,85																	
Fração -0,30+0,15 mm																												
FL 2,95	22,2	1,5	1,75	82,4	5,78	0,94	1,22	0,72	2,31	0,18	2,19	12,7	88,5	4,2	8,9	2,7	1,3	4,6	0,4	5,7	0,3	0,5	0,3	0,1	0,4			
AF 2,95 MAG Frantz 0,0A	17,5	1,2	0,79	14,7	74,1	0,65	0,80	14,8	1,32	0,77	1,26	4,5	1,2	42,3	4,8	1,4	21,4	2,1	0,1	0,1	2,6	0,3	0,2	2,3	0,2			
AF 2,95 MAG Frantz 0,20A	24,0	1,7	1,37	20,0	53,9	1,79	1,05	25,6	2,97	1,60	3,25	10,7	2,3	42,2	18,2	2,5	50,8	6,4	0,3	0,1	2,6	1,1	0,3	5,4	0,5			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,20A	36,3	2,5	6,06	4,53	9,59	4,43	25,8	8,80	26,6	2,85	5,18	72,0	7,9	11,4	68,2	93,4	26,5	86,9	2,1	0,5	0,7	4,0	11,4	2,8	6,8			
Total calculado	100,0	6,9	3,05	20,7	30,6	2,36	10,0	12,1	11,1	1,59	3,37	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,9	6,4	6,2	5,9	12,2	10,7	7,8			
Total dosado			2,68	21,1	29,9	2,07	9,57	11,9	10,8	1,55	3,80																	
Fração -0,15+0,074 mm																												
FL 2,95	18,1	1,1	1,64	80,3	6,10	1,29	1,93	0,58	3,11	0,35	2,52	9,0	87,0	3,4	7,0	4,4	0,7	5,4	0,3	4,1	0,2	0,6	0,4	0,1	0,3			
AF 2,95 MAG Frantz 0,0A	11,2	0,7	0,75	0,88	74,3	0,61	0,36	15,5	1,02	0,81	0,79	2,6	0,6	26,0	2,0	0,5	11,4	1,1	0,1	0,0	1,5	0,2	0,0	1,4	0,1			
AF 2,95 MAG Frantz 0,20A	34,8	2,2	1,43	14,5	52,1	1,92	1,01	27,4	3,05	1,51	3,70	15,1	3,0	56,5	20,0	4,4	62,7	10,1	0,4	0,0	3,3	1,6	0,4	7,7	0,7			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,20A	36,0	2,2	6,72	4,34	12,5	6,58	20,0	10,6	24,3	4,13	5,18	73,3	9,4	14,0	71,0	90,7	25,2	83,4	2,1	0,4	0,8	5,7	7,4	3,1	5,4			
Total calculado	100,0	6,2	3,30	16,7	32,0	3,34	7,92	15,2	10,5	2,16	3,69	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	2,8	4,7	5,8	8,0	8,2	12,3	6,4			
Total dosado			2,88	17,2	31,1	3,13	7,18	15,2	9,92	2,12	4,37																	
Fração -0,074+0,020 mm																												
FL 2,95	12,3	1,3	1,43	83,4	5,86	1,24	0,71	0,39	1,87	0,20	2,78	3,6	78,0	2,3	2,8	1,7	0,3	2,1	0,3	4,8	0,2	0,7	0,2	0,1	0,3			
AF 2,95 MAG Frantz 0,0A	4,8	0,5	2,40	1,85	64,2	2,58	1,57	13,0	4,32	1,86	3,75	2,4	0,7	9,9	2,2	1,5	4,5	1,9	0,2	0,0	0,9	0,5	0,1	0,8	0,2			
AF 2,95 MAG Frantz 0,20A	60,5	6,4	4,82	2,54	41,5	9,24	2,35	19,5	8,62	3,42	6,91	59,7	11,7	80,9	57,2	27,4	84,5	47,3	4,6	0,7	7,7	13,6	2,6	15,7	5,8			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,20A	22,4	2,4	7,47	5,62	9,43	9,32	16,0	6,69	24,0	6,13	8,16	34,3	9,6	6,8	37,8	69,4	10,7	48,8	2,6	0,6	0,7	9,0	6,7	2,0	6,0			
Total calculado	100,0	10,6	4,88	13,1	31,0	5,54	5,18	14,0	11,0	3,56	6,53	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	7,6	6,2	9,5	23,8	9,6	18,6	12,2			
Total dosado			4,58	13,5	30,2	5,51	4,97	13,6	11,1	3,68	6,52																	
Fração -1,19+0,020 mm																												
FL 2,95	22,3	9,3	2,04	79,4	7,13	1,12	1,52	0,88	2,86	0,33	2,35	12,6	84,6	5,1	7,7	4,4	1,7	6,1	2,7	32,3	1,9	3,9	2,6	1,1	2,8			
AF 2,95 MAG Frantz 0,0A	14,8	6,2	0,91	2,40	74,5	0,76	0,89	13,6	1,58	0,87	0,96	3,8	1,5	35,5	3,5	1,7	17,2	2,3	0,8	0,5	13,3	1,8	1,0	10,8	1,0			
AF 2,95 MAG Frantz 0,20A	32,0	13,4	3,11	2,89	46,8	3,63	2,00	21,6	6,15	2,60	5,31	27,6	4,4	48,0	36,1	8,2	59,1	18,9	6,1	1,7	18,2	19,2	4,8	37,0	8,6			
AF 2,95 NMAG Frantz 0,20A	30,9	12,9	6,53	6,43	11,5	5,50	21,7	8,34	24,6	3,56	5,87	56,0	9,5	11,4	52,7	85,8	22,0	72,8	12,1	3,6	4,3	27,1	50,7	13,9	33,2			
Total calculado	100,00	41,8	3,60	20,9	31,2	3,22	7,80	11,7	10,4	2,13	4,17	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	21,7	38,2	37,7	51,9	59,2	62,7	45,5			

APÊNDICE F

Ensaio de lixiviação: matriz de respostas e análises de variância

Tabela 77 – Matriz experimental e respostas obtidas para as soluções/lixívias.

Ensaio*	Massa dissolvida (%)	Volume diluição (ml)	Variáveis em unidades reais				Teores das soluções (ppm; ICP)				
			C (%)	S (%)	T (°C)	t (h)	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₅	Pr ₆ O ₁₁	Fe ₂ O ₃
1 ¹⁵	5,1	500	20	10	25	0,5	11,4	21,5	15,4	<10	22,2
2 ¹⁷	22,0	1000	98	10	25	0,5	263,2	575,1	216,3	57,8	188,3
3 ¹⁶	3,3	500	20	40	25	0,5	<10	<10	12,9	<10	21,9
4 ¹⁸	24,0	500	98	40	25	0,5	448,2	880,0	358,8	102,6	164,9
5 ⁹	13,6	500	20	10	70	0,5	45,4	87,1	45,8	<10	313,2
6 ⁴	27,7	1000	98	10	70	0,5	250,6	506,2	206,7	55,8	1055,6
7 ⁸	7,3	500	20	40	70	0,5	22,7	30,6	29,7	<10	326,3
8 ⁷	24,7	500	98	40	70	0,5	537,8	1029,0	447,6	128,4	2154,0
9 ¹	4,7	500	20	10	25	4	39,6	66,6	40,1	<10	75,2
10 ⁵	22,1	1000	98	10	25	4	317,6	616,7	248,8	68,6	390,9
11 ¹²	3,6	500	20	40	25	4	20,2	24,8	25,1	<10	71,3
12 ¹³	18,5	500	98	40	25	4	599,8	1095,2	456,0	133,2	568,9
13 ¹⁹	15,4	500	20	10	70	4	108,8	223,5	110,4	25,1	2659,1
14 ¹⁴	40,3	1000	98	10	70	4	261,8	571,9	225,0	59,0	2542,4
15 ¹¹	7,9	500	20	40	70	4	26,8	47,3	39,0	<10	1089,1
16 ¹⁰	36,7	500	98	40	70	4	505,7	968,7	396,5	115,8	5016,8
17 ²	17,0	500	59	25	47,5	2,3	289,8	513,5	237,1	67,4	1335,9
18 ⁶	18,2	500	59	25	47,5	2,3	327,1	608,5	257,1	74,3	1350,2
19 ³	17,4	500	59	25	47,5	2,3	304,6	633,9	255,5	72,5	1349,5
(duplicata)											
1 ¹⁵	3,8	500	20	10	25	0,5	15,3	37,3	20,1	<10	68,7
2 ¹⁷	20,1	1000	98	10	25	0,5	281,4	539,8	215,7	59,5	283,1
3 ¹⁶	3,3	500	20	40	25	0,5	<10	15,5	16,1	<10	58,4
4 ¹⁸	12,0	500	98	40	25	0,5	502,3	922,4	380,6	116,2	249,1
5 ⁹	7,8	500	20	10	70	0,5	44,5	83,0	45,8	<10	537,8
6 ⁴	30,6	1000	98	10	70	0,5	324,9	651,1	259,6	72,4	1775,2
7 ⁸	6,7	500	20	40	70	0,5	24,5	39,9	32,8	<10	541,5
8 ⁷	26,8	500	98	40	70	0,5	560,9	1070,6	453,6	129,4	3388,3
9 ¹	4,1	500	20	10	25	4	54,4	89,1	55,2	<10	93,8
10 ⁵	24,5	1000	98	10	25	4	320,2	609,3	250,7	70,6	405,8
11 ¹²	4,6	500	20	40	25	4	19,4	21,3	25,6	<10	97,2
12 ¹³	16,1	500	98	40	25	4	532,1	1002,1	420,2	119,5	545,0
13 ¹⁹	14,0	500	20	10	70	4	87,4	188,4	90,5	18,1	2507,0
14 ¹⁴	41,4	1000	98	10	70	4	269,2	535,8	218,0	59,8	2380,1
15 ¹¹	8,9	500	20	40	70	4	18,4	39,1	30,7	<10	1496,2
16 ¹⁰	34,0	500	98	40	70	4	502,9	1056,7	418,1	121,4	5748,3
17 ²	16,3	500	59	25	47,5	2,3	429,3	819,0	338,9	98,2	1820,9
18 ⁶	16,8	500	59	25	47,5	2,3	379,9	743,3	298,6	85,8	1524,6
19 ³	15,7	500	59	25	47,5	2,3	402,8	733,8	325,1	92,9	1527,4

Obs: C = concentração sulfúrica, S = porcentagem de sólidos, T = temperatura e t = tempo; * sobrescrito informa a ordem de realização dos ensaios (aleatoriamente).

Tabela 78 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o La_2O_3 .

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	6,63445	0,44230	53,55	0,000
Linear	4	6,54638	1,63659	198,13	0,000
Concentração (C; %)	1	6,42611	6,42611	777,98	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	0,12005	0,12005	14,53	0,001
Temperatura (T; °C)	1	0,00001	0,00001	0,00	0,969
Tempo (t; h)	1	0,00020	0,00020	0,02	0,878
Interações de 2 fatores	6	0,06255	0,01042	1,26	0,315
C*S	1	0,00001	0,00001	0,00	0,969
C*T	1	0,00005	0,00005	0,01	0,939
C*t	1	0,00361	0,00361	0,44	0,515
S*T	1	0,00001	0,00001	0,00	0,969
S*t	1	0,00605	0,00605	0,73	0,401
T*t	1	0,05281	0,05281	6,39	0,019
Interações de 3 fatores	4	0,02307	0,00577	0,70	0,601
C*S*T	1	0,00405	0,00405	0,49	0,491
C*S*t	1	0,00911	0,00911	1,10	0,305
C*T*t	1	0,00980	0,00980	1,19	0,288
S*T*t	1	0,00011	0,00011	0,01	0,908
Interações de 4 fatores	1	0,00245	0,00245	0,30	0,591
C*S*T*t	1	0,00245	0,00245	0,30	0,591
Erro	22	0,18172	0,00826		
Curvatura	1	0,10807	0,10807	30,81	0,000
Erro puro	21	0,07365	0,00351		
Total	37	6,81617			
Sumário do modelo	R2 97,33%; R2 ajustado 95,52%				
Equação de regressão	$1,606 - 0,01098 C - 0,00001 S - 0,00335 T - 0,0256 t + 0,000045 C*S$ $+ 0,000016 C*T - 0,00066 C*t + 0,000106 S*T + 0,00077 S*t + 0,00100 T*t -$ $0,000002 C*S*T - 0,000002 C*S*t + 0,000002 C*T*t - 0,000026 S*T*t$ $+ 0,000000 C*S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R2 = coeficiente de explicação.

Tabela 79 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o CeO₂.

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	23,020	1,535	44,32	0,000
Linear	4	22,701	5,675	163,89	0,000
Concentração (C; %)	1	22,361	22,361	645,72	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	0,3260	0,3260	9,41	0,006
Temperatura (T; °C)	1	0,0140	0,0140	0,41	0,531
Tempo (t; h)	1	0,0000	0,0000	0,00	0,993
Interações de 2 fatores	6	0,1597	0,0266	0,77	0,603
C*S	1	0,0038	0,0038	0,11	0,743
C*T	1	0,0020	0,0020	0,06	0,814
C*t	1	0,0215	0,0215	0,62	0,439
S*T	1	0,0017	0,0017	0,05	0,829
S*t	1	0,0095	0,0095	0,27	0,607
T*t	1	0,1213	0,1213	3,50	0,075
Interações de 3 fatores	4	0,1453	0,0363	1,05	0,405
C*S*T	1	0,0458	0,0458	1,32	0,263
C*S*t	1	0,0345	0,0345	0,99	0,329
C*T*t	1	0,0570	0,0570	1,64	0,213
S*T*t	1	0,0081	0,0081	0,23	0,633
Interações de 4 fatores	1	0,0140	0,0140	0,41	0,531
C*S*T*t	1	0,0140	0,0140	0,41	0,531
Erro	22	0,7619	0,0346		
Curvatura	1	0,4820	0,4820	36,16	0,000
Erro puro	21	0,2799	0,0133		
Total	37	23,7823			
Sumário do modelo	R ² 96,80%; R ² ajustado 94,61%				
Equação de regressão	3,557 - 0,02079 C - 0,0050 S - 0,00852 T - 0,040 t + 0,000143 C*S + 0,000052 C*T - 0,00141 C*t + 0,000330 S*T + 0,00259 S*t + 0,00196 T*t - 0,000005 C*S*T - 0,000011 C*S*t + 0,000005 C*T*t - 0,000081 S*T*t + 0,000001 C*S*T*t				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R² = coeficiente de explicação.

Tabela 80 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o Nd₂O₅.

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	3,19485	0,21299	44,79	0,000
Linear	4	3,15273	0,78818	165,77	0,000
Concentração (C; %)	1	3,10005	3,10005	651,99	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	0,04351	0,04351	9,15	0,006
Temperatura (T; °C)	1	0,00911	0,00911	1,92	0,180
Tempo (t; h)	1	0,00005	0,00005	0,01	0,919
Interações de 2 fatores	6	0,01795	0,00299	0,63	0,705
C*S	1	0,00101	0,00101	0,21	0,649
C*T	1	0,00031	0,00031	0,07	0,800
C*t	1	0,00180	0,00180	0,38	0,545
S*T	1	0,00020	0,00020	0,04	0,839
S*t	1	0,00101	0,00101	0,21	0,649
T*t	1	0,01361	0,01361	2,86	0,105
Interações de 3 fatores	4	0,02172	0,00543	1,14	0,363
C*S*T	1	0,00605	0,00605	1,27	0,271
C*S*t	1	0,00661	0,00661	1,39	0,251
C*T*t	1	0,00781	0,00781	1,64	0,213
S*T*t	1	0,00125	0,00125	0,26	0,613
Interações de 4 fatores	1	0,00245	0,00245	0,52	0,480
C*S*T*t	1	0,00245	0,00245	0,52	0,480
Erro	22	0,10461	0,00475		
Curvatura	1	0,06442	0,06442	33,67	0,000
Erro puro	21	0,04018	0,00191		
Total	37	3,29946			
Sumário do modelo	R ² 96,83%; R ² ajustado 94,67%				
Equação de regressão	$1,311 - 0,00770 C - 0,00169 S - 0,00358 T - 0,0144 t + 0,000049 C*S$ $+ 0,000021 C*T - 0,000493 C*t + 0,000128 S*T + 0,00095 S*t$ $+ 0,00075 T*t - 0,000002 C*S*T - 0,000004 C*S*t + 0,000001 C*T*t$ $- 0,000033 S*T*t + 0,000000 C* S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R² = coeficiente de explicação.

Tabela 81 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o SiO₂.

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	227,652	15,177	37,21	0,000
Linear	4	189,109	47,277	115,91	0,000
Concentração (C; %)	1	113,628	113,628	278,58	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	7,703	7,703	18,89	0,000
Temperatura (T; °C)	1	47,775	47,775	117,13	0,000
Tempo (t; h)	1	20,003	20,003	49,04	0,000
Interações de 2 fatores	6	35,324	5,887	14,43	0,000
C*S	1	1,758	1,758	4,31	0,050
C*T	1	20,640	20,640	50,60	0,000
C*t	1	4,425	4,425	10,85	0,003
S*T	1	0,003	0,003	0,01	0,935
S*t	1	0,195	0,195	0,48	0,496
T*t	1	8,303	8,303	20,36	0,000
Interações de 3 fatores	4	2,694	0,673	1,65	0,197
C*S*T	1	0,008	0,008	0,02	0,891
C*S*t	1	0,633	0,633	1,55	0,226
C*T*t	1	2,050	2,050	5,03	0,035
S*T*t	1	0,003	0,003	0,01	0,935
Interações de 4 fatores	1	0,525	0,525	1,29	0,269
C*S*T*t	1	0,525	0,525	1,29	0,269
Erro	22	8,973	0,408		
Curvatura	1	0,128	0,128	0,30	0,587
Erro puro	21	8,845	0,421		
Total	37	236,626			
Sumário do modelo	R ² 96,21%; R ² ajustado 93,62%				
Equação de regressão	$23,67 + 0,0414 C + 0,0472 S + 0,0096 T + 0,626 t - 0,001248 C*S$ $+ 0,000261 C*T - 0,01242 C*t - 0,000660 S*T - 0,0259 S*t - 0,0046 T*t$ $+ 0,000011 C*S*T + 0,000402 C*S*t + 0,000304 C*T*t + 0,000312 S*T*t - 0,000006 C*S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R² = coeficiente de explicação.

Tabela 82 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o Fe₂O₃.

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	88,7847	5,9190	15,51	0,000
Linear	4	61,6837	15,4209	40,42	0,000
Concentração (C; %)	1	34,2378	34,2378	89,74	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	5,6953	5,6953	14,93	0,001
Temperatura (T; °C)	1	16,3878	16,3878	42,95	0,000
Tempo (t; h)	1	5,3628	5,3628	14,06	0,001
Interações de 2 fatores	6	21,8344	3,6391	9,54	0,000
C*S	1	5,8653	5,8653	15,37	0,001
C*T	1	5,6953	5,6953	14,93	0,001
C*t	1	0,2278	0,2278	0,60	0,448
S*T	1	0,0903	0,0903	0,24	0,631
S*t	1	0,1653	0,1653	0,43	0,517
T*t	1	9,7903	9,7903	25,66	0,000
Interações de 3 fatores	4	3,8637	0,9659	2,53	0,069
C*S*T	1	0,0903	0,0903	0,24	0,631
C*S*t	1	0,8778	0,8778	2,30	0,144
C*T*t	1	1,5753	1,5753	4,13	0,054
S*T*t	1	1,3203	1,3203	3,46	0,076
Interações de 4 fatores	1	1,4028	1,4028	3,68	0,068
C*S*T*t	1	1,4028	1,4028	3,68	0,068
Erro	22	8,3935	0,3815		
Curvatura	1	0,2085	0,2085	0,53	0,473
Erro puro	21	8,1850	0,3898		
Total	37	97,1782			
Sumário do modelo	R ² 91,36%; R ² ajustado 85,47%				
Equação de regressão	$34,19 + 0,0694 C + 0,0391 S + 0,0297 T + 0,014 t - 0,001531 C*S - 0,000768 C*T + 0,00135 C*t - 0,000828 S*T - 0,0023 S*t - 0,01033 T*t + 0,000024 C*S*T + 0,000270 C*S*t + 0,000083 C*T*t + 0,000192 S*T*t - 0,000009 C*S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R² = coeficiente de explicação.

Tabela 83 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o Al_2O_3 .

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	9,3595	0,62396	8,41	0,000
Linear	4	6,2841	1,57104	21,16	0,000
Concentração (C; %)	1	0,0512	0,05120	0,69	0,415
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	0,2380	0,23805	3,21	0,087
Temperatura (T; °C)	1	3,7265	3,72645	50,20	0,000
Tempo (t; h)	1	2,2684	2,26845	30,56	0,000
Interações de 2 fatores	6	2,9555	0,49258	6,64	0,000
C*S	1	0,0925	0,09245	1,25	0,276
C*T	1	0,4232	0,42320	5,70	0,026
C*t	1	0,0128	0,01280	0,17	0,682
S*T	1	0,0072	0,00720	0,10	0,758
S*t	1	0,1300	0,13005	1,75	0,199
T*t	1	2,2898	2,28980	30,85	0,000
Interações de 3 fatores	4	0,1186	0,02964	0,40	0,807
C*S*T	1	0,0072	0,00720	0,10	0,758
C*S*t	1	0,0040	0,00405	0,05	0,817
C*T*t	1	0,0761	0,07605	1,02	0,322
S*T*t	1	0,0313	0,03125	0,42	0,523
Interações de 4 fatores	1	0,0012	0,00125	0,02	0,898
C*S*T*t	1	0,0012	0,00125	0,02	0,898
Erro	22	1,6331	0,07423		
Curvatura	1	0,9108	0,91084	26,48	0,000
Erro puro	21	0,7222	0,03439		
Total	37	10,9925			
Sumário do modelo	R2 85,14%; R2 ajustado 75,01%				
Equação de regressão	$2,685 + 0,00412 C - 0,0048 S - 0,0008 T + 0,062 t + 0,000016 C*S - 0,000016 C*T + 0,00181 C*t + 0,000178 S*T + 0,00149 S*t - 0,00320 T*t - 0,000002 C*S*T - 0,000024 C*S*t - 0,000039 C*T*t - 0,000069 S*T*t + 0,000000 C*S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R2 = coeficiente de explicação.

Tabela 84 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o TiO₂.

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	24,1385	1,6092	47,59	0,000
Linear	4	20,4946	5,1236	151,54	0,000
Concentração (C; %)	1	13,2484	13,2484	391,84	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	0,6470	0,6470	19,13	0,000
Temperatura (T; °C)	1	5,1923	5,1923	153,57	0,000
Tempo (t; h)	1	1,4070	1,4070	41,61	0,000
Interações de 2 fatores	6	3,5159	0,5860	17,33	0,000
C*S	1	0,4118	0,4118	12,18	0,002
C*T	1	1,6974	1,6974	50,20	0,000
C*t	1	0,7534	0,7534	22,28	0,000
S*T	1	0,0132	0,0132	0,39	0,538
S*t	1	0,0102	0,0102	0,30	0,589
T*t	1	0,6300	0,6300	18,63	0,000
Interações de 3 fatores	4	0,1032	0,0258	0,76	0,560
C*S*T	1	0,0790	0,0790	2,34	0,141
C*S*t	1	0,0109	0,0109	0,32	0,576
C*T*t	1	0,0002	0,0002	0,00	0,947
S*T*t	1	0,0132	0,0132	0,39	0,538
Interações de 4 fatores	1	0,0248	0,0248	0,73	0,401
C*S*T*t	1	0,0248	0,0248	0,73	0,401
Erro	22	0,7438	0,0338		
Curvatura	1	0,0015	0,0015	0,04	0,839
Erro puro	21	0,7423	0,0353		
Total	37	24,8823			
Sumário do modelo	R ² 97,01%; R ² ajustado 94,97%				
Equação de regressão	$8,289 + 0,01036 C + 0,0154 S + 0,00336 T - 0,186 t - 0,000462 C*S$ $+ 0,000103 C*T + 0,00133 C*t - 0,000366 S*T - 0,00001 S*t + 0,00273 T*t$ $+ 0,000006 C*S*T + 0,000039 C*S*t + 0,000029 C*T*t + 0,000037 S*T*t -$ $0,000001 C*S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R² = coeficiente de explicação.

Tabela 85 – Análise da variância para os efeitos principais e regressão fatorial para o BaO.

ANOVA: modelo 1ª ordem					
Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F-valor	P-valor
Modelo	15	0,679422	0,045295	10,58	0,000
Linear	4	0,587487	0,146872	34,32	0,000
Concentração (C; %)	1	0,507528	0,507528	118,59	0,000
Porcentagem de sólidos (S; %)	1	0,002278	0,002278	0,53	0,473
Temperatura (T; °C)	1	0,067528	0,067528	15,78	0,001
Tempo (t; h)	1	0,010153	0,010153	2,37	0,138
Interações de 2 fatores	6	0,022869	0,003811	0,89	0,519
C*S	1	0,011628	0,011628	2,72	0,113
C*T	1	0,001378	0,001378	0,32	0,576
C*t	1	0,009453	0,009453	2,21	0,151
S*T	1	0,000153	0,000153	0,04	0,852
S*t	1	0,000003	0,000003	0,00	0,979
T*t	1	0,000253	0,000253	0,06	0,810
Interações de 3 fatores	4	0,068687	0,017172	4,01	0,014
C*S*T	1	0,016653	0,016653	3,89	0,061
C*S*t	1	0,000253	0,000253	0,06	0,810
C*T*t	1	0,050403	0,050403	11,78	0,002
S*T*t	1	0,001378	0,001378	0,32	0,576
Interações de 4 fatores	1	0,000378	0,000378	0,09	0,769
C*S*T*t	1	0,000378	0,000378	0,09	0,769
Erro	22	0,094149	0,004280		
Curvatura	1	0,000999	0,000999	0,23	0,640
Erro puro	21	0,093150	0,004436		
Total	37	0,773571			
Sumário do modelo	R2 87,83%; R2 ajustado 79,53%				
Equação de regressão	$1,809 + 0,00266 C + 0,00527 S + 0,00059 T - 0,0808 t - 0,000125 C*S$ $+ 0,000014 C*T + 0,001371 C*t - 0,000091 S*T + 0,00028 S*t + 0,00151 T*t$ $+ 0,000002 C*S*T + 0,000004 C*S*t - 0,000022 C*T*t - 0,000002 S*T*t -$ $0,000000 C*S*T*t$				

Obs: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados dos resíduos; F-valor = índice de convergência; P-valor = probabilidade de significância; R2 = coeficiente de explicação.

APÊNDICE G

Análise de tamanho de partículas à laser

Figura 50 – Análise de tamanho de partículas à laser - Amostra D2 (-0,30 mm).

Figura 51 – Análise de tamanho de partículas à laser - Amostra D2 (Overflow).

RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Relatório: MAL 4117-17	POP:	Data da medida: terça-feira, 6 de junho de 2017 10:18:10
Cliente: HENRIQUE KAHN - DOUTORADO JULIANA	Analista: Ingled	Data da análise: terça-feira, 6 de junho de 2017 10:18:11
Amostra: D2 overflow (aliqu 2 - muita massa)	Fonte de resultados: Edited	
Notas: Vel. Bomba: 2500 rpm Meio de dispersão: água deionizada Dispersante: calgon Ultrassom: 2 min		

Código I.R.: 1.74_0.1	Amostrador: Hydro 2000MU (A)	Tipo de análise: General purpose	Sensitividade: Normal
I.R. da partícula: 1.740	Absorção: 0.1	Faixa de tamanho: 0.020 to 2000.000 μm	Obscurecência: 9.42 %
Dispersante: Water	I.R. do dispersante: 1.330	Resíduo: 0.700 %	Result Emulation: Off

Concentração: 0.0022 %Vol	Span : 4.792	Uniformidade: 1.46	Tipo de distribuição: Volume
Área superf. espec.: 3.33 m^2/g	D[3,2]: 1.804 μm	D[4,3]: 5.842 μm	
d(0.1): 0.722 μm	d(0.5): 2.980 μm	d(0.9): 15.001 μm	

Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	16.43	7.096	77.71	50.238	99.78	355.686	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	19.01	7.962	80.14	55.368	99.91	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	21.79	8.934	82.30	63.245	99.98	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	24.81	10.024	84.25	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	28.06	11.247	86.03	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	31.63	12.619	87.68	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.07	2.000	35.43	14.159	89.24	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.43	2.244	39.45	15.887	90.73	112.458	100.00	795.214	100.00
0.050	0.00	0.356	1.04	2.518	43.66	17.825	92.15	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	1.92	2.825	47.98	20.000	93.49	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	3.06	3.170	52.34	22.440	94.74	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	4.42	3.557	56.66	25.179	95.88	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	6.00	3.991	60.84	28.251	96.89	200.000	100.00	1415.692	100.00
0.089	0.00	0.632	7.77	4.477	64.82	31.698	97.76	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	9.70	5.024	68.53	35.666	98.49	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	11.79	5.637	71.92	39.905	99.06	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.128	0.00	0.893	14.03	6.325	74.98	44.774	99.48	316.979	100.00

Profa. Dra. Carina Ulsen
Coordenadora do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari
Pesquisadora do LCT

M.Sc. Guilherme Nery
Pesquisador do LCT