



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M

**DETECÇÃO DE MINÉRIO PORTADOR DE ELEMENTOS DE TERRAS  
RARAS DO DEPÓSITO DE PITINGA/AM, BRASIL ASSISTIDO POR  
TECNOLOGIA DE *SENSOR-BASED SORTING***

Por

**Moacir Medeiros Veras**

**Mestre em Engenharia Mineral**

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre  
2018

**Moacir Medeiros Veras**  
**Mestre em Engenharia Mineral**

**Detecção de minério portador de elementos de terras raras do depósito de Pitanga/AM, Brasil assistido por tecnologia de *sensor-based sorting***

Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr-Ing. Carlos Hoffmann Sampaio

Coorientador: Prof. Dr-Ing Carlos Otávio Petter

Porto Alegre  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

CIP - Catalogação na Publicação

Veras, Moacir

Detecção de minério portador de elementos de terras raras do depósito de Pitinga/AM, Brasil assistido por tecnologia de sensor-based sorting / Moacir Veras. -- 2018.

102 f.

Orientadora: Carlos Sampaio.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Detecção. 2. Terras raras. 3. Sensor-based sorting. 4. Sensor de imagem CCD. 5. Sensor de raios-x. I. Sampaio, Carlos, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**MOACIR MEDEIROS VERAS**

**Detecção de minério portador de elementos de terras raras do depósito de Pitinga/AM, Brasil assistido por tecnologia de *sensor-based sorting***

A presente tese foi realizada inteiramente pelo autor compreendendo o interstício de 2014.2 e 2018.2, sob orientação do Professor Dr. Carlos Hoffman Sampaio e Coorientação do professor Dr. Carlos Otávio Petter. A tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador Prof. Dr-Ing. Carlos Hoffmann Sampaio  
UFRGS-PPGE3M/Escola de Engenharia

Aprovada em: 11/7/2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Régis Sebben Paranhos  
UNIPAMPA

Prof. Dr. Júlio Cesar Pontes  
IFRN/DIAREN

Dr. Gerson Miltzarek  
Pesquisador UFRGS/LAPROM

Este trabalho é dedicado a Bianca, Giovanna, Giulia, Zuleide, Marcelo e demais familiares. Mas também a todos aqueles pesquisadores que dão sua contribuição para o desenvolvimento científico e tecnológico do País.

## AGRADECIMENTOS

Nesta seção existem muitos a quem eu gostaria de expressar meus agradecimentos, mas se a escrita falhar, mesmo aqueles que direta ou indiretamente dedicaram um pouco ou totalmente seu tempo para apoiar, gostaria que considerasse meus sinceros agradecimentos pois todos são de grande relevância.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá – IFAP, por oportunizar a formação de recursos humanos concedendo a mim o afastamento para cursar doutorado.

Ao Laboratório de Processamento Mineral - LAPROM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, pela oportunidade, apoio e assistência na realização deste trabalho de pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, por todo apoio e assistência durante minha permanência no curso de doutorado.

Ao Instituto de Geociência – IGEO da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, pela parceria e apoio no fornecimento de material e caracterização de amostras.

Aos professores Carlos Hoffmann Sampaio e Carlos Otávio Petter, por dar todo suporte, orientação para o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Artur Cezar Bastos Neto, que contribuiu significativamente com o fornecimento de amostras, orientação e análises de caracterização para este trabalho.

Ao aluno de graduação Cristiano Rocha Born, pelo apoio na caracterização

A todos os meus familiares, em especial à Ivete Dantas Vêras, José Gonçalves Filho Edna Dantas Vêras, Lourineide Gurgel de Araújo Vêras e aos meus irmãos e irmã.

Ao meu pai Marcelo Martins Vêras, pelo apoio no desenvolvimento do doutorado.

A minha mãe Zuleide Medeiros e meu tio Francisco de Assis Medeiros que sempre apoiaram minha jornada e crescimento profissional nos momentos bons e de dificuldades.

A minha esposa, Bianca da Cunha Jácome Vêras e nossas filhas, Giovanna Jácome Vêras e Giulia Jácome Vêras, por apoiar a jornada desse doutorado que iniciou em 2014.

Neste último parágrafo expressei meus agradecimentos a Deus pois sempre escutou meus pedidos em oração.

No meio da dificuldade  
encontra-se a oportunidade.

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho avalia a afinidade da tecnologia de *sensor-based sorting* (SBS) assistido com sensor de imagem *Charge Couple Device* CCD e de *Dual Energy-Xray Transmission* (DE-XRT) para detectar minérios portadores de elementos de terras raras (ETR). As amostras foram coletadas *in situ* no depósito de Pitinga/AM-Brasil e enviadas para o LAPROM/UFRGS. Os testes foram realizados sob as mesmas condições operacionais com ambos sensores. As partículas examinadas estão na fração de tamanho entre -10 +5 (cm), limpas e secas antes dos testes. A alimentação para o *sorting* foi feita manualmente, uma partícula por partícula, garantindo que o sensor capturasse as imagens sob as mesmas condições para cada partícula. Os dados capturados foram processados com *software* COMEX OSX e CRX, tendo como primeiro estágio a identificação dos melhores parâmetros para a detecção de minérios portadores do mineral de xenotima, rico em elementos de terras raras. A caracterização do material foi realizada por análise química da espectroscopia de massa de plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) no Actlabs - Activation Laboratories LTD, além de dados de balanço de massa e cálculos de recuperação. Os resultados mostraram que o sensor óptico reconheceu com sucesso os clastos com características de estéril, porém verificou-se que a detectabilidade efetiva para rochas com mineralização do mineral de xenotima não foi viável. Por outro lado, o sensor DE-XRT mostrou uma forte afinidade de detecção de partículas portadores de elementos leves e pesados de terras raras (ETRL - ETRP) com recuperação mássica acumulada de aproximadamente 15% e recuperação metalúrgica superior a 79% (ETRL) e 89% (ETRP), respectivamente no segundo estágio, e com aproximadamente ~ 66% de recuperação de massa acumulada no terceiro estágio, o teor metalúrgico de ETR leves e pesados foi da ordem de 94% e 96%. Essas recuperações correspondem a um aumento de 514,79 ppm, dos ETRL e 5113,6 ppm dos ETRP, no material investigado representando um *upgrade* de 10.067,8 ppm nos ETRL e 118.008,3 ppm nos ETRP. Complementarmente foi possível avaliar também que o sensor DE-XRT permite detectar os clastos portadores de ETR sem presença de minérios polimetálicos e deletérios, ficando estes dois últimos associados, considerando a possibilidade de separação empregada usando o sensor de DE-XRT.

Palavras-chave: Detecção. Terras raras. *Sensor-based sorting*. Sensor de imagem CCD, Sensor de raios-x.

## ABSTRACT

This work evaluates the affinity of optical and dual energy x-ray transmission (DE-XRT) sensors to the detection of rare earth element (REE) bearing ores. The samples were collected in situ at the Pitinga/AM-Brazil mine and sent to LAPROM/UFRGS for study. The tests were carried out under the same operating conditions to both sensors. The particles examined were in the size fraction -10 +5 (cm) and were cleaned and dried prior to scanning. The feeding to the sorter was done manually, one particle at a time, ensuring that the sensor captured the images under the same conditions for each particle. The captured data were processed using Comex OSX and CRX software, the first priority being the identification of the best parameters for detecting xenotime mineral, which are rich in rare earth elements. The characterization of the material was performed by chemical analysis of inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS) in the laboratory Actlabs - Activation Laboratories Ltd and mass balance data and recovery calculations. The results showed that the optical sensor successfully recognized the waste particle, but it lacked the capacity to detect rocks of mineralization of xenotime mineral. On the other hand, the DE-XRT sensor showed a strong particle detection capacity for both light and heavy Rare Earth Elements (LREE, HREE) with accumulated mass recovery of approximately 15% and metallurgical recovery higher than 79% (LREE) and 89% (HREE), respectively in the second stage, and ~66% accumulated mass recovery in the third stage with metallurgical content of light and heavy REE in the order of 94% and 96%. In addition, it was also possible to evaluate that the DE-XRT sensor allows the detection of ETR-bearing clasts without the presence of polymetallic and deleterious ores, the latter being associated considering the possibility of separation using the DE-XRT sensor.

Keywords: Detection. Rare earth. Sensor-based sorting. Optical sensor. X-Ray transmission.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Distribuição dos recursos de ETRL e ETRP por projetos incluindo Pitinga. ....	23
Figura 2. Mapa geológico do Granito Madeira. ....	24
Figura 3. Classificação por separação manual em mesa registrado por Agricola em 1556 (a) e sob esteira na Mina Sullivan no Canadá em 1915 (b). ....	27
Figura 4. Layout do último modelo de equipamento M17- <i>Sorter Machine</i> criado por Kelly e Hutter. ....	28
Figura 5. <i>Layout do automatic sorting</i> tipo esteira e calha. ....	32
Figura 6. Range do espectro eletromagnético e suas características, tipos de sensores, propriedades exploradas e possibilidades de aplicação. ....	33
Figura 7. Comportamento do tipo de radiação incidente em uma superfície. ....	34
Figura 8. Imagens obtida por sensor raios-x em minério de ferro-cromo 1,2 e carvão 3, e por sensor de imagem para minério de tungstênio 4,5. ....	35
Figura 9. Tecnologia <i>Multichannel scanning system</i> da Comex®. ....	35
Figura 10. Modelo de cores RGB em (a) e sua cor inversa CYM em (b). ....	38
Figura 11. Componentes de uma CCD com lentes (1) e sensor (2) em (a), conexão (3) com <i>driver</i> (4) em (b). ....	39
Figura 12. Capacitor MOS de imagem de uma sensor CCD. ....	39
Figura 13. Estrutura física de um capacitor. ....	39
Figura 14. Organização em linha dos pixels no capacitor em (a) e placa com capacitor e microcontroladores em (b). ....	41
Figura 15. Calibração por sensor de câmera CCD em equipamento <i>sorting</i> da marca COMEX em (a) e leitura dos percentuais e intensidade de cor da partícula em (b). ....	42
Figura 16. Evolução, eventos de testes e aplicações dos sensores de raios-x. ....	43
Figura 17. Layout de um tubo de raios-x e seus periféricos. ....	44
Figura 18. Elétron que dissipa energia térmica no ânodo em (a) e elétron tocando o núcleo do átomo mudando sua trajetória em (b). ....	44

Figura 19. Atenuação de raios-x na camada de um material.....	45
Figura 20. Coeficiente de atenuação dos elementos das terras raras, na escala de log, em função da variação de energia do fóton.....	47
Figura 21. Layout de uma separação por raios-x. ....	48
Figura 22. Conversão da imagem de raio-x em uma imagem tratada. ....	48
Figura 23. Sistema mecânico de rejeição com um único atuador. ....	49
Figura 24. Escala de corte da calibração em raios-x em (a), histograma da densidade convertida em (b), área de seleção do material de menor densidade em (c) e seleção de partícula com densidades em (d). ....	50
Figura 25. Mapa geológico do granito Madeira em (a) e visão em perfil geológico da serra do Madeira em (b). ....	51
Figura 26. Amostras da mina de Pitinga identificadas, embaladas em sacos e suas variações. ....	52
Figura 27. Layout da unidade de operação do <i>automatic sorting</i> modelo COMEX <i>Lab-Sorter</i> MSX-400-VL-XR-3D® e seus periféricos.....	53
Figura 28. Imagem capturada pelo sensor óptico e tratadas pelo <i>software</i> Comex-OSX. ....	54
Figura 29. Metodologia para scan com sensor de imagem CCD. ....	55
Figura 30. Layout do sensor que capta a radiação de raios-x.....	58
Figura 31. Sequência de imagem capturada por sensor DE-XRT e tratadas pelo software Comex-CXR. ....	59
Figura 32. Fluxograma da metodologia para os testes assistidos por sensor DE-XRT.....	60
Figura 33. Multiplicnômetro com identificação de comandos, câmara e cilindro de gás hélio.	63
Figura 34. Comportamento das curvas do RGB nos histogramas e percentual da intensidade de cor acumulada no gráfico. ....	64
Figura 35. Balanço de massa e teores de ETR classificadas por sensor óptico.....	65
Figura 36. Teor médio de ETR separados pelo sensor óptico. ....	66
Figura 37. Histogramas e gráfico nas cores RGB em função do percentual da intensidade de cor no sensor DE-XRT. ....	67

Figura 38. Limites de cores RGB para detectar xenotima (a) e exemplo de seletividade com os parâmetros propostos em (b). .....	68
Figura 39. Valores de atenuação da dupla energia equivalente tratada pelo <i>software</i> Comex-CXR e, amostras de calibração.....	69
Figura 40. Distribuição de massa e teores dos ETR das partículas detectadas por sensor DE-XRT. ....	70
Figura 41. Recuperação metalúrgica dos ETR leves e pesados detectados pelo sensor DE-XRT. ....	71
Figura 42. Recuperação metalúrgica em função do ganho de massa recuperada.....	73
Figura 43. Distribuição dos teores dos ETRL e ETRP nos produtos.....	73
Figura 44. Recuperação metalúrgica acumulada dos ETRL, ETRP, metais, Th e U.....	74
Figura 45. Luz transmitida da lâmina petrográfica (10x) no albitito em (a), albita granito em (b) e pegmatito em (c). ....	76
Figura 46. Lâmina do produto C1 com identificação da xenotima em luz transmitida e natural. ....	77
Figura 47. Lâmina do produto C2 com identificação da xenotima em luz transmitida (a) e natural em (b) com outros minerais na luz natural em (c).....	78
Figura 48. Lâminas dos produtos C3 ao C5 com luz transmitida em (a), (b), (d), (e) e luz natural em (c) e (f). ....	79
Figura 49. Valores de atenuação média da dupla energia atenuada relacionada a massa específica em cada massa obtida. ....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Uso dos equipamentos de <i>sorting</i> nos anos 90 para mineração.....	29
Tabela 2. Situação do uso dos equipamentos de <i>sorting</i> atualmente.....	29
Tabela 3. Propriedade do espectro eletromagnético da luminosidade no campo visível. ....	36
Tabela 4. Parâmetros das características de cor RGB para um sensor CCD.....	37
Tabela 5. Propriedades físicas de cintiladores usados no <i>automatic sorting</i> modelo COMEX <i>Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D</i> <sup>®</sup> . ....	58
Tabela 6. Recuperação metalúrgica dos ETR detectados pelo sensor DE-XRT.....	71
Tabela 7. Teor acumulado, recuperação metalúrgicas e mássica acumulada em cada produto. .....	72
Tabela 8. Teores, e recuperação metalúrgica e mássica dos ETRL, ETRP, metais e Th+U....	74
Tabela 9. Mineralogia de Pitinga resumida pelo IGEO/UFRGS.....	77
Tabela 10. Valores de massa específica dos produtos separados no sensor DE-XRT. ....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCD	<i>Coupled charging device</i>
DE-XRT	<i>Dual energy x-ray transmission</i>
ED-XRF	<i>Energy dispersive - X-ray fluorescence spectrometer</i>
ID	<i>Induction Detection</i>
ETR	Elementos de terras raras
MTR	Minérios de terras raras
OTR	Óxidos de terras raras
SBS	<i>Sensor-based sorting</i>
TR	Terras raras

## GLOSSÁRIO

<i>Automatic sorting</i>	Separador ou classificador automático
<i>By-products</i>	Subprodutos
<i>Coupled charging device</i>	Dispositivo de carga acoplada
<i>Dual energy x-ray transmission</i>	Dupla energia por transmitância de raios-x
<i>Sensor-based sorting</i>	Classificadores a base de sensores
<i>Energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer</i>	Energia dispersiva por espectrometria de fluorescência de raios-x
<i>Induction detection</i>	Detecção por indução
<i>Capital expenditure</i>	Despesas de capital ou investimentos em bens de capital

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1. OBJETIVO .....	17
<b>1.1.1. Objetivos específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
2.1. TERRAS RARAS .....	19
<b>3.1.1. Minérios de terras raras e suas aplicações</b> .....	<b>20</b>
2.2. DEPÓSITO E GEOLOGIA DE PITINGA .....	21
2.3. PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS PORTADORES DE TERRAS RARAS.....	25
2.4. TECNOLOGIA DE SENSOR-BASED SORTING.....	26
<b>3.4.1. História da tecnologia SBS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.4.2. Fundamentos da tecnologia de SBS</b> .....	<b>31</b>
2.5. SENSOR DE IMAGEM CCD .....	35
<b>3.5.1. Princípio de funcionamento</b> .....	<b>35</b>
2.6. SENSOR DE RAIOS-X .....	42
<b>3.6.1. Princípio de funcionamento</b> .....	<b>42</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
3.1. AMOSTRAS .....	51
3.2. SISTEMA DE SORTING .....	52
<b>4.2.1. Imagem do sensor óptico</b> .....	<b>53</b>
<b>4.2.2. Imagem do sensor de raios-x</b> .....	<b>55</b>
3.3. ANÁLISES QUÍMICAS .....	60
3.4. ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	61
3.5. ANÁLISE DE MASSA ESPECÍFICA .....	62
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>64</b>
4.1. SCAN COM SENSOR ÓPTICO .....	64
4.2. SCAN COM SENSOR DE-XRT .....	68
4.3. ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	75
4.4. MASSA ESPECÍFICA.....	79
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>91</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>92</b>
<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>95</b>
<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>97</b>
<b>APÊNDICE E</b> .....	<b>100</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>102</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda para o consumo de elementos das terras raras (ETR), nos últimos 15 anos aumentou três vezes, introduzindo esse recurso mineral no mercado com a finalidade de melhorar a qualidade ou desempenho de novas tecnologias. Como exemplo pode-se citar que os veículos atuais, exceto os elétricos, contêm 33 componentes periféricos que usam elementos de terras raras como ligas metálicas para melhorar o desempenho tecnológico ou/e redução de emissões de massa, além de promover dimensões cada vez menores desses periféricos (Lapido-Loreiro, 2013 e Zepf, 2016).

Os maiores desafios para obtenção dos ETR estão relacionados com as dificuldades de beneficiamento que envolve estágios de cominuição e complexos processos químicos, considerando ainda que quase sempre esses elementos estão associados a elementos deletérios. Uma possível solução seria usar a tecnologia de *sensor-based sorting*, com a comprovação da de sua viabilidade na separação seletiva dos minérios portadores de ETR, para mitigar impactos ambientais evitando operações com grandes massas, reduzindo o consumo da matriz energética, consumo de água, e ainda colocando os minérios deletérios (Th+U) fora do processo fazendo com que seja parte do rejeito.

O maior desafio para a tecnologia de *sensor-based sorting* está relacionado com a possibilidade em detectar minérios que sejam portadores de ETR. Tomando esta informação como a problemática básica para este trabalho, ainda sim, seria uma inovação para o setor mineral apresentar a tecnologia como uma potencial ferramenta que possibilita evitar minérios deletérios e estéril na massa dos minérios portadores de ETR usando sensor de imagem CCD ou DE-XRT.

A China hoje é o maior produtor e consumidor dos óxidos de terras raras, dominando os processos de exploração, beneficiamento e área comercial (Petter, 2015). Entretanto, as reservas de ETR estão razoavelmente bem distribuída globalmente e assim como o Brasil, Austrália, Rússia, entre outros possuem grande quantidade dessas reservas (Andrade, 2014).

O aquecimento desse mercado despertou o Brasil, nas duas últimas décadas, para exploração dos ETR, fundamentado em dois argumentos: o primeiro está sustentado na descoberta de uma reserva de  $22.000 \cdot 10^3$  t de óxidos de terras raras lavráveis, quando comparada com a maior reserva lavrável na China que é de aproximadamente  $55.000 \cdot 10^3$  t; o

segundo está sustentado no fato da maior reserva de ETR pesadas estarem no Brasil (Garcia, 2013; Andrade, 2014).

Estrategicamente a mina de Pitinga explora seu minério na Jazida do Granito Madeira, em uma região onde os eventos geológicos concatenaram para formar rochas, datada entre 1,96 a 1,08 Ga, que as classificam como um depósito polimetálico único no mundo e rico em minérios pesados como a Cassiterita (Sn) disseminada na rocha sã, o pirocloro e a columbita ((Nb, Ta) que são tidos como *by-products* e a criolita  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  (F), gagarinita (Y) associadas à xenotima que é portadora de ETR, zircão (Zr e U), torita (Th) e polilitionita (Li), formando um aglomerado de clastos que são vistos como potenciais *by-products* (Bastos Neto *et al.*, 2005; Costa, 2010).

Comumente os métodos de pré-concentração gravimétrica usam equipamentos como jig, espirais concentradoras, mesa oscilatória (vibratória), concentrador centrífugo (Cui, 2015), ou sendo mais específico, podem ser usados concentrador Knelson e/ou mesa Mozley em operações semi-contínua, que sozinhas, devido a complexidade mineralógica, esses equipamentos não conseguem obter teores satisfatórios de ETR nesta fase de operação (Krishnamurthy & Gupta, 2016).

Por esta razão, autores apontam a necessidade de combinar equipamentos de separação magnéticas e etapas de flotação nos estágios seguintes, a fim de remover a ganga ultra fina. Uma aplicação simples dos equipamentos de pré-concentração gravimétrica para minérios portadores de ETR foi adotado pela mina de Banaya Obo na China cuja recente publicação mostra que essas tecnologias ainda são muito empregadas (Zhi Li & Yang, 2016). Para esse mesmo fim o uso de tecnologias de sensores, se comprovada sua afinidade, permitirá fazer uma pré-classificação seletiva, permitindo a obtenção dos teores mais ricos ou simplesmente eliminará o estéril que alimentaria a planta de beneficiamento (Veras *et al.*, 2018).

Atualmente o Laboratório de Processamento Mineral da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPROM-UFRGS) é a única instituição em toda América que possui a tecnologia, em escala de laboratório, certificada pela PRORAD e pelo CNEN para trabalhar com minérios portadores de ETR que apontem presença de minérios deletérios.

## 1.1. OBJETIVO

Através do uso de tecnologia da *sensor-based sorting* (SBS), busca-se atingir o seguinte objetivo.

Avaliar a afinidade do sensor de imagem CCD e de DE-XRT para detecção e/ou separar rochas portadoras de elementos de terras raras presente no mineral de xenotima que está disseminada e comparar com a detecção de rochas polimetálicas, estéril e ou portadora de minérios deletérios.

### 1.1.1. Objetivos específicos

- Verificar se o sensor CCD de imagem consegue detectar e/ou separar minérios portadores de ETR dos minérios polimetálicos e estéreis.
- Avaliar os níveis de comprimentos de ondas das cores RGB para separabilidade das partículas portadoras de ETR.
- Verificar a síntese de detectabilidade/separabilidade com o sensor de *Dual Energy – Xray Transmission* (DE-XRT) para os minérios portadores de ETR.
- Avaliar os níveis de DE-XRT com a densidade do material submetido aos testes.
- Avaliar a tecnologia de sensor-based sorting como potencial ferramenta para separar minérios portadores dos elementos de terras raras.
- Comparar os dados de caracterização de química multielementar, petrográfica e de picnometria a gás como indicador de afinidade do sensor de DE-XRT na detecção de clastos portadores de ETR.

Para discorrer sobre o estudo em tela, este trabalho se estrutura em seções que contemplam o referencial teórico, cuja finalidade sustenta a fundamentação literária para o estudo; metodologia, que expõe os procedimentos e modelos das práticas abordadas para os testes realizados em laboratório; resultados e discussões, que expõe todos os valores dos testes bem como as argumentações dos desfechos; conclusão, onde o desfecho resume os resultados mais relevantes; e, as referências usadas para elaboração e desenvolvimento do trabalho. Ainda há também os apêndices e anexo para consolidar os dados da pesquisa.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. TERRAS RARAS

A descoberta das terras raras foi um tanto quanto curiosa e acidental, foi na pedreira do Vilarejo de Ytterby, pertencente ao município de Vaxholm, que fica na ilha sueca, no arquipélago de Estocolmo, quando o astrônomo, físico, teólogo e professor da Universidade de Turku, Johan Gadolin, um finlandês, encontrou uma rocha negra em 1788 que somente após 6 anos, em 1794, foi identificada como um novo tipo de terra (Klinger, 2015).

A etimologia da palavra “Rara” surgiu em decorrência da, como a própria palavra diz, raridade, dificuldade do processo de separação, a existência de poucas ocorrências dos elementos, e estarem sempre disseminados em minerais oriundos da Escandinávia. Descobriu-se então que esses elementos teriam propriedades similares, e por ser de difícil separação, os processos resultavam apenas na obtenção de óxidos metálicos sendo denominados de “Terras” pelos químicos da época, e não demorou para aplicarem o termo Terras Raras que ainda é usado atualmente (Dinali, 2014; Klinger, 2015).

A *International Union of Pure and Applied Chemistry* classifica esses elementos como metais de terras raras (MTR) ou elementos terras raras (ETR), são os elementos do 6º período (lantânídeos) e dos 4º e 5º períodos da família IIIB da tabela periódica, cujos números atômicos (Z) variam entre 57 ao 71 para os lantânídeos, 21 e 39 para o escândio e ítrio (Connelly *et al.*, 2005). Totalizando 17 elementos estão os metais de transição como escândio (Sc) e ítrio (Y), este último considerado um elemento pesado, e os lantânídeos cuja classificação está nos tópicos abaixo (Connelly *et al.*, 2005; Lima, 2012; Martins & Lima, 2014):

- ETR leves – lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr) e neodímio (Nd);
- ETR médios – promécio (Pr), samário (Sm), európio (Eu) e gadolínio (Gd);
- ETR pesados – térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e lutécio (Lu).

Entretanto, hoje a maioria dos pesquisadores considera esta classificação apenas como sendo terras raras leves, que compreendem os elementos químicos do La ao Eu, e pesadas, que além do Y retoma do Gd ao Lu, para os lantânídeos (Serra, 2011; Sousa Filho & Serra, 2014; Takehara *et al.*, 2016).

O uso e aplicações dos óxidos de terras raras se deram por volta dos anos de 1950 com pouca aplicabilidade até meados de 1965, que a partir daí, houve o aumento da produção. Suas

aplicações se deram em tecnologias mais sensíveis como revestimento de cátodos em tubos de raios-x, computadores, monitores, e atualmente são aplicados em quase todos os segmentos de tecnologias finas, desde fibras óticas, telas de cristais líquidos, periféricos de veículos, celulares e outros (Haxel *et al.*, 2002).

A crescente demanda para o consumo das terras raras, nos últimos 15 anos, aumentou três vezes introduzindo esses elementos no mercado com a finalidade de melhorar a qualidade ou desempenho de novas tecnologias. Como exemplo pode-se citar que os veículos atuais, exceto os elétricos, contêm 33 componentes periféricos que usam elementos de terras raras como ligas metálicas para a finalidade de obter melhorias tecnológicas, desempenho, redução de dimensões e/ou massa em suas fabricações (Lapido-Loreiro, 2013; Zepf, 2016).

Em um estudo mais recente, uma dissertação de mestrado (Petter, 2015) que teve foco na análise de risco, com avaliação técnica econômica para as terras raras mostrou que a China, ao perceber o potencial para o mercado de terras raras, sai a frente nos processos de exploração, beneficiando a área comercial, aproveitando-se das maiores reservas de minérios portadores de terras raras (Andrade, 2014). Acompanhando esse aquecimento de mercado, as políticas internas do Brasil, nas duas últimas décadas, vem de encontro com a visão chinesa sobre a exploração dos ETR fundamentado em dois argumentos: o primeiro está sustentado na descoberta de uma reserva de  $22.000.10^3$  t de óxidos de terras raras lavráveis quando comparada com a maior reserva lavrável na China que é de aproximadamente  $55.000 \times 10^3$  t; o segundo se ampara no fato da maior reserva de ETR pesadas estar no Brasil (Garcia, 2013; Andrade, 2014).

### **3.1.1. Minérios de terras raras e suas aplicações**

Os elementos de terras raras são mais frequentes em minerais como bastnasita, monazita, xenotima e argilas com ETR adsorvidas para obtenção mais fácil destes elementos. Em seu último estudo publicado, a *United State Geological Survey*, mostrou que há 84 espécies minerais conhecidas que fazem parte dos elementos de terras raras e cujos nomes podem ser vistos no Apêndice A (Orris & Grauch, 2002).

Segundo o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) os minérios de terras raras ocorrem em depósitos carbonatíticos, complexos alcalinos, pegmatíticos alcalinos, riólitos, granitos, granitos pegmatíticos, lateritas, areias pesadas em Serra Verde/Goiás e sudeste e argilas iônicas no sudeste da China foram registradas até 2014 e tendo consolidado 30 projetos em operação no mundo (Orris & Grauch, 2002). Mais recente a *Technology Metals Research* (TMR), fundada em 2010, para ajudar organizações a obterem informações das

*commodities* de terras raras, em seu último levantamento em 2015, registrou 64 projetos de terras raras que tiveram avanços sob responsabilidade de operação em 39 áreas localizadas em 17 países (Lifton & Hatch, 2015). As informações dos projetos, localização, empresas, teores e valores da cesta de terras raras podem ser vistas no Apêndice B.

O primeiro uso industrial das terras raras foi, provavelmente, em meados de 1900 pela companhia *Carl Auer von Welsbach* na produção de lâmpadas elétricas usando elementos de neodímio, praseodímio, itérbio e lutécio, retiradas de areias pesadas, aplicadas como ligas metálicas para aumentar a sua durabilidade (Zepf, 2016). O período pós-segunda guerra, proporcionou novas descobertas científicas e tecnológicas mostrando as TR como potencial elemento que ajudaria a melhorar as propriedades mecânicas, físicas, óticas, química, elétricas, entre outras em produtos diversos e *high-tech* (Humphries, 2013).

Alguns estudos realizados mostram que o uso estratégico e de investimentos na produção de terras raras na Coreia, mostram que a necessidade de consumo e demanda desses metais são crescentes, tendo suas aplicações ramificadas em todos os setores de produção tecnológica, desde produtos domésticos, baterias, veículos, computadores e celulares assim como na indústria espacial (Kim *et al.*, 2013; Petter, 2015). Sob outra perspectiva mais recente, as TR são consideradas indispensáveis ou pelo menos necessárias para serem aplicadas em altas tecnologias, produtos de estilo de vida ou em produtos que garantem a transição para novos produtos que garantam baixa emissão de carbono e maximização do consumo energético (Romero & McCord, 2012; Petter, 2015; Zepf, 2016). Uma lista discriminando o uso industrial, as aplicações e a funções dos elementos de TR, como o metal ou ligas para otimizar tecnologias podem ser consultadas na tabela adaptada no Apêndice C.

## 2.2. DEPÓSITO E GEOLOGIA DE PITINGA

Em geral, a maioria dos depósitos de minérios portadores dos elementos de terras raras (ETR) ocorre amplamente em rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares cuja concentração de seus elementos estão intrinsecamente influenciadas pelo enriquecimento do magma ou pelos fluidos hidrotermais, onde podem ser classificados em depósito primário e secundário (Walters & Lusty, 2011; Jaireth *et al.*, 2014).

Como contra ponto, alguns autores preferem classificar os depósitos das TR como magmáticos que se dividem em carbonatitos, rocha ígneas alcalinas, pegmatíticos, ferro hidrotermais portadores de TR e rochas intrusivas alcalinas; depósitos de TR particulares que dependem da estrutura, que em particular, ocorrem em forma de veios; e, os depósitos

sedimentares compreendendo minérios de aluvião/matéria residual, em complexos alcalinos ou pegmatíticos comumente presente em depósitos de bauxita, aluviões costeiros, fosforitos, argilas iônicas pesadas e carvão mineral, portadores de ETR (Oliveira & Inverno, 2014; Jaireth *et al.*, 2014).

Tomada como um caso particular, a mina de Pitinga, pertence à Mineração Taboca, com sede lograda em São Paulo, foi adquirida e gerida desde 2008 pelo Grupo peruano Minsur, tendo o estanho como principal produto resultante do beneficiamento metalúrgico. Pitinga está localizada à aproximadamente 324 km da cidade de Manaus/AM, ao norte com coordenadas centrais 0°47'20"S e 60°07'35"W. Em síntese, as informações disponíveis na página institucional da Mineração Taboca permitem resumir que o concentrado da cassiterita, oriundo da mina de Pitinga, é a principal matéria prima usada para obtenção do estanho (Sn) refinado (99,9% de pureza) e a liga ferro, nióbio e tântalo (FeNbTa).

Estrategicamente a mina de Pitinga explora seu minério na Jazida do Granito Madeira em uma região onde os eventos geológicos concatenaram para formar rochas datadas entre 1,96 a 1,08 Ga, que as classificam como um depósito polimetálico único no mundo e rico em minérios pesados como a Cassiterita (Sn) disseminada na rocha sã, o pirocloro e a columbita ((Nb, Ta) que são tidos como *by-products* e a criolita Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> (F), gagarinita (Y) associadas à xenotima que é portadora de ETR, zircão (Zr e U), torita (Th) e polilitionita (Li), formando um aglomerado de clastos, que são tomados como potenciais produtos (Bastos Neto *et al.*, 2005; Costa, 2010).

O termo mina de Pitinga é usado para designar o complexo de mineração, que originou as amostras usadas neste estudo. É o principal produtor de estanho no Brasil, e compreende: (1) depósitos aluviais explorados desde a década de 1980, agora quase esgotados; (2) greisens, explorada entre os anos de 1990 e 2000; e (3) o depósito da Madeira, que é o foco deste trabalho e atualmente é explorado para Sn, Nb e Ta.

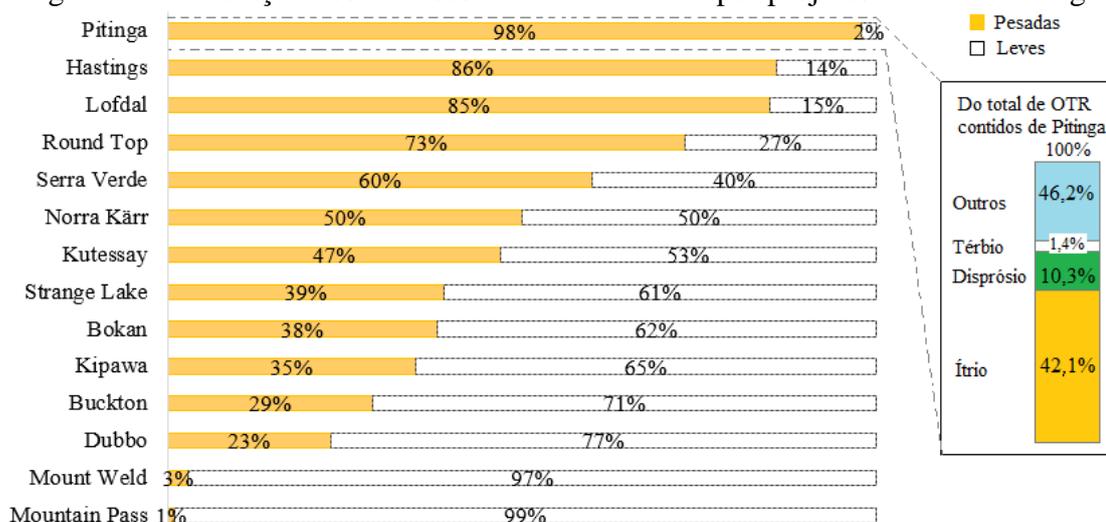
A descrição detalhada do depósito da Madeira, foi fornecida por (Bastos Neto *et al.*, 2005; Bastos Neto *et al.*, 2010). A mineralização é bastante homogeneamente disseminada em um granito enriquecido com albita. O depósito tem 164 Mt com teor de 0,17% de Sn (cassiterita), 0,20% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,024% de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (ambos em pirocloro e columbita), ETR e Y (xenotima e gagarinita), flúor (criolita), Zr e Hf (zircão), Th (torita), U (U-Pb-pirocloro e zircão) e Li (polilitionita) são subprodutos potenciais disseminado no minério (Bastos Neto *et al.*, 2014; Bastos Neto *et al.*, 2010).

A mineralização dos ETR foi estudada por Pires (2010) e Bastos Neto *et al.* (2014). O teor médio de ETR e Y no minério disseminado (isto é, o granito enriquecido com albita) é de 0,17% de ETR+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Além disso, dentro do granito enriquecido com albita há alguns pegmatitos comumente com xenotima de até 1 mm de espessura e até 10 mm de comprimento, (Stolnik, 2015), cujo teor é de ~2% ETR+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, atualmente lavrado indistintamente com o granito enriquecido com albita que poderia ser explorada por meio de mineração seletiva.

A xenotima notavelmente é o principal mineral portador dos ETR no granito enriquecido com albita ou nos pegmatitos. No final também ocorrem algumas quantidades de gagarinita-(Y) pobre em ETR e fluocerita rara-(Ce) (Paludo, 2015). A xenotima de Pitinga foi estudada em detalhe por (Bastos Neto *et al.*, 2014). Uma composição representativa no que diz respeito ao teor de ETR pesadas é: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (24,5%); Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4,2%); Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,7%); Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,5%); Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14,5); Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16,10%); Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,75%); e os ETR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> leves [ETRL] (0,30%).

O teor de ETRL é muito baixo ou praticamente ausente porque os parâmetros de célula *a* e *c* são significativamente encurtados devido à presença de F na estrutura mineral. Consequentemente, a xenotima de Pitinga aceita apenas os ETR com os menores raios iônicos (ou seja, o ETRP e o Y). O material apresentado pela Mineração Taboca no IV Simpósio Brasileiro de Terras Raras tem revelado que o depósito de Pitinga ocupa uma posição privilegiada quanto a concentração de recursos minerais em elementos pesados de terras raras (Taboca, 2017), onde a imagem da Figura 1. Ilustra a comparação dos projetos em razão da disponibilidade de seus recursos de ETRL e ETRP.

Figura 1. Distribuição dos recursos de ETRL e ETRP por projetos incluindo Pitinga.

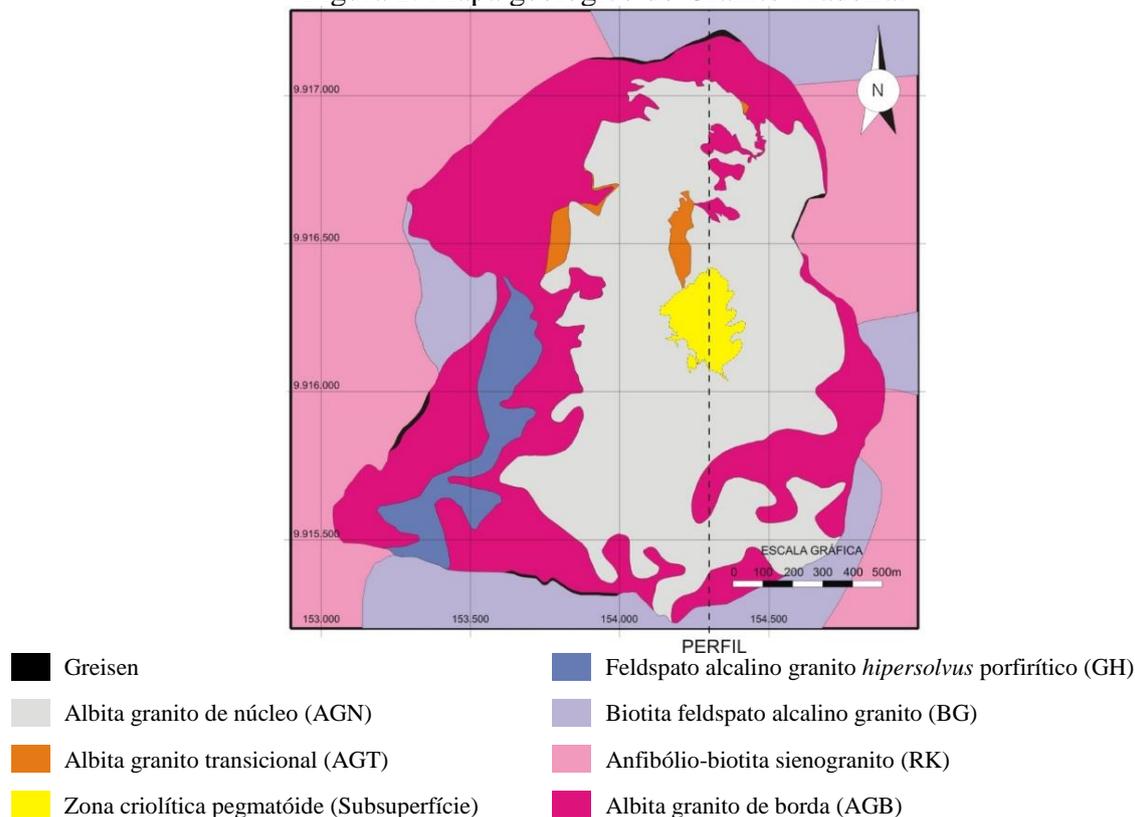


Fonte: adaptado de Taboca, 2017 e Antoniassi, 2017

A waimirita-(Y) (Bastos Neto *et al.*, 2014) é o novo mineral de Pitinga extremamente raro. Outros minerais com ETR comuns, como monazita, torbastnasita, bastnasita, parasita, etc., nunca foram encontrados em Pitinga. Por outro lado, no granito enriquecido com albita, assim como nos pegmatitos, existem minerais que são portadores de ETR+Y, como o pirocloro e a torita, mas não possuem alto conteúdo de ETR. Os cristais de pirocloros tem até 3,49% de  $Ce_2O_3$ , até 0,91% de  $La_2O_3$  e até 0,30% de  $Y_2O_3$ , outros ETR não foram detectados (Minuzzi *et al.*, 2006). A torita do granito enriquecido com albita geralmente possui ~1% de  $Y_2O_3$  e <1% de  $ETR_2O_3$ . A Torita dos pegmatitos tem ~3% em  $Y_2O_3$  e ~3% de  $ETR_2O_3$  (Hadlich *et al.*, submetido).

Essas mineralizações entendidas pela composição, morfologia e estrutura do depósito, têm uma superfície de 60 km<sup>2</sup> composta por diferente fácies, sendo classificadas pelos autores como fácies de rochas associadas a greisen, albita granito transicional (AGT), albita granito de borda (AGB), albita granito de núcleo (AGN), feldspato alcalino granito *hipersolvus* porfirítico (GH), biotita feldspato alcalino granito (BG) e anfibólio-biotita sienogranito (RK) (Bastos Neto *et al.*, 2005; Costa, 2010; Bastos Neto *et al.*, 2014). O mapa geológico ilustrado na Figura 2 constitui as regiões das fácies onde as mineralizações no depósito de Pitinga, citadas no parágrafo anterior, são formadas.

Figura 2. Mapa geológico do Granito Madeira.



Fonte: adaptado de Costi *et al.*, 2000 e Costa, 2010

Dentro dessas complexidades de espécies minerais a variedade de minérios no depósito de Pitinga possibilita um leque de produtos comercializáveis, já citado nesta seção, onde há presença sistêmica de tório (torita) e urânio (zircão) no albita granito (Costi *et al.*, 2000), da torita nos pegmatitos (Pires, 2010; Alves *et al.*, 2018) e os pré-concentrados de minerais de ETR apresentam composição mineralógica que foi determinada por DRX/método de Rietveld, com 1,8 a 2,8% (Neumann & Barreto, 2013). Por tanto, é importante frisar que não há estudos que comprovem riscos à saúde humana no depósito de Pitinga.

Alinhado com a proposta da Taboca os estágios de concentração usados em Pitinga, cuja finalidade já foi anteriormente citada, mostra que a usina faz parte do cenário para exploração de óxidos de terras raras. Atualmente os estágios de beneficiamento consistem em britagem, moagem, concentração gravimétrica, secagem e concentração magnética (Veras *et al.*, 2018) não contemplando estágios dedicados à obtenção de ETR, Th e/ou U.

A mina de Pitinga é vista com potencial, como parte da cadeia produtiva de terras raras, cujas pesquisas têm mostrado que há 164 milhões de toneladas de reserva de minério, onde uma caracterização dela realizada em trabalhos acadêmicos, mostrou que deste grande valor, os teores de óxido de ítrio ( $Y_2O_3$ ) variam entre 0,2 a 0,7%, e outros óxidos de ETR variam de 19,32 a 44,95% (Stolnik, 2015) constando uma reserva estimada de 20 milhões de toneladas (Lapido-Loreiro, 2013). Alinhado a estes dados, estudos tem mostrados que, a possibilidade de gerar pré-concentrados dos óxidos de ETR usando tecnologia de *sensor-based sorting*, permite maximizar a pré-concentração de partículas grosseiras com forte capacidade para transportar esses óxidos (Murphy *et al.*, 2012).

### 2.3. PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS PORTADORES DE TERRAS RARAS

Os estágios de pré-concentração tradicionais ou conservadores tomam os equipamentos de beneficiamento gravimétrico para remover uma quantidade de material indesejado de uma massa global ou pode ser também entendido como uma etapa de enriquecimento. Para os minérios portadores de terras raras estes estágios se encarregam em remover materiais deletérios no processo, cujo corte granulométrico configurado nos equipamentos é de 2 mm, aumentando a densidade de polpa (Burt, 1984).

Em termos de equipamentos empregados na pré-concentração dos minérios de ETR, já fora apontado por Jordens *et al.*, (2013) e Suli *et al.*, (2017) em uma revisão de beneficiamento dos minérios portadores de terras raras, que além dos estágios de redução e gravimetria sempre se usam estágios de separação magnética, eletrostática e flotação. Os autores enfatizam também

que estas são as mesmas técnicas empregadas na concentração de aréias pesadas, pois as massas específicas são muito semelhantes (entre 4 e 7 g/cm<sup>3</sup>).

Dentre os métodos de pré-concentração gravimétrica, podem ser usados equipamentos de jig, espirais concentradoras, mesa oscilatória (vibratória), concentrador centrífugo (Cui, 2015), ou sendo mais específico, podem ser usados concentrador Knelson e/ou mesa Mozley em operações semi-contínua, que sozinhas, devido a complexidade mineralógica, esses equipamentos não conseguem obter teores satisfatórios de ETR nesta fase de operação (Krishnamurthy & Gupta, 2016). Por esta razão, autores também apontam a necessidade de combinar equipamentos de separação magnéticas e etapas de flotação nos estágios seguintes, como citado no parágrafo anterior, a fim de remover a ganga ultra fina. Uma aplicação simples dos equipmanetos de pré-concentração gravimétrica na mina de ETR de Banaya Obo na China foram publicados recentemente mostrando que essas tecnologias ainda são muito empregadas (Zhi Li & Yang, 2016).

Atualmente, existem alguns estudos que apontam as tecnologias emergentes, como os sensores de imagens (óptico) ou de raios-x na pré-concentração de minérios, tais como minérios de ferro, zinco e dolomita, (Veras *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2017). Adjacente a estes estudos, atualmente investiga-se a possibilidade de usar a tecnologia de *sensor-based sorting* (SBS) assistida por sensor de raios-x e infra-vermelho para detectar minérios pesados ou metálicos como Au, Ag, Pb, Ni, W, Fe, Cu, ou seja, em geral minerais metálicos (Wotruba & Riedel, 2005; Neubert *et al.*, 2013). Ultimamente o foco está voltado para investigar a afinidade do sensor de raios-x na detecção de minérios portadores de terras raras, em particular a xenotima com amostras artificiais (Neubert & Wotruba, 2017).

## 2.4. TECNOLOGIA DE SENSOR-BASED SORTING

### 3.4.1. História da tecnologia SBS

Historicamente, a classificação manual é conhecida como a prática de beneficiamento mais antiga, tendo registros desde a civilização egípcias, grega e romana cujos métodos ainda regem as mesmas técnicas praticadas atualmente (Gill, 1991; Revuelta, 2018) Em 1556, a Agricola relatou o processo de pré-concentração por classificação manual em mesa, como ilustra a Figura 3-a, onde 353 anos depois, a mesma técnica foi registrada na Figura 3-b, sob uma esteira no início das operações da Cominco na Mina Sullivan (zinco, chumbo e ferro), em British Columbia no Canadá em 1909 (Wills, 2016).

Figura 3. Classificação por separação manual em mesa registrado por Agricola em 1556 (a) e sob esteira na Mina Sullivan no Canadá em 1915 (b).



(a)

Fonte: Agricola, (1556)



(b)

Fonte: Wills, (2016)

Com os avanços tecnológicos, esses processos têm agregado métodos para melhorarem os rendimentos das operações, como foi citado por Young (2017) *Apud* Handy (1918), onde, só a implementação de equipamentos de moagem contribuem para o beneficiamento, então passa a gerar mais economia e eficiência aos processos metalúrgicos do que a classificação manual.

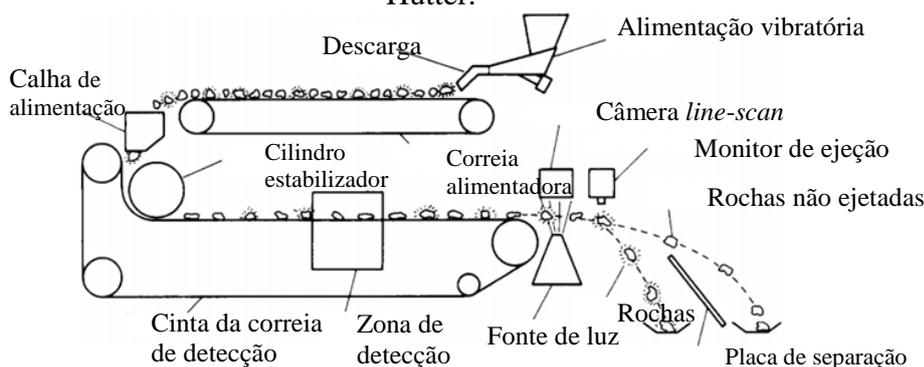
Esses avanços tecnológicos e seus melhoramentos nos equipamentos de beneficiamento de minérios, desde o surgimento da eletricidade, vem em constante evolução até os dias atuais. Mesmo sendo conhecida como uma tecnologia inovadora no setor da mineração, o *sensor-based sorting* não é tão novo quanto parece, pois seu primeiro título é dado à Madame Curie, que possivelmente criou o primeiro classificador de batatas assistido por sensor raios-x (Salter & Wyatt, 1991).

Embora o *sensor-based sorting* (SBS), no cenário atual, tenha sua aplicação muito estudada nos processos de beneficiamento de minérios, o uso desta tecnologia já estava estabelecido em várias aplicações na classificação de alimentos na indústria farmacêutica e de reciclagem desde a década de 1940 (Salter & Wyatt, 1991).

Lapointe e Wilmot (1952) assim como Bettens e Lapointe (1955), apresentaram a primeira tecnologia de SBS na década de 1940, dedicada a classificação automatizada para rochas, com o equipamento desenvolvido e implantado no Canadá, usando fonte radiométrica. A tecnologia de Lapoint foi usada para pré-concentrar minério de urânio na África do Sul, Namíbia, Austrália e Canadá. Então, somente no final da década de 1960 e início dos anos 1970, o mesmo princípio de atenuação de raios-x, usado para batatas, reapareceu em um classificador automatizado para classificar carvão/rejeito (Jenkinson *et al.*, 1971).

O *sorting machine* assistido por sensor monocromático e fotocromático baseado em diferentes características de reflectância da luz estava sendo desenvolvido, na Inglaterra em 1950, paralelamente ao *sorting machine* assistido por sensor de raios-x de baixa energia (Newman & Whelan, 1952). Sete anos mais tarde, Kelly e Hutter (K+H) desenvolveram o primeiro *automatic sorting*, usando um sensor de cor fotométrica, e registraram a primeira patente do Modelo 6 (M6) (Colborne, 1963; Wills, 2016). Posteriormente, o *sorting* M6 foi instalado na mina de Mary Kathleen, de *uranium*, na Austrália em 1950. Já na mina de ouro do grupo Gold Fields, juntamente com o projeto Rio Tinto-Zinco, em 1966, na África do Sul foi usado o modelo M12-*Sorter*. Na mina de *Doornfontein Gold* na África do Sul em 1972 já usou-se o modelo M13-*Sorter* de Kelly e Hutter (Salter & Wyatt, 1991). A companhia de Kelly e Hutter desenvolveram o *sorter machine* até o modelo M17-*Sorter* cujo *layout* do equipamento está ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Layout do último modelo de equipamento M17-*Sorter Machine* criado por Kelly e Hutter.



Fonte: adaptado de Salter e Wyatt, 1991

Apenas nos anos 1980, com os avanços da computação, possivelmente o Gunson's Sortex MP80 foi possivelmente o primeiro equipamento de *sorting* que podia separar minérios com partículas entre 2 a 150 mm com uma taxa de alimentação de  $300 \text{ ton}\cdot\text{h}^{-1}$  com velocidade da correia operando entre  $2$  a  $5 \text{ ms}^{-1}$  com largura entre 0,8 a 1,2 m, usando o *scan laser* com sinal de 4k vezes/seg, o tempo de análise era de  $0,25\mu\text{s}$ , usando bicos ejetores de ar para rejeitar as partículas a uma velocidade menor que 1 m/s (Wills, 2016).

No mesmo interstício, em 1981, a *Outokumpu Development Precon* avançou e aprimorou seu *automatic sorting*, que foi instalado na mina de Hammaslahti (cobre e zinco), na Finlândia criando, posteriormente, uma gama de protótipos até recessão industrial que concatenou para o desaparecimento de seus equipamentos (Kennedy, 1985).

Após os anos 1980 e início dos anos 1990, o equipamento de *sorting* foi usado em quase todos os continentes, a fim de pré-concentrar minerais metálicos, não metálicos, minerais

industriais e gemas, podendo ter entrado em operação um total de aproximadamente 35 equipamentos (Salter & Wyatt, 1991). Na Tabela 1 estão disponíveis as localizações de continentes onde a tecnologia de *sorting* entrou em operação no início dos anos 90, evidenciando o número de equipamentos e a qual minério foi destinada sua aplicação nos processos de minérios.

Tabela 1. Uso dos equipamentos de *sorting* nos anos 90 para mineração.

Continente	Nº de equipamentos ativos	Operação
África	< 8	Classificação de vários tipos de rochas
América do sul	0	Não consta
Austrália	0	Não consta
Asia	1	Operação para minério de cobre
América do Norte	< 3	Calcário
Europa	< 12	Minérios de calcário e magnesita
Ex-USSR	5	Classificação de vários tipos de rochas

Fonte: adaptado de Salter & Wyatt, 1991

Atualmente, são conhecidas mais de onze empresas que fabricam e comercializam os equipamentos de *sorting*, sendo a maioria de pequeno porte, são especializadas em classificação de diamante. A Tabela 2, apresenta informações que evidenciam a posição de cada companhia no mercado e o ano de fundação, nome e onde estas companhia estão situadas, tipos de sensores que usam em suas tecnologias, quais os tipos de mineral/mínérios ou gemas que suas tecnologias estão afinadas para operação e o número de equipamentos em operação espalhadas pelo mundo atualmente (COMEX, 2018).

Tabela 2. Situação do uso dos equipamentos de *sorting* atualmente.

Posição/ ano	Companhia	Sensores	Domínio	Mineral+Minérios+Gemas	Nº de equipamentos ativos
1º/1990	TOMRA Commodas – Ultrasort – Scan&Sort/ Alemanha	VIS NIR XRT Sensor- eletromagnético Laser	Alimentos Reciclagem Mineração	Diamante, esmeralda, rubis, ouro, calcita, calcário Dolomita, feldspato Magnesita, quartzo Terras raras, rochas de sal, talco, carvão e outros minérios energéticos, minérios de ferro, manganês, cromo, cobre, tungstênio, níquel, prata escória de ferro e cromo e não ferrosos.	300
2º/2000	Steinert/ Alemanha	NIR RGB CCD alta resolução XRT NIR RGB	Alimentos Reciclagem Mineração	Vidro, plástico, papel, sucata de ferro, madeira, eletrônicos; Todos os minérios mais carvão e rejeitos da mineração, minerais energéticos e gemas em geral	50
3º/2005	Redwave/ Áustria	CCD alta resolução ED-XRF ID	Alimentos Reciclagem Mineração	Vidro, plástico, papel, sucata de ferro, madeira, eletrônicos; Minérios de: bauxita, cobre, ferro, chumbo, manganês, níquel, zinco, urânio, scheelita, ouro, prata, platina, paládio; calcita / dolomita,	30

Continuação 4°/1995	Mogensen – Allgaier/Alemanha	Sensor óptico NIR XRT SPECIM FX17	Alimentos Reciclagem Mineração	feldspato, magnesita, quartzo, rocha de sal, talco, fosfato; diamantes, topázio, agua marinha, emeraldas, rubis, tanzanita, alexandrita Rochas, rejeitos, carvão, minério de níquel, minérios em geral, plástico, escória e cerâmicos.	200
5°/2005	COMEX – Innovative Industrial Technologies/ Noruega e Polônia	Câmera espectral MWIR VIS NIR XRT VIS UV	Alimentos Reciclagem Mineração	Ferro, carvão, ouro, quartzo e calcário, zinco, manganês.	25
6°/2002	Binder+Co AG/ Áustria	NIR Detecção por indução (IMD) Sensor de fusão	Alimentos Reciclagem Mineração	Vidro, papel, plástico, elétricos eletrônicos, metais, escórias, material de demolição, minério, sal, gemas.	20
Pequena/ 1990	OptoSort GmbH/ Áustria	RGB: sensor de cor HIS – hiperspectral sensor de imagem RGB & HSI – Combinação de sensores	Mineração	Calcário, talco, calcita, rochas de sal, quartzo, fluorita e magnesita.	20
Pequena/-	Pelenque	-	-	-	
Pequena/-	MultiSort	-	-	-	30
Pequena/-	Outras 5	-	-	-	
Pequena/ 1990- 2010	Outras	Cor	Mineração	Especializada em diamante.	100
Conclusão					

Fonte: Comunicação pessoal da COMEX ® (2018) e informações públicas.

No cenário atual, os equipamentos de *sorting* tem sua aplicação voltada primeiramente para separação de calcário, em segunda posição está a separação de quartzo e em terceira posição está a separação de talco usando sensores de imagem (*CCD camera sensor*) ou *Near Infrared (NIR sensor)*, este último sendo o de maior eficiência operacional, *CAPEX (Capital Expenducture)* (COMEX, 2018). Neste contexto, enfatiza-se que os potenciais clientes para aquisição de um *automatic sorting* são empresas com capacidade de produção de *Run of Mine (R.O.M)* igual ou superior a 300k t/p.a (COMEX, 2018).

Atualmente no Brasil estão em operação 10 equipamentos de *sorting*, dos quais, 9 unidades estão instalados em mineradoras e apenas uma está dedicado a classificação de madeira na cidade de Curitiba/PR (COMEX, 2018).

### 3.4.2. Fundamentos da tecnologia de SBS

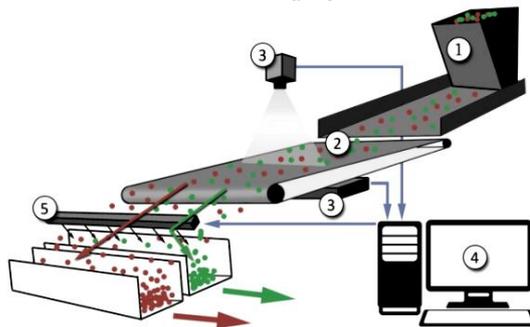
A tecnologia de SBS analisa e classifica as partículas sem ter contato com as propriedades do material, os sensores capturam essas propriedades individualmente de cada partícula para comparar e posteriormente ejetá-las (Knapp *et al.*, 2014). A classificação física ocorre quando o sinal tratado é enviado ao sistema de ejeção, atendendo a informação das leituras, que pode ejetar as partículas detectadas por bicos sopradores a ar comprimido ou sistema mecânico de ejeção (*flap*), (Salter & Wyatt, 1991; Knapp *et al.*, 2014).

A classificação de um dado material usando o SBS ocorre por metodologia primária, cuja interpretação dos dados deve ser clara e atender a quatro interações no processo como (Berwanger & Gaastra, 2014):

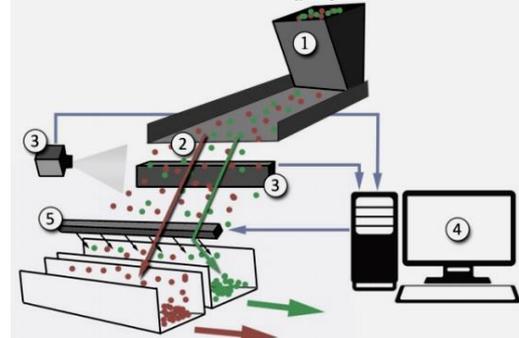
- Apresentação das partículas (alta qualidade, baixa qualidade, rejeito e/ou material contaminante);
- A granulometria deve estar em range granulométrico entre  $>2$  e  $<150$  (mm);
- Durante a operação o range dessas partículas devem atender rigorosamente uma razão de tamanho de 1:3;
- Exposição aos sensores;
- Análise dos dados;
- Separação;

A rigor, os estágios envolvidos na classificação de material com tecnologia SBS depende do tipo de *automatic sorting* empregado, mas ambos devem condicionar o material, transportar, detectar, processar e tratar os dados e separá-los. Uma visão macro ilustra na Figura 5 o *layout* e funcionamento para os dois tipos de *automatic sorting* mais empregado atualmente na indústria (Duffy *et al.*, 2015).

Figura 5. *Layout do automatic sorting tipo esteira e calha.*  
*Automatic Sorting tipo correia*



*Automatic sorting tipo calha*



1. **Condicionamento do material:** adequação granulométrica para alimentação em camada não sobreposta na esteira por calha vibratória;
2. **Apresentação do material:** as partículas, sobre a esteira ou em queda livre, são apresentadas aos sensores;
3. **Detecção:** aquisição de informações indireta das propriedades do material com ou sem combinação de sensores;
4. **Processamento de dados:** análise e tratamento dos dados capturados pelos sensores para cada partícula discriminando o produto do rejeito;
5. **Separação:** aceitação ou rejeição pneumática ou mecânica

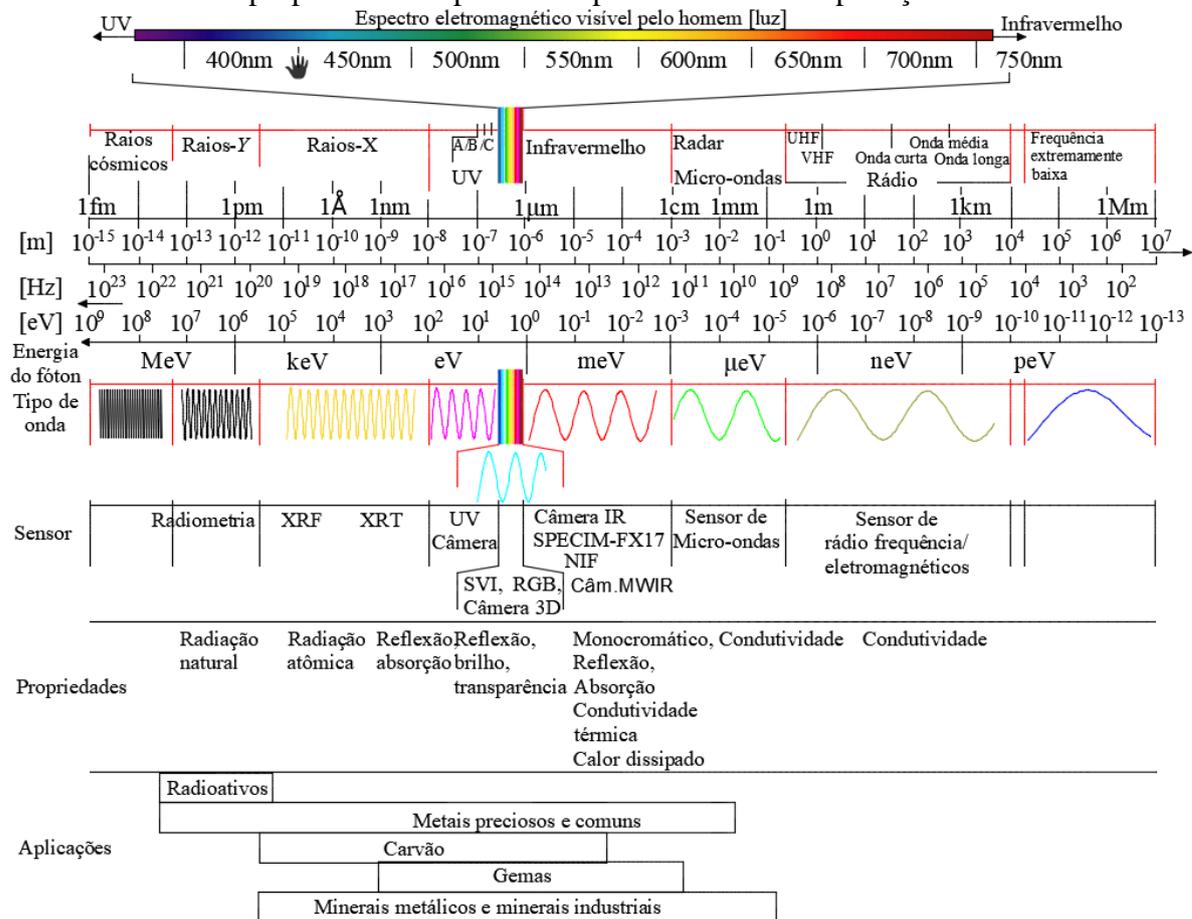
Fonte: adaptado de Duffy *et al.*, 2015

A classificação por meio de SBS ocorre primeiramente pela aquisição ou *scan* de imagens tratadas, para determinar os limites toleráveis das propriedades desejadas do material. Assim, a operação da tecnologia é passiva de inúmeros parâmetros de operação que além da densidade da partícula, podendo existir mais de 30 parâmetros, dependendo do sensor, passivos de estudos que compreendem: o diâmetro, perímetro, centro de massa, momento de inércia, orientação das partículas, fator de alongamento e entre outros, que normalmente são empregados para identificar a forma e o que se deseja visualizar na partícula independente de ter ou não seu grau de liberação atingido bem como estando agregada ou disseminada (COMEX, 2018). Podem também ser utilizadas combinações adicionais destes parâmetros, para distinguir as partículas de interesse. Cada partícula tem uma posição e um tamanho especificado permitindo utilizar o mecanismo de rejeição para separá-las da corrente de material (Wotruba & Riedel, 2005).

Diante de inúmeros parâmetros operacionais, todo o *range* da radiação eletromagnética, que consiste de ondas eletromagnéticas formada pela alternância elétrica perpendicular, pelo campo magnético e pelo tempo (frequência) que teoricamente se estende do zero ao infinito, é o fator de maior relevância para escolha consciente do sensor que explorará corretamente as propriedades das partículas/mineral (Wotruba & Riedel, 2005). Essa radiação se estende desde raios cósmicos (fótons com alta energia) até a ondas de baixa frequência (fótons de menor energia). O trabalho de Lindner (2010) vem sustentar a afirmação de que o uso da tecnologia de SBS só é possível devido a interação eletromagnética, em todos os espectros de ondas que interagem com o minério.

Detalhes do *range* de radiação eletromagnética, ilustrada na Figura 6, evidencia as faixas de comprimento de ondas eletromagnéticas em escala métrica, onde o aumento da frequência em que o espectro de onda trabalha é proporcional a energia do fóton, gerando onda de curto período, assim, quanto mais longo for esse comprimento de onda, maior será o período com menor energia e frequência. Ainda na Figura 6, é possível notar como exemplo a ilustração de cada tipo de onda eletromagnética consoante a seu *range* no espectro eletromagnético, que está diretamente ligado a cada tipo de sensor, e que esses podem ser empregados na indústria mineral consoantes ao tipo de aplicação.

Figura 6. Range do espectro eletromagnético e suas características, tipos de sensores, propriedades exploradas e possibilidades de aplicação.



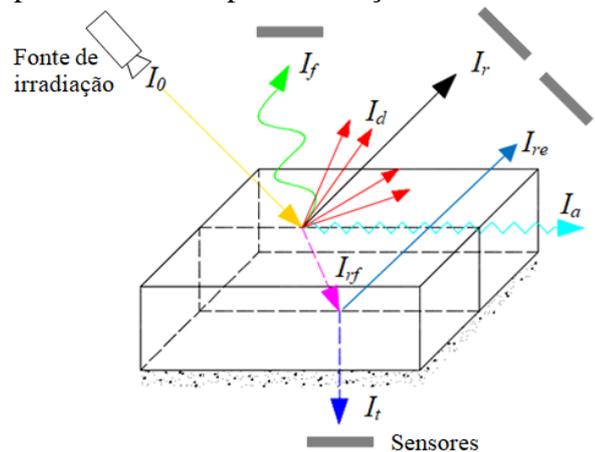
Fonte: adaptado de Ketelhodt & Bergmann, 2010 e Berwanger & Gaastra, 2014

Atualmente, os sistemas de detecção de maior usabilidade na indústria mineral, sugerindo a ordem de relevância, são os sensores de *dual-energy x-ray transmission* (DE-XRT), sensores de imagem e sensores a infravermelho (Veras *et al.*, 2016). A escolha consciente, de cada tipo de sensor está intrinsecamente ligada as características do minério que se deseja rejeitar ou pré-concentrar. Como foi visto na figura acima, a detecção dos minerais radioativos é mais suscetível aos sensores de radiação gama ou radiométricos (RM), os minerais com metais

preciosos são suscetíveis desde os sensores radiométricos até ao infravermelho, para os minerais metálicos e industriais pode-se usar sensores de DE-XRT até o infravermelho e para as gemas comumente se usa sensores de imagem (RGB) podendo usar também raios-x ou infravermelho.

Esta detecção, só é possível, devido a interação de ondas eletromagnéticas que incide nas características do material para gerar diretamente um comprimento de onda específico. (Neubert & Wotruba, 2017). Então, quando uma partícula recebe um espectro de irradiação eletromagnética ( $I_0$ ), a radiação resultante terá comprimento de onda atenuada no material em resposta a um, ou vários, diferentes tipos de radiações como fluorescência ( $I_f$ ), difusão ( $I_d$ ), reflexão ( $I_r$ ), remissão ( $I_{re}$ ) absorção ( $I_a$ ), refração ( $I_{rf}$ ) e transmissão ( $I_t$ ) (Wotruba & Riedel, 2005), cuja ilustração na Figura 7 clarifica está informação.

Figura 7. Comportamento do tipo de radiação incidente em uma superfície.



Fonte: adaptado de Wotruba & Riedel, 2005

Para interpretar os dados adquiridos do material irradiado, os sensores registram a variação da irradiação, resultante ou atenuada, conforme a distribuição espacial por área do material e converte a energia dos fótons em um sinal elétrico, representativo de toda massa global ou de superfície do material, assistido pela interface de *hardwares* e *softwares* que tratam estes sinais e que os convertem em uma escala hierárquica de cor.

As imagens bi ou tri-dimensionais geradas no *software*, possibilita visualizar as diferenças das características ou propriedade equivalentes do material que foi submetido ao *scanning* do sensor (Berwanger & Gaastra, 2014). Tomando como exemplo os resultados de testes realizados pela COMEX (2016), a Figura 8 ilustra o item explicado no parágrafo anterior, onde a aquisição de imagens resultante do *scan* assistido mostra, por sensor de raios-x para minério de ferro-cromo distinguindo o ferro de alta qualidade na cor amarela (1 e 3) e para minério de carvão de boa qualidade na cor laranja (3); fazendo uso do *scan* com sensor de

imagem, a cor preta revela o minério de tungstênio com seu contaminante associado na cor verde (4 e 5).

Figura 8. Imagens obtida por sensor raios-x em minério de ferro-cromo 1,2 e carvão 3, e por sensor de imagem para minério de tungstênio 4,5.



Fonte: COMEX, 2018

Esta seção pode ser resumida pelo *layout* da tecnologia de *sensor-based sorting* da COMEX® com suas funcionalidades detalhadas na Figura 9, cujo desenvolvimento da máquina disponível na Polônia, tem como finalidade permitir trabalhos de caracterização e pré-concentração usando sensores de imagem 3D, DE-XRT, câmera ótica, infravermelho e câmera UV, onde o material faz o percurso sobre a esteira, para ser analisado por sensores que separa as partículas, por meio de atuador mecânico lançando-as na caixa de rejeito (COMEX, 2016).

Figura 9. Tecnologia *Multichannel scanning system* da Comex®.



Fonte: adaptado de Comex, 2016

## 2.5. SENSOR DE IMAGEM CCD

### 3.5.1. Princípio de funcionamento

O comprimento de onda, no espectro eletromagnético visível, está compreendido entre 380 – 740 nm. Os sensores e métodos de leitura que possibilitam compilar imagens visíveis nesta faixa do espectro, usam a tecnologia de luminosidade fotossensitiva que converte a

intensidade de luz visível em um sinal de tensão mensurável dentro de um determinado espaço, com sinal de temporização adequado; a cor emitida é resultante da onda emitida pelo objeto, uma cena pode ser recriada numa série de localizações, segundo a *Comission International de l'Éclairage* (Hols & Lomheim, 2011; Haus, 2010).

O sistema internacional de unidades e medidas (SI) adota a fotometria como uma base para quantificar a emissão do espectro eletromagnético dentro do campo visível emitido por um objeto. As propriedades da onda eletromagnética é quem determinam o maior sinal de energia da luz, possível de ser registrado por um detector cujas unidades e símbolos estão sumarizadas na Tabela 3 (Haus, 2010).

Tabela 3. Propriedade do espectro eletromagnético da luminosidade no campo visível.

Propriedades	Símbolo	Unidade	Característica
Intensidade	$I_v$	1 Candela ( <i>cd</i> )	Quanto maior a fonte de luz, menos brilhoso é o objeto
Fluxo	$\Phi$	1 Lumen ( <i>lm</i> )	Poder da luz percebido pelo olho humano.
Energia	$Q_v$	1 <i>lm.s</i>	Energia da luz percebido pelo olho humano.
Luminescência	$L_v$	1 <i>cd/m<sup>2</sup></i>	Quanto menor a fonte de luz, mais brilhoso é o objeto.
Iluminância	$E_v$	1 Lux ( <i>lx</i> )	Intensidade da luz incidente em uma superfície.
Emissão luminosa	$M_v$	1 Lux ( <i>lx</i> )	Intensidade da luz emitida por uma superfície.
Ângulo da luz sólida	$\Omega$	1 Steradian ( <i>sr</i> )	Ângulo da luz sólida sobre um objeto.

Fonte: Adaptado de Haus, 2010

Assim, assume-se que o fluxo luminoso que incide na superfície de um objeto depende das propriedades acima e pode ser calculado pela Equação 1 e está diretamente dependente ao ângulo sólido da luz que incide no objeto, como expresso na Equação 2.

$$\Phi_{v(lm)} = I_{v(cd)} \cdot \Omega_{sr} \quad (1)$$

$$\Omega_{(sr)} = 2\pi \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right)\right) \quad (2)$$

Dessa maneira, reescrevendo a Equação 2 na Equação 1 pode ser reescrita, temos que na prática, o fluxo luminoso passa a ter relação direta com os seguintes parâmetros: intensidade luminosa, o tempo em 2 pi e ângulo do cosseno da luz em graus, dada pela Equação 3:

$$\Phi_{v(lm)} = I_{v(cd)} \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right)\right) \quad (3)$$

Então para quantificar a intensidade de lumens deve-se considerar a Equação 4.

$$I_{v(cd)} = \Phi_{v(lm)} \cdot \Omega_{sr}^{-1} \quad (4)$$

A interação característica entre essas propriedades da luz produz um estímulo visual em diferentes cores, formadas pela combinação dos parâmetros monocromáticos, sumarizados na Tabela 4, que incidem diretamente nos sensores (Haus, 2010; Berwanger & Mual, 2014). Dessa

maneira uma fonte de luz emitida de um LED (*Light Emitting Diodes*), usadas nas tecnologias de SBS, por apresentar o comprimento de onda no espectro eletromagnéticos entre as regiões próximas do ultravioleta e do infravermelho (Hols & Lomheim, 2011; Ohta, 2008), tem uma radiação com certa quantidade de fótons que transportam uma quantidade de energia, entendida como a energia do fóton ( $E_{Fóton}$ ), expressa pela Equação 5, onde  $k$  é a constante de Plank ( $6,626 \cdot 10^{-34} Js$ ),  $c$  é a velocidade da luz ( $3 \cdot 10^8 m.s^{-1}$ ) e  $\lambda$  é o comprimento de onda (Berwanger & Gaastra, 2014). Na faixa do espectro sensível a visão (450 a 720 nm) a energia de fóton é de 2,85 a 1,9 eV (Yamada, 2006).

Tabela 4. Parâmetros das características de cor RGB para um sensor CCD.

Cor	Comprimento de onda (nm)	Fluxo luminoso ou Potência radiométrica	Eficiência luminosa	Frequência (THz)
Vermelho -R	627	60 lm	60 lm/W	384-482
Verde -G	530	100 lm	30 lm/W	520-610
Azul-B	470	35 lm	12 lm/W	610-659

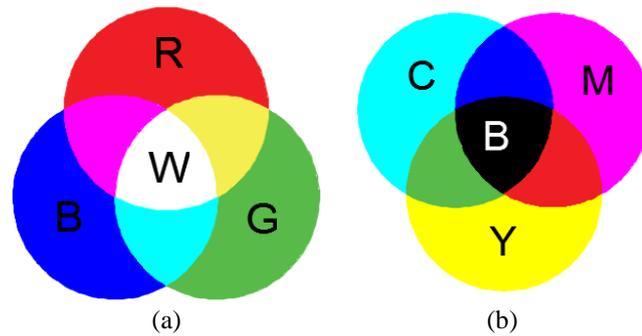
Fonte: Adaptado de Berwanger & Mual, 2014 e Haus, 2010

$$E_{Fóton} = \frac{k \cdot c}{\lambda} \quad (5)$$

De maneira conexa, os capacitores digitais de uma câmera de imagens podem captar os níveis de energia dos fótons e construir o mapa de imagem que pode ser exibida em um *software*, armazenadas e/ou processadas eletronicamente. A vantagem de gerar imagens eletrônicas está na facilidade em tratá-las em computador, assistidas pela capacidade de resolução de um sensor visual de imagem (*Visual Image Sensor-VIS*), para visualizar ou minimizar ruídos incompreensíveis à visão humana (Hols & Lomheim, 2011).

Os padrões de cores mais comuns que conhecemos são as chamadas RGB (*red, green e blue*, em português: vermelho, verde e azul) compreendida como cores primárias cuja ilustração está na Figura 10 em que cada cor pode ser gerada pela combinação de cores comuns. As cores primárias são responsáveis pelo aditivo de cor para um estímulo visual (Berwanger & Mual, 2014). Tão logo, ao somar todas as cores primárias, a cor branca será a resultante direta (ver Figura 10-a), sendo o inverso válido para o ciano (C), magenta (M), amarelo (Y) e preto (B) (ver Figura 10-b), que são cores complementares do RGB, que tem a cor preta como resultado de sua soma (Burger & Berge, 2006; Hols & Lomheim, 2011).

Figura 10. Modelo de cores RGB em (a) e sua cor inversa CYM em (b).



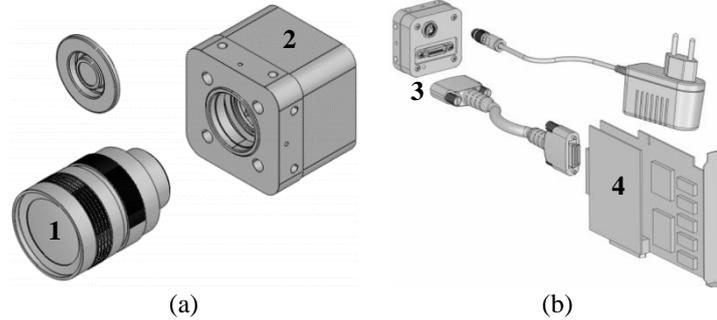
Fonte: Burger & Berge, 2006

Inúmeros sensores de imagem foram criados, até mesmo para certa especificidade de absorção de uma faixa estreita do espectro eletromagnético sensível a visão. Os sensores CCD (*Charge Coupled Device*) são mais usados na tecnologia do SBS, os sensores tipo COMS (*complementary metals-oxide-semiconductor*) é um *up-grade* dos sensores CCD e possuem maior precisão quando se trata da captura de imagens térmicas, atualmente os sensores de imagem espectral de alta sensibilidade, cujas varreduras vai além do espectro eletromagnético sensível a visão (900-1700 nm), estão tendo a maior atenção juntamente com o sensor de imagem *Dual-channel Spectro Image in line* que permite integrar o espectro de imagens térmicas com imagem monocromática (Speim, 2017; MWIR, 2017).

Neste trabalho, o sensor CCD de imagem recebe a atenção por ser objeto de parâmetro no estudo em tela, por tanto aqui se dá o detalhamento dos dispositivos que o constitui. O sensor de imagem CCD foi criado em 1970 por Willard Boyle e George E. Smith cuja nomenclatura dada é sinônimo que traduz à arquitetura de um semicondutor destinado a registrar três funções: a aquisição, transferência e conversão de carga (Hols & Lomheim, 2011).

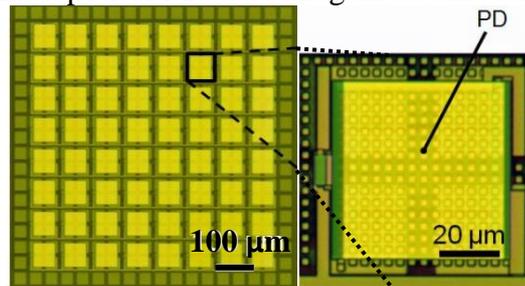
Um sensor de imagem, como ilustrado na Figura 11, é constituído por um conjunto de lentes (filtro, focal e aumento) (1), cujo papel é corrigir distorções, reduzir ruídos cromáticos, orientar a radiação, ampliar etc, responsáveis por projetar a radiação emitida pelo objeto na matriz do sensor (2) (ver Figura 11-a), esta matriz capturar a energia dos fótons (Berwanger & Mual, 2014). Os terminais de transmissão de dados do sensor (3) se conectam ao *Driver* (4), na Figura 11-b, que interpretará os sinais elétrico para serem enviados ao *software* de imagem onde serão tratados (Basler, 2007).

Figura 11. Componentes de uma CCD com lentes (1) e sensor (2) em (a), conexão (3) com *driver* (4) em (b).



Todos os componentes do sensor CCD de imagem tem relevante papel para o trabalho que exerce, mas nos periféricos eletrônicos, no item 2 da Figura 11-a, o capacitor é um *metal-oxide-semiconductor* (MOS), com dimensões de aproximadamente  $100\ \mu\text{m}$  com pontos de detecção (PD) internos de aproximadamente  $20\ \mu\text{m}$ , onde os detalhes podem ser vistos na ilustração da Figura 12 (Yamada, 2006).

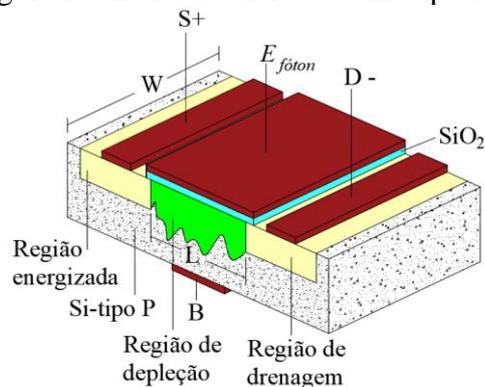
Figura 12. Capacitor MOS de imagem de uma sensor CCD.



Fonte: adaptado de Yamada, 2006 e Basler, 2007

O conceito de capacitor MOS abrange o entendimento de captar, armazenar e transferir elétrons como um sinal de pacote de cargas para um local de armazenamento (Haus, 2010) e seus elementos padrões, para um sensor CCD, foi explicado por Sedra & Smith (2004) conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13. Estrutura física de um capacitor.



Em que:

- A camada ( $E_{fóton}$ ) é um metal condutor que absorve a primeira energia bruta do fóton, o espectro eletromagnético sensível à visão, para a camada de dióxido de silício;
- Uma camada de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) tem a finalidade de ser um isolante e excelente transmissor pontual de energia dos fótons para a camada de Si-tipo P, com espessura que varia entre 2 a 50 nm, esta camada recebe a energia da placa metálica e está, também, em contato com as extremidades da estrutura de (S) e (D);
- Na extremidade esquerda existe uma estrutura (S+) com n-dopagem pesada de metais, coberta por uma camada de metal condutor ligada a uma fonte elétrica de carga positiva que tem a finalidade de repelir as cargas positivas em depleção para o receptor (B) e (D);
- No ponto (D), a estrutura é entendida como uma região de drenagem de carga, que tem a função de drenar a energia remanescente de depleção para o outro capacitor que o conecta.
- O Si-tipo P é uma estrutura dopada, com metais de carga positiva como o In (índio), Bh (boro), P (fósforo) e/ou Ga (gálio), que geram micro furos em seu corpo facilitando a depleção desses metais, gerando energia que será captada pelo receptor (B) e/ou (D);
- O detector metálico na parte inferior (B) está diretamente ligado na estrutura de Si-tipo P, desempenhando a função de detectar e enviar a energia dos íons da depleção para o circuito eletrônico de armazenamento para estocagem estruturada;
- Os parâmetros de distância entre (S) e (D), representado por L, varia entre 0,1 a 3  $\mu\text{m}$  e o comprimento do capacitor, W, pode variar entre 0,2 a 100  $\mu\text{m}$ .

Alinhado com a exposição do mecanismo de detecção da energia do fóton no capacitor, entende-se que a transferência de carga do capacitor para uma matriz de armazenamento ocorre de forma dinâmica, para o escoamento do acúmulo de cargas. Assim, a eficiência de transferência dos pacotes de cargas  $\eta$  elétricas podem ser determinados pela Equação 6 (Yamada, 2006).

$$\eta = \left( \frac{Q_t}{Q_i} \right)^{\frac{1}{N}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Em que:

$Q_i$ : carga do sinal com impulso de entrada;

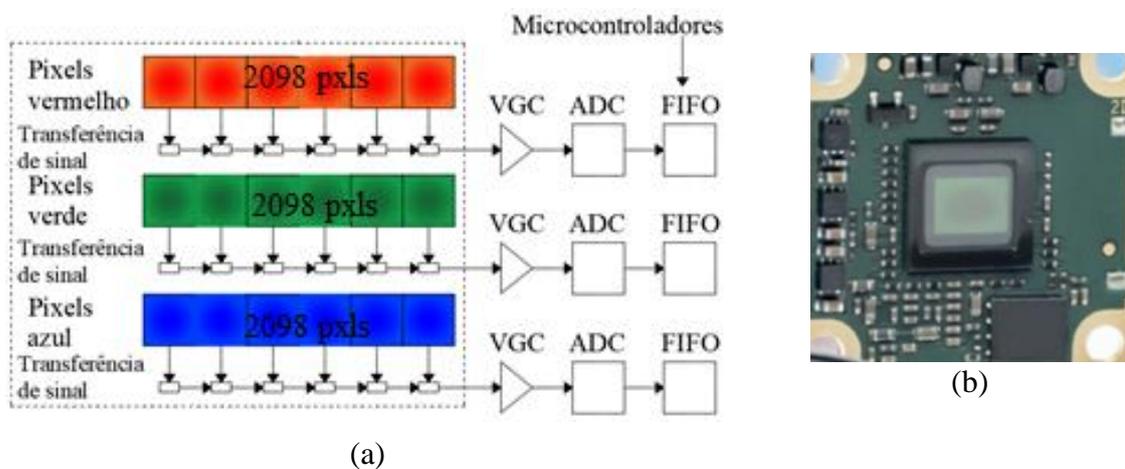
$Q_t$ : transferência de um pacote de carga registrado;

$N$ : número total de estágios de transferência.

Para facilitar o tratamento de aquisição dos dados de uma CCD, o capacitor é estruturado em grupos de três linhas cobertas com filtro correspondente a cada cor de RGB. Assim, a drenagem dos pacotes de sinais das cargas pode ser interpretada dentro de 2098 pixels fotossensíveis por linha (ver Figura 14-a) (Basler, 2007). Neste entendimento a  $E_{fóton}$  de cada cor do RGB é interpretada em pacotes de cargas, convertidas em unidades de eV (Eletronvolts), são amplificadas na unidade de controle de ganho variável-VGC (*Variabel gain control*).

Os dispositivos de conversão análoga digital-ADC (*Analogo-Digital Convertor*), recebe o sinal e digitaliza a cada 10 dígitos binários (bit) na unidade de microcontroladores (Figura 14-b) (Basler, 2007). Dessa maneira, o sinal pode ter uma memória temporária com configuração espacial digitalizada pelos microcontroladores, que registram os primeiros dados das cores de entrada e o pacote de saída FIFO (acrônimo para *first in e first out*) para serem transmitidas ao *driver*.

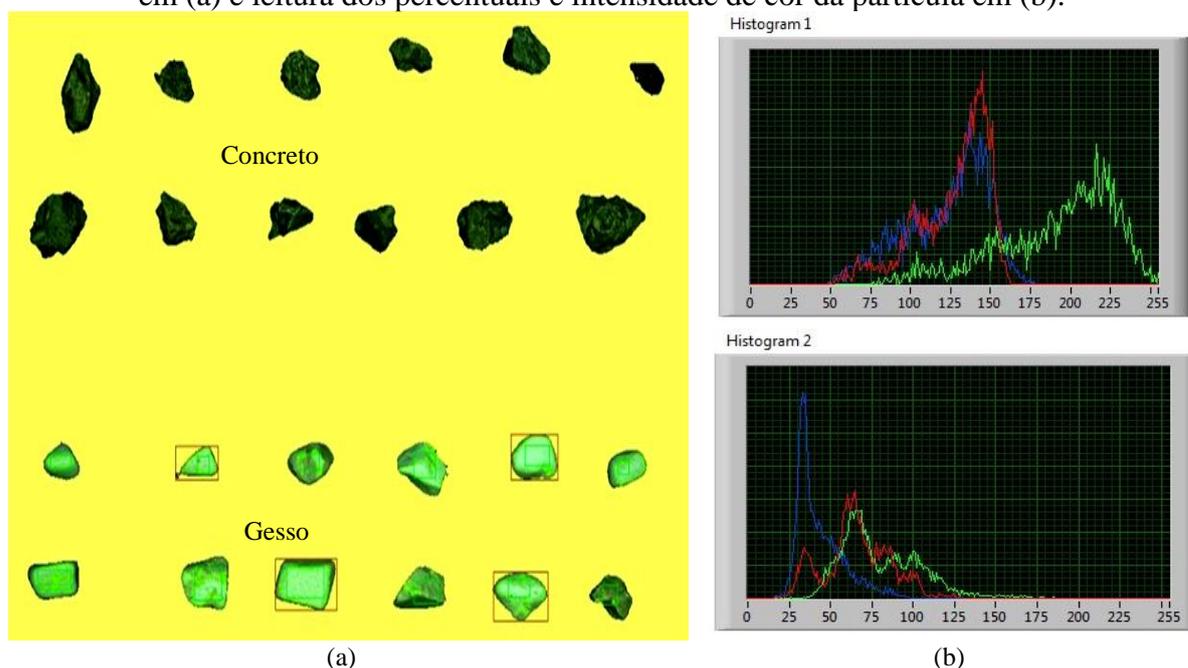
Figura 14. Organização em linha dos pixels no capacitor em (a) e placa com capacitor e microcontroladores em (b).



Fonte: adaptado de Basler, 2007

Em termos práticos, o sensor de captura de imagem CCD interpreta as cores e estrutura a imagem com base nas informações do espectro eletromagnético sensível a visão, emitido pela superfície da partícula. Todo processo do sinal, esclarecido nos parágrafos que antecedem a este, são tratados por *software* específico, que possibilita visualizar a imagem em escala hierárquica de cor característica de cada partícula, permitindo a distinção do que pode ser produto, nas caixas vermelhas, ou rejeito não marcadas com caixas vermelhas como ilustrado na Figura 15-a.

Figura 15. Calibração por sensor de câmera CCD em equipamento *sorting* da marca COMEX em (a) e leitura dos percentuais e intensidade de cor da partícula em (b).



Está interpretação seletiva, só é possível devido a existência de ferramenta no *software* que permite visualizar e interpretar o espectro da cor, emitida pelas partículas como um todo ou separadamente. Neste entendimento, a seletividade de uma dada partícula é facilitada devido as diferenças nas propriedades de intensidade, saturação, luminância e brilho das cores, notadamente visível nos histogramas 1 e 2 ilustrados na Figura 15-b acima. Assim, a compilação dessas informações passa a ser um banco de dados das partículas detectadas, onde as características de cores dentro do histograma podem ser editadas com um limite percentual das propriedades de cor pré-estabelecidos, bem como um *range* aceitável para cada espectro eletromagnético da cor. Indubitavelmente a tecnologia de SBS, assistido por sensor CCD, usará esses parâmetros para rejeitar partículas contaminantes ou inversamente separar o produto (COMEX, 2018).

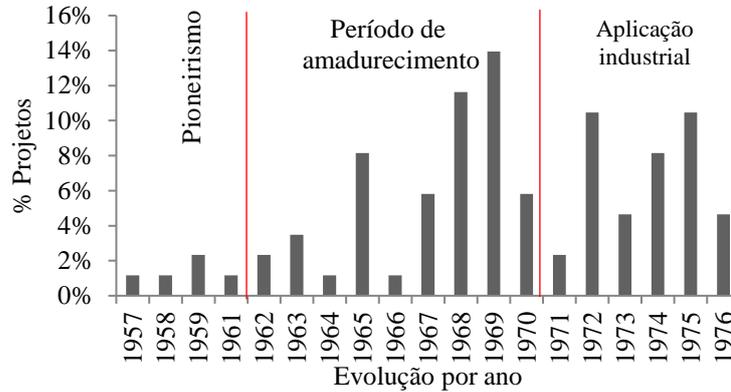
## 2.6. SENSOR DE RAIOS-X

### 3.6.1. Princípio de funcionamento

O uso dos sensores de raios-x, é tido como o mais viável no *automatic sorting* para o setor industrial, onde sua massiva participação iniciou com fortes estudos desde 1957 e a sua aplicação industrial deslanchou em 1976 (Cooper, 1976). O desenvolvimento dos sensores de raios-x e suas aplicações, em termos percentuais, e de todos os seus projetos ocorridos no

interstício de 1957 a 1976, está ilustrado na 16 cujo gráfico detalha sua evolução desde o pioneirismo, perpassando pelo período de amadurecimento até sua aplicação industrial. Os projetos e companhias que trabalharam com sensores para classificação podem ser visualizados no Apêndice D.

Figura 16. Evolução, eventos de testes e aplicações dos sensores de raios-x.

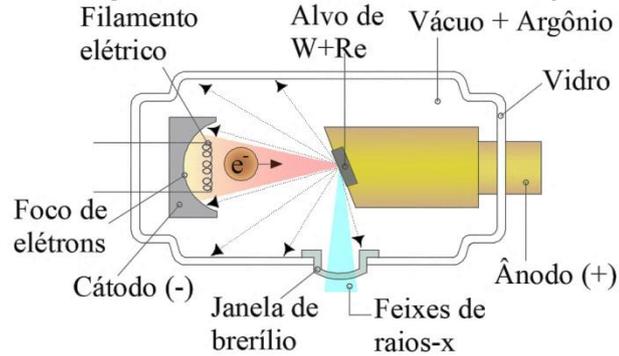


Fonte: adaptado de Cooper, 1976

As técnicas de análises com sensores de raios-x são métodos de análise não destrutivos, e que diferente de outros tipos de sensores, pode fazer a leitura da massa atômica do material, a distância combinando a medição simultânea entre os dois níveis de energias atenuadas, assim, é possível diferenciar uma partícula da outra (Köpcke *et al.*, 2014). Como técnica que se sobrepõe as demais, as sujeiras orgânicas ou corrosão dificilmente influenciará a leitura durante a análise (Riedel & Dehler, 2010).

Dessa forma, a detecção do material é possível devido essa radiação ter uma energia igual ou maior que  $10^2 eV$  e comprimento de onda menor que  $10^{-8} m$  dentro de sua variação do espectro eletromagnético (Wang *et al.*, 2014). A Figura 17 ilustra o funcionamento e os periféricos que consistem um tubo de raios-x a vácuo preenchido com argônio, onde em um lado há o filamento de cátodo, geralmente de cobre ou tungstênio, que emite elétrons para um ânodo que é uma liga de tungstênio (W) e rênio (Re) (Köpcke *et al.*, 2014). O aumento da voltagem promove a aceleração de elétrons emitidos pelo cátodo induzem o efeito de *Bremsstrahlung*, entendido como uma radical desaceleração dos elétrons ao colidirem com o ânodo, onde a energia cinética resultante é emitida em radiação de raios-x (Köpcke *et al.*, 2014).

Figura 17. Layout de um tubo de raios-x e seus periféricos.



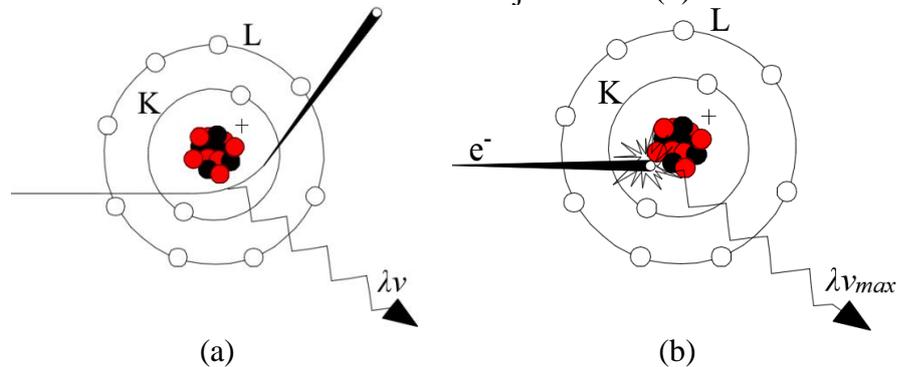
Fonte: adaptado de Lindner, 2010 e Young, 2017

Neste contexto, notoriamente entendido pela Equação 7, o comprimento ( $\lambda$ ) de onda e a frequência ( $\nu$ ) como variáveis possíveis da velocidade da luz ( $c$ ) no vácuo em meio a uma atmosfera de argônio, permite equacionar a orientação do mecanismo de geração do feixe de elétrons que se propaga em direção ao alvo.

$$\lambda \cdot \nu = c \quad (7)$$

Assim, a energia de um elétron ( $1 e^- = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ), pois também pode ser interpretada como energia cinética que um fóton carrega, quando é acelerada em uma diferença de potencial de 1 Volt, é quantificada quando os elétrons atingem o ânodo, onde parte da sua energia é dissipada nos átomos por meio de ionização e excitação gerando energia térmica, como ilustrado na Figura 18-a, e por outro lado quando esses elétrons tocam o núcleo atômico causando uma mudança de trajetória e promovendo sua desaceleração de alta energia para uma energia de maior atenuação (ver Figura 18-b).

Figura 18. Elétron que dissipa energia térmica no ânodo em (a) e elétron tocando o núcleo do átomo mudando sua trajetória em (b).



Fonte: adaptado de Carlsson & Carlsson, 1996

A desaceleração desse fóton, pode ser entendida pela Equação 8 assumindo que ao invés de  $c$ , considerada como uma energia arbitrária entre o zero e toda energia cinética do elétron

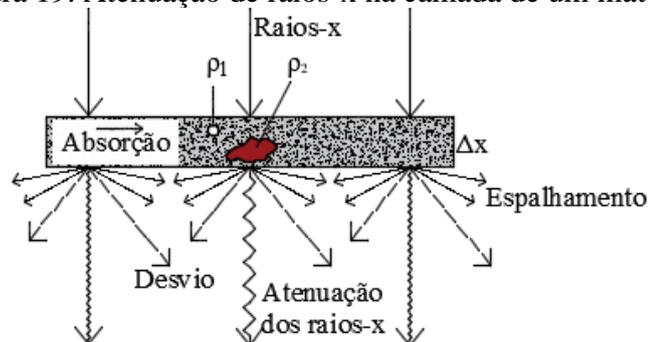
seja  $E$ , dessa maneira, a maior parte de elétrons é convertida em calor no ânodo e apenas, aproximadamente, 1 % é convertido em energia de raios-x (Carlsson & Carlsson, 1996).

$$\lambda\nu_{max} = E \quad (8)$$

Conseqüentemente, para obter uma alta quantidade relativa de raios-x o ânodo deve ter alto ponto de fusão e boa capacidade de condução de calor, assim seu número atômico deve ser alto, como uma liga de tungstênio e rênio ( $Z_W=74$  e  $Z_{Re}=75$ ), que tem sido a composição ideal que atende as exigências para geração de raios-x de imagem (Carlsson & Carlsson, 1996; Wang *et al.*, 2014).

Na prática, quando a radiação primária atinge a superfície do material e percorre por toda sua espessura ( $\Delta x$ ) a radiação pode sofrer desvio, absorção e espalhamento dos raios-x, como ilustrado na Figura 19, assim como também, parte da radiação primária que atravessou a matriz e tem sua energia ( $E_n$ ) atenuada (Carlsson & Carlsson, 1996). No entanto, quando dois materiais agregados heterogêneos, com massas ( $p_1$  e  $p_2$ ), estão presentes no mesmo ponto onde a radiação primária atinge, a energia atenuada neste ponto será maior que a energia atenuada em outros pontos da matriz gerando dois tipos diferentes de energias atenuadas para uma mesma matriz, conhecida como *dual-energy* ( $E_1$  e  $E_2$ ) (Wang *et al.*, 2014).

Figura 19. Atenuação de raios-x na camada de um material.



Fonte: adaptado de Carlsson & Carlsson, 1996 e Wang *et al.*, 2014

Dessa maneira fica claro quantificar o coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) de uma dada radiação ao atravessar uma matriz, pois quando se conhece a espessura/altura ( $x$ ) e a densidade do material ( $\rho$ ), cuja função pode ser escrita pela Equação 9 (Berwanger & Gaastra, 2014; Wang *et al.*, 2014), e como a atenuação dos raios-x dependem da massa atômica do material, é possível expressar o coeficiente de atenuação mássico ( $\mu_m$ ), na Equação 10, em função do coeficiente de atenuação linear dividido pela densidade da matriz ( $\rho$ ) (Berwanger & Gaastra, 2014; Carlsson & Carlsson, 1996).

$$\mu = \rho \cdot x \text{ ou } \frac{\mu}{\rho} = x \quad (9)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (10)$$

Integralmente conhecendo os valores de atenuação linear e mássico, as informações que chegam aos sensores dos raios-x são detectados como pacotes de intensidade de energia atenuada ( $\Phi_{det}$ ). Então na Equação 11 é possível denotar, em função da intensidade, energia atenuada inicial ( $\Phi_0$ ) pelo número de Euler a um coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ), o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a espessura da matriz ( $x$ ) (Berwanger & Gaastra, 2014; Carlsson & Carlsson, 1996; Martz Jr. *et al.*, 2017).

$$\Phi_{det} = \Phi_0 \cdot e^{-\mu(\lambda)x} \quad (11)$$

Reescrevendo  $\mu$  com  $\mu_m$  (coeficiente de atenuação linear mássico), a resultante de  $\Phi_{det}$  é escrita na Equação 12.

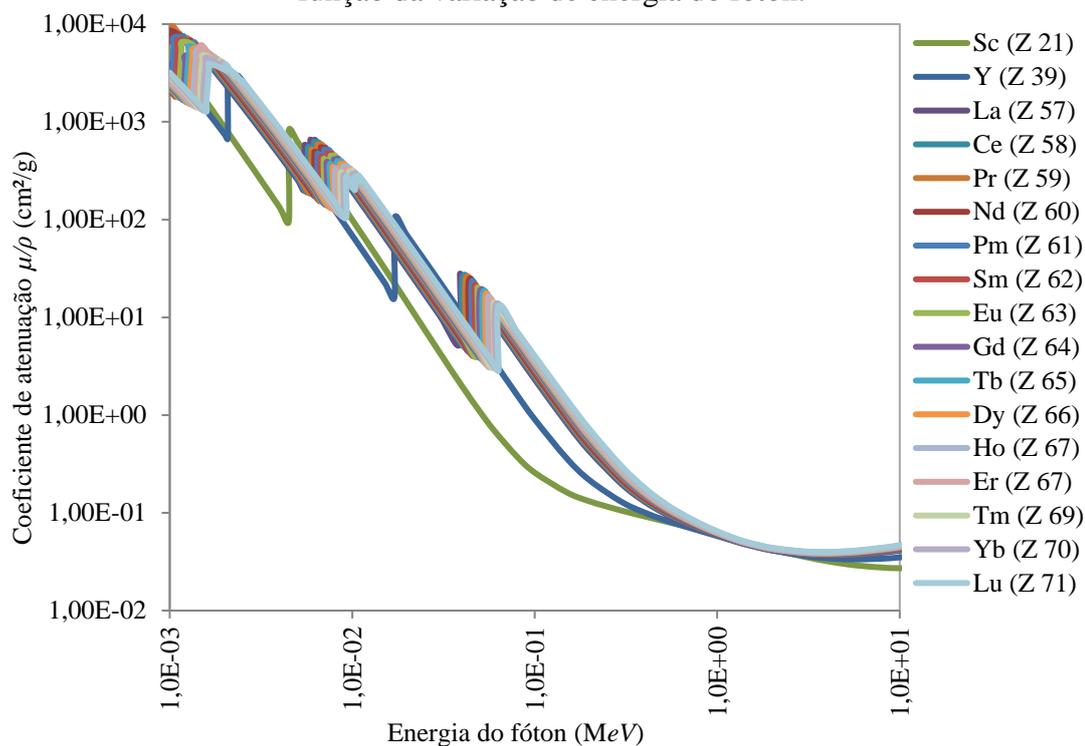
$$\Phi_{det} = \Phi_0 \cdot e^{-\mu_m(\lambda)\rho x} \quad (12)$$

Segundo a energia detectada ( $T$ ) de dois tipos de matriz heterogênea é entendida como a capacidade da matriz permitir a transmissão no conceito de *Dual-Energy* para o detector. Assim  $T$  pode escrito pela Equação 13 tomando duas detecções de intensidade de energia atenuada ( $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ ) (Martz Jr. *et al.*, 2017).

$$T \left( \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \right) = e^{-\sum_i^n \mu_m^i \rho x} \quad (13)$$

No contexto de medida de intensidade de energia atenuada, como pode ser visto na Figura 20, em que foi quantificada para uma dada matriz com substância dos ETR, realizada pela divisão do *Physical Measurement Laboratory* vinculado ao *National Institute of Standards and Technology* (NIST), os níveis do coeficiente de energia atenuada desses elementos foi tornada pública a maneira pela qual esse coeficiente varia em função da energia do fóton (Hubbell & Seltzer, 2004).

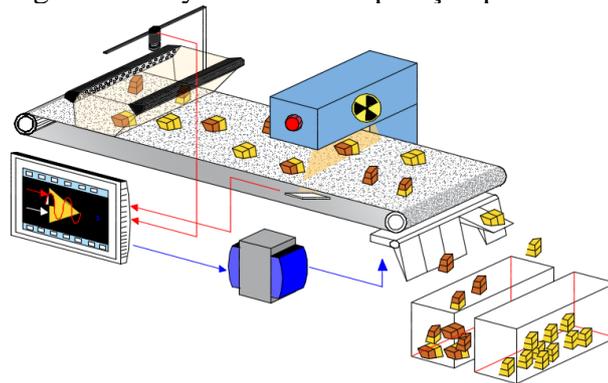
Figura 20. Coeficiente de atenuação dos elementos das terras raras, na escala de log, em função da variação de energia do fóton.



Em termos operacionais, a espectrometria de dupla energia por transmissão de raios-x (DE-XRT – *Dual Energy X-ray Transmission*) permite separar o material em uma faixa de massa, reconhecendo a diferença na densidade atômica da partícula, que se apropria diretamente das características desses coeficientes de atenuação mássica. Neste tipo separação, a tecnologia assume que a diferença na densidade atômica está correlacionada a diferença da classe de material (Veras *et al.*, 2016).

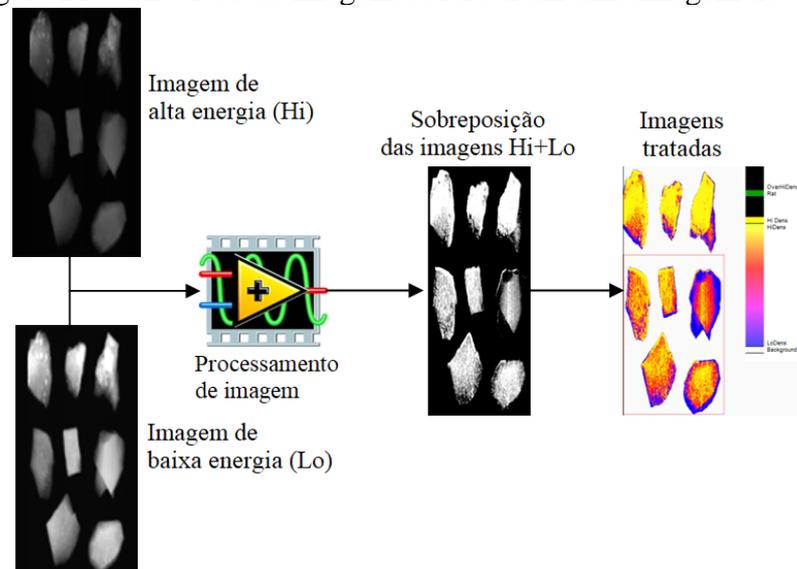
A separação propriamente dita é possível quando, em uma extremidade há uma fonte de raios-x de baixa energia emitindo radiação linear direto para o detector, entre o detector e a fonte de radiação uma massa atravessa o campo de radiação, provocando uma perturbação na intensidade de radiação inicial ( $I_0$ ), sendo interpretada como atenuação mássica da energia dos raios-x ( $\mu_m$ ) registrando uma intensidade detectada ( $I_{det}$ ) (Berwanger & Gaastra, 2014). O detector envia os dados para o *driver* tratar o sinal e converte essa informação em uma forma de pixel, assim um *software* pode converter a intensidade do sinal elétrico de cada pixel em escala hierárquica de cor, possibilitando separar o produto do rejeito (Riedel & Dehler, 2010). A Figura 21 ilustra a estrutura de um equipamento de *automatic sorting* assistido por sensor de raios-x usando DE-XRT.

Figura 21. Layout de uma separação por raios-x.



O *software* usa o sinal criado entre as escalas de imagem geradas, a partir da cor relativa ao pixel de alto nível de absorção, somada ao da cor relativa ao pixel de menor brilho com menor nível de absorção, possibilitando compilar e gerar uma única imagem representativa da partícula que passou pelo *scanner* (Riedel & Dehler, 2010; Berwanger & Gaastra, 2014). Quando as duas imagens radiográficas são sobrepostas, é possível criar imagens com cores falsas para traduzir o intervalo de classe hierárquica de cores, atribuídas para as densidades de massas atômicas equivalentes (Tong, 2012). Neste entendimento, as classes de cores são definidas manualmente durante o processo de calibração, para diferenciar as partículas desejáveis das indesejáveis como ilustrado a seguir na Figura 22.

Figura 22. Conversão da imagem de raio-x em uma imagem tratada.

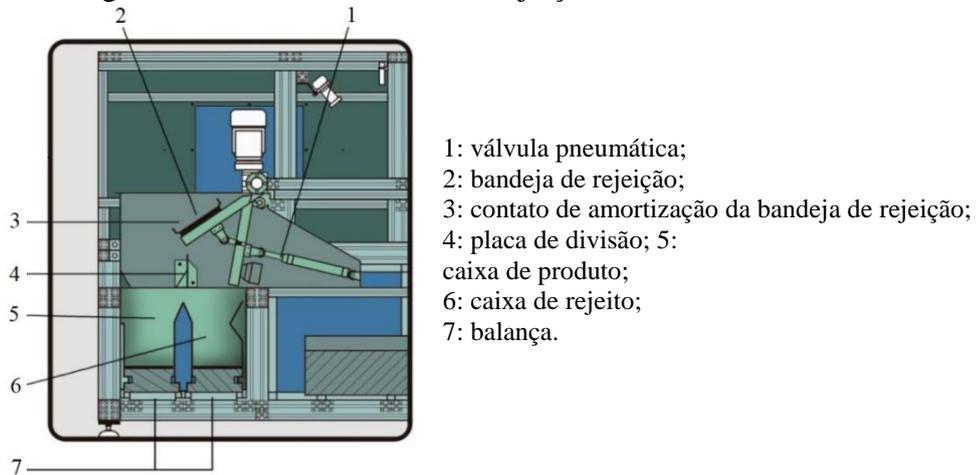


Fonte: adaptado de Gaastra, 2014

O equipamento separa as partículas pelo sensor de raios-x com emissão de fonte instalada verticalmente ao detector. O material é transportado sobre uma correia transportadora, ou através de rampas com espaço de medida entre o emissor e o detector para ser selecionado. O sensor é conectado a um computador que analisa os dados detectados, e controla as unidades

de informações/descargas por sistema mecânico de rejeição/*flap* (ver Figura 23) ou válvulas pneumáticas de ejeção (Veras *et al.*, 2016; Young, 2017).

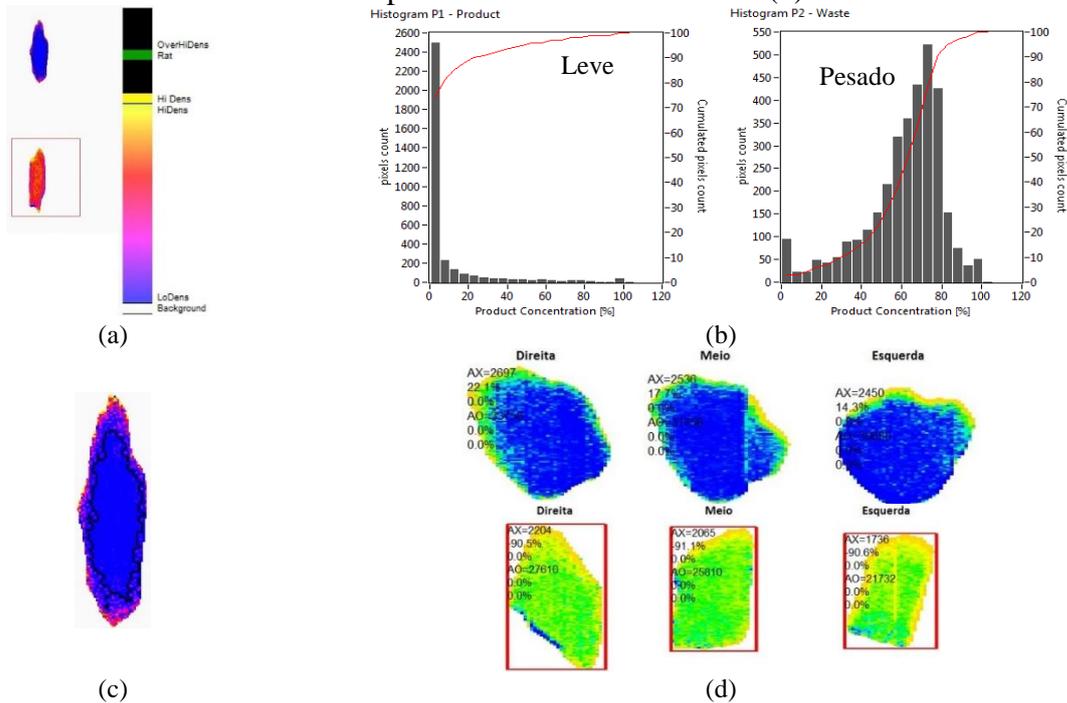
Figura 23. Sistema mecânico de rejeição com um único atuador.



Fonte: Young, 2017

Os detalhes de um processo de calibração e detecção seletiva de uma separação para determinado minério, está nitidamente ilustrado na Figura 24, em que uma imagem de uma calibração assistida por de sensor de raios-x explora as propriedades da densidade atômica equivalente das duas partículas evidenciando o produto, na cor azul, e o rejeito na cor vermelha, Figura 24-a. Com as características distintas da cor (ver Figura 24-b) é possível construir os histogramas das duas partículas, em que o histograma 1 representa as informações da contagem de pixel e percentual de pixel cumulativo no eixo das ordenadas em função do percentual da cor no eixo das abscissas, cujas mesas características são plotadas no histograma 2 para o rejeito.

Figura 24. Escala de corte da calibração em raios-x em (a), histograma da densidade convertida em (b), área de seleção do material de menor densidade em (c) e seleção de partícula com densidades em (d).



As informações dos histogramas permitem determinar um ponto limite da concentração da cor para conduzir a um percentual de concentração de cor da partícula que será produto (ver Figura 24-c). Dessa maneira, quando se estima um valor percentual tolerável da quantidade de pixels, que são portadores das cores limites pré-estabelecidas, é possível detectar e selecionar precisamente as partículas indesejadas, marcadas com caixas vermelhas, como ilustrado na Figura 24-d.

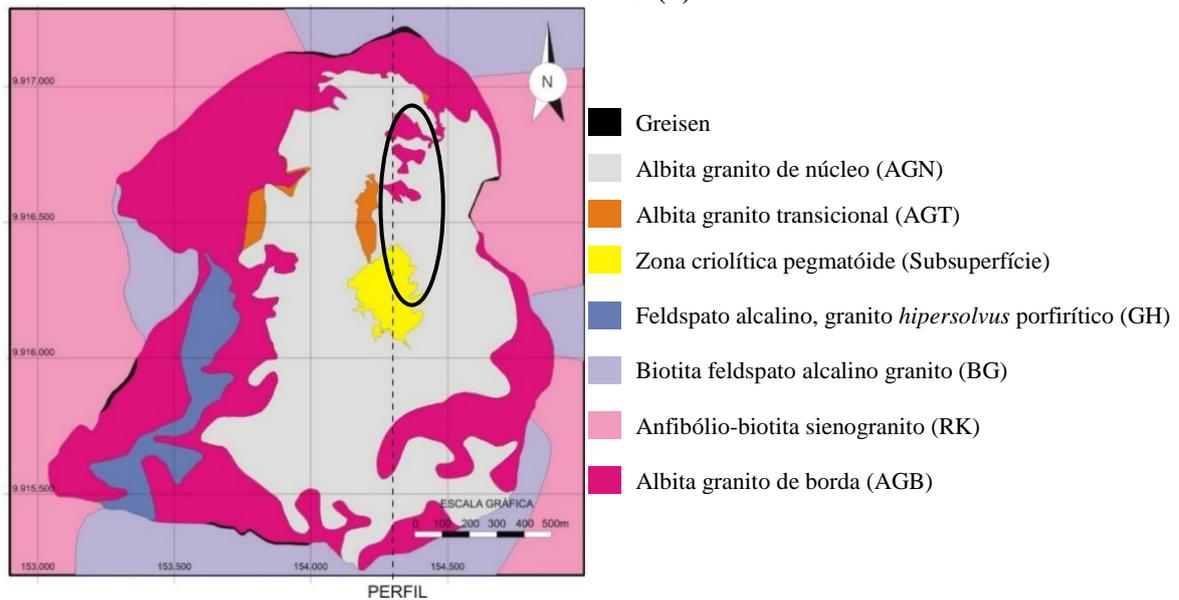
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

As informações contidas nesta seção estão diretamente ligadas aos tipos de materiais, equipamentos com seus periféricos e os métodos que estão alinhados para o desenvolvimento dos ensaios, etapas e caracterizações.

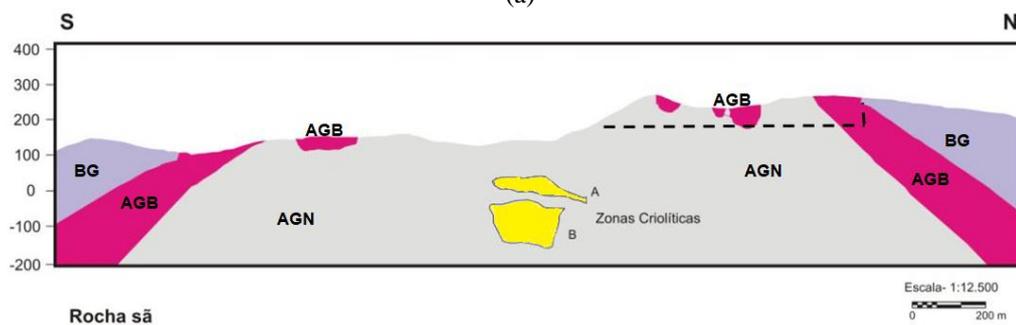
#### 3.1. AMOSTRAS

As amostras usadas para a investigação em tela foram fornecidas pela mina de Pitinga/AM em parceria com o Instituto de Geociências (IGEO) e o LAPROM da UFRGS. Para a coleta *in loco* a amostragem foi feita na jazida em diferentes litologias da mina de Pitinga pela equipe de geologia da empresa. O mapa, ilustrado na Figura 25-a, exibe na área circular a região onde foi coletada as amostras nas faces do avanço da lavra, e a ilustração da Figura 25-b, a linha tracejada está indicando o limite da região de amostragem em perfil geológico.

Figura 25. Mapa geológico do granito Madeira em (a) e visão em perfil geológico da serra do Madeira em (b).



(a)

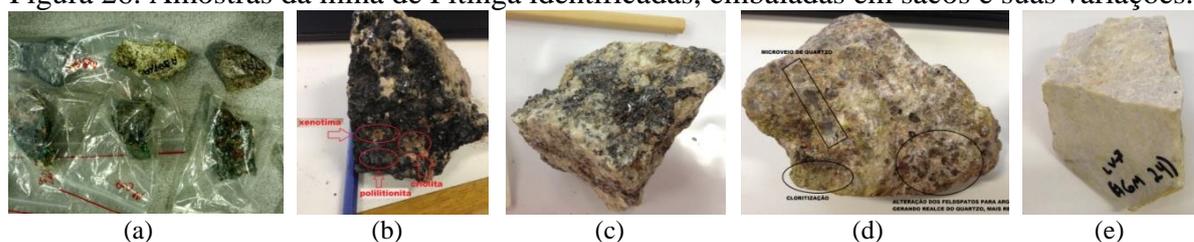


(b)

Fonte: Dutra & Garcia, 2012

Um lote com 42 amostras nas dimensões de 15 e 22 cm foram enviadas ao LAPROM/UFRGS. Devido aos tamanhos dos clastos não se adequarem aos limites de operação do *automatic sorting*, as amostras foram encaminhadas para o IGEO/UFRGS a fim obter uma adequação granulométrica, na fração -10 cm +5 cm, usando martelo geológico pela equipe do IGEO. Posteriormente, as amostras foram devolvidas ao LAPROM/UFRGS onde foram embaladas em plásticos, tomando como prática de prevenção de possíveis características deletérias, e foram identificadas como ilustrado na Figura 26-a.

Figura 26. Amostras da mina de Pitinga identificadas, embaladas em sacos e suas variações.



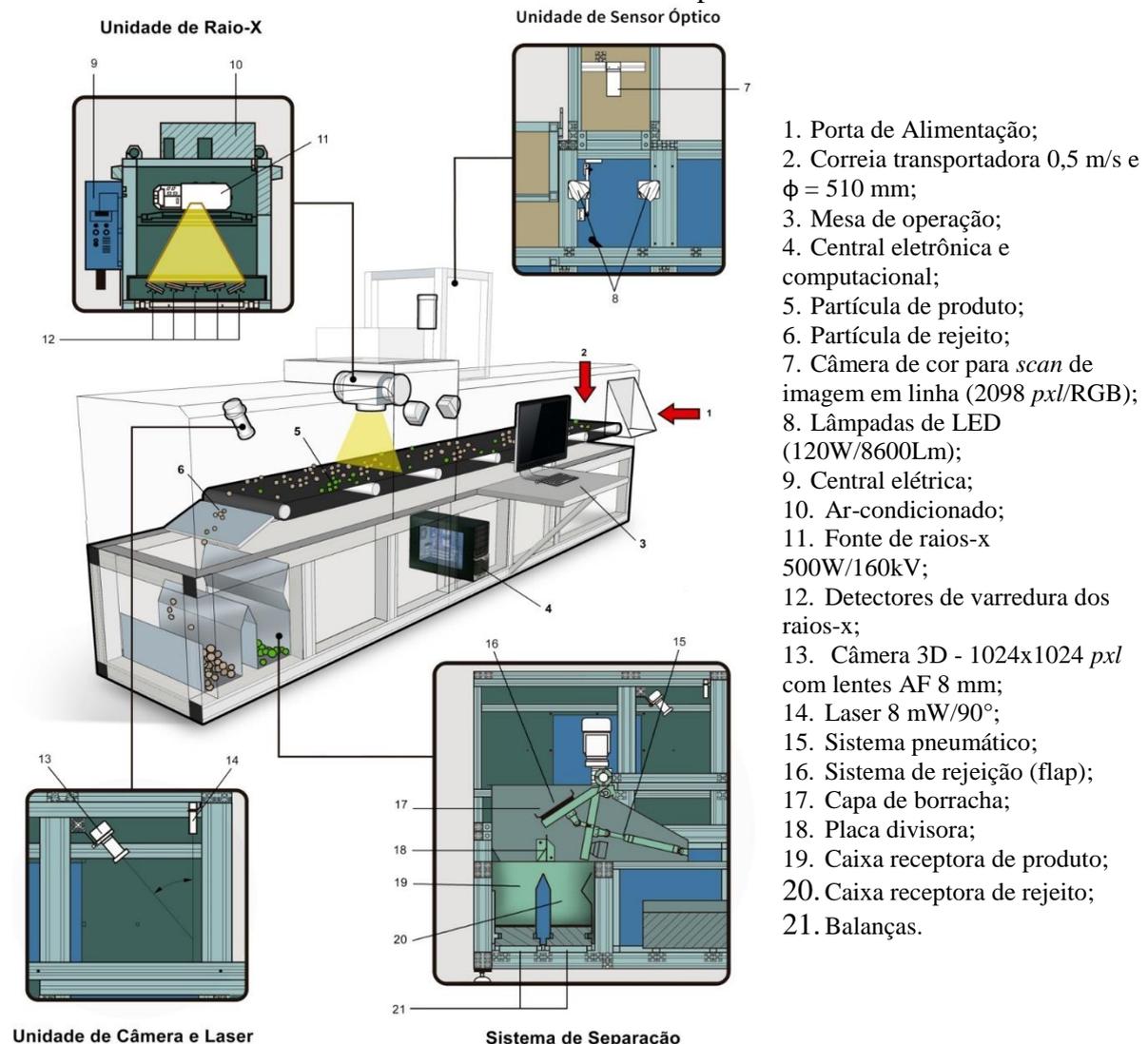
Neste lote de amostras foram identificadas macroscopicamente as seguintes características: partícula rica em xenotima denominada de *Super-premium*, colocando-a como uma amostra promissora em conter altos teores de ETR (Figura 26-b); outras partículas *Premium* apresentavam aptidão em conter ETR (Figura 26-c); uma mistura de rochas denominadas de albita granito com mineralogia mista e desconhecida sem saber se haveria ou não aptidão em conter ETR (Figura 26-d); e uma amostra denominada albitizada de coloração leitosa, que macroscopicamente, não apresentava traços de xenotima ou simplesmente é um estéril (Figura 26-e).

### 3.2. SISTEMA DE SORTING

Para o trabalho foi utilizado o equipamento COMEX Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D<sup>®</sup> no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento da COMEX possui diversos elementos, dentre periféricos, parte computacional e outros que são constituídos de correia transportadora, porta de alimentação, unidade de sensor óptico, unidade de DE-XRT e mecanismo de *flap*. Nos testes, o material de alimentação é fornecido manualmente sobre a esteira, onde as partículas individualmente são distribuídas sobre a correia com distância de aproximadamente 2 cm umas das outras. As rochas foram submetidas ao analisador óptico e de DE-XRT no final da esteira. Neste equipamento, diferentes características da refletância de cor na superfície da partícula e propriedades de densidades elementares são analisadas, registradas pelos sensores e enviadas para o *software* da Comex-Sorter.

O princípio de funcionamento da tecnologia está ilustrado na Figura 27, evidenciando enumeradamente cada periférico, onde as imagens são registradas pelo sensor óptico ou de DE-XRT em condições dinâmicas. O sistema é operado por uma unidade de controle, baseado em computador (PC) industrial que emprega algoritmos de separação atendendo aos critérios previamente configurados. Cada partícula pode ser identificada em termos da sua cor de refletância (sensor óptico) ou pela densidade *bulk* (sensor de DE-XRT) independentemente da sua posição na esteira para possível rejeição.

Figura 27. Layout da unidade de operação do *automatic sorting* modelo COMEX *Lab-Sorter* MSX-400-VL-XR-3D® e seus periféricos.



Fonte: adaptado de Young, 2017

#### 4.2.1. Imagem do sensor óptico

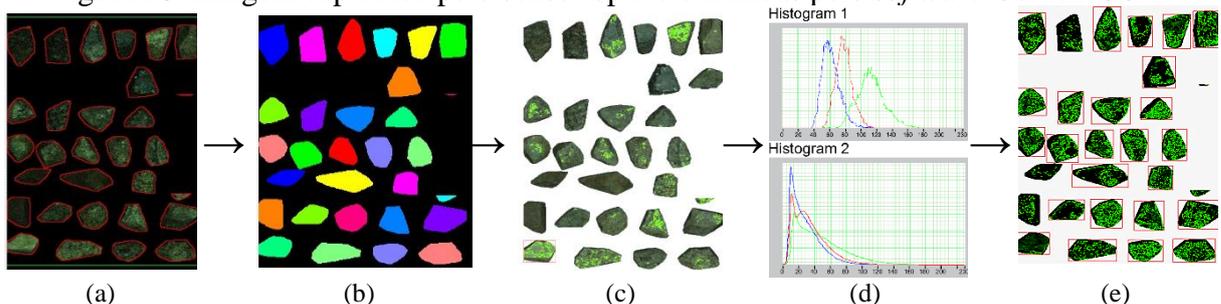
As amostras recebidas foram submetidas ao *scan* assistido por sensor óptico. A partícula é alimentada na esteira, e quando passa pela câmera é capturado cada fóton emitido da partícula,

que o interpreta como espectro de onda da luz, compreendido entre a cor violeta (390 nm) e o vermelho (780 nm). A energia de cada fóton ( $E_{Fóton}$ ) pode ser quantificada pela Equação 5, citada anteriormente, que possibilita a leitura de um conjunto de cores, dentro de uma escala hierárquica de cores, sensíveis à visão, em que cada *pixel* gerado pela imagem no sensor ocorre em escala dinâmica (Hols & Lomheim, 2011).

Durante o processo de *scan* com sensor óptico, duas lâmpadas de *led* (120 W) emitem feixes luminosos de 8600 *lm* sobre a superfície da partícula. Em seguida, o sensor de imagem (*Camera Basler L301kc – colour line scan*) com resolução de 2098 *pixel* 3 *lines* (RGB - *Red, Green, Blue*, em português: vermelho, verde e azul), onde cada *pixel* mede 14,0 x 14,0 x 14,0  $\mu\text{m}$ , permite capturar os feixes dos fótons emitidos pela superfície da partícula, possibilitando registrar a cor da superfície. O conjunto de cores elementares em RGB capturadas pelo sensor, emite o sinal para o *driver* criando um modelo equivalente de imagem pré-definida para cada partícula (ver Figura 28).

O *software* *Comex-OSX Analyzer* trata as cores e as transformam em uma cor de máscara de fundo em cada *pixel* dando forma à imagem como ilustrado na Figura 28-a. Para eliminar falhas na imagem ou ruídos resultantes dos ângulos de imperfeições da forma na superfície de partículas e da velocidade da esteira (Figura 28-b), o *software* permite destacar a morfologia da cor falsa em todas as partículas, adotando as cores hierárquicas de máscaras para deixarem as partículas livres de ruídos ou falhas (Figura 28-c).

Figura 28. Imagem capturada pelo sensor óptico e tratadas pelo *software* *Comex-OSX*.

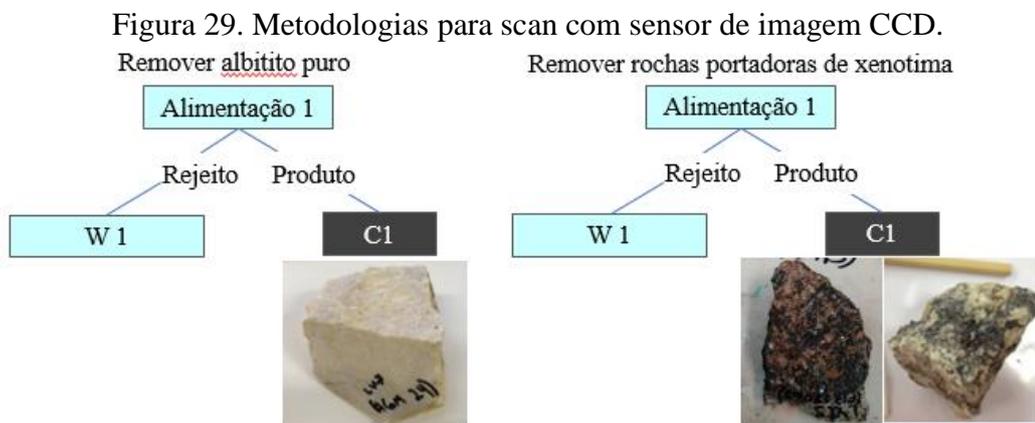


Com auxílio de uma ferramenta de configuração do *software* é possível criar um histograma nas cores RGB tornando visíveis as diferentes características na cor das partículas (Figura 28-d). A interpretação dos valores no histograma permite ao operador calibrar os limites de saturação e intensidade na escala de cor, tornando possível distinguir as partículas que serão rejeitadas (caixas vermelhas) das partículas não selecionadas, como ilustrado na Figura 28-e.

Como resultado da calibração dos parâmetros operacionais, o ajuste do limite de valores das cores RGB pré-estabelecidos, permite rejeitar seletivamente as partículas que apresentem

as mesmas características de cor na superfície correspondente, com os mesmos parâmetros de configurações estabelecidas no *software*.

A tecnologia de sensor óptico foi usada para verificar sua afinidade ao *scan* na rejeição de partículas com menor aptidão a ser portadora de ETR, seguido de um segundo teste que averiguou sua afinidade em rejeitar partículas portadoras de ETR. Assim, os limites de cores foram calibrados para rejeitar partículas albitizada no primeiro teste e no segundo buscou avaliar a afinidade em rejeitar rochas portadoras em xenotima. A alimentação foi constante com uma partícula por vez como ilustrado na Figura 29 onde o fluxograma foi o reflexo da metodologia adotada. Os dados de separação foram tratados em *software* Excel para serem quantificados por balanço de massa e teor recuperado de ETR.



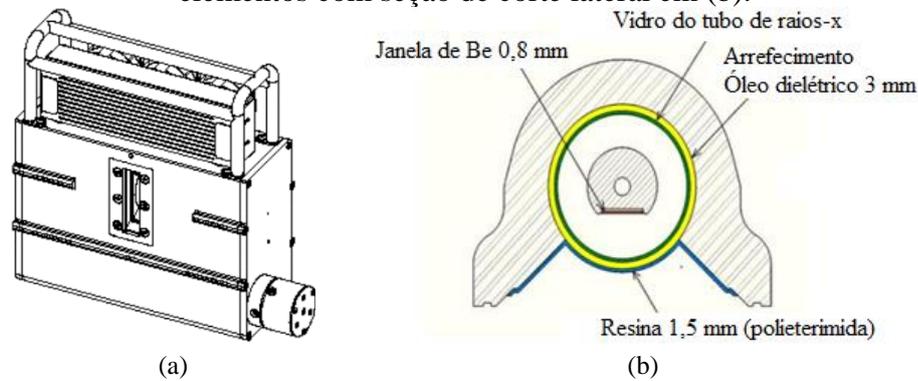
#### 4.2.2. Imagem do sensor de raios-x

O mesmo lote de partículas submetidas ao sensor óptico foi usado nas mesmas condições operacionais para os testes com o sensor DE-XRT. A fonte de emissão de raios-x consiste de uma estrutura de metal, como invólucro tendo um *cooler* de arrefecimento com óleo dielétrico isolante acoplado (ver Figura 30–a), e um tubo de raios-x com ângulo de ataque de 25°.

A placa do ânodo é constituída de uma liga de Tungstênio com rênio (W+Re) acoplado a uma barra de cobre que opera a 160 kV. A temperatura de operação ambiente deve ser entre -20 °C a 60 °C com umidade do ar inferior a 98%. Uma Janela de vidro de Be+, com espessura de 0,8 mm é usada, devido à alta qualidade de permeabilidade aos raios-X, ser transparente, resistente à altas temperaturas e resistente à oxidação. A radiação que atravessa o berílio encontra uma camada de 3 mm de óleo dielétrico, que atua como arrefecimento, e atinge a camada de 1,5 mm da resina (ultem-polieterimida) que possui características para suportar altas

temperaturas, ser amorfo e transparente na cor âmbar. O modelo esquemático da fonte de raios-X está ilustrado na Figura 30–b.

Figura 30. Layout completo da fonte de emissão de radiação em (a) e tubo de raios-x e seus elementos com seção de corte lateral em (b).



(a)  
Fonte: VJ X-Ray source, 2016

(b)  
Fonte: adaptado de Young, 2017

Quando uma partícula é exposta ao sensor DE-XRT, seu sinal é registrado por cintiladores de raios-x. A radiação emitida pelo tubo de raios-x, com janela de berilo, bombardeia a amostra gerando uma intensidade de sinal atenuada como resultante da perda ou desaceleração de energia. A intensidade do sinal registrado é lida pelo *driver* para ser tratado e enviado para o *software* Comex-CRX onde uma imagem equivalente é gerada. O *software*, por sua vez, entende que essa informação é um distúrbio da radiação inicial cuja interpretação da intensidade de sinal  $\Phi_{det}$  é dada pela Equação 14.

Segundo Köpcke *et al.*, (2014), praticamente durante uma leitura dinâmica para detecção de radiação de DE-XRT, o parâmetro da espessura do objeto/partícula pode ser desconsiderado, combinando os dois resultados da equação para duas diferentes intensidades de energia atenuada registradas pelo cintilador. Dessa maneira, matematicamente a intensidade do sinal registrado pode ser equacionada pelas Equações 14, 15, 16 e 17.

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_{det.1}}{\Phi_{0.1}} = e^{-\mu_{m,1}(\lambda)\rho x} \quad (14)$$

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_{det.2}}{\Phi_{0.2}} = e^{-\mu_{m,2}(\lambda)\rho x} \quad (15)$$

$$\frac{\Phi_{det.1}}{\Phi_{det.2}} = e^{-(\mu_{m,2}(\lambda) - \mu_{m,1}(\lambda))\rho x} \quad (16)$$

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = C_m^x \quad (17)$$

Em que:

$\Phi_{det,n}$ : intensidade de sinal detectado;

$\Phi_{0,n}$ : sinal inicial sem ruído;

$n$ : número de partículas;

$e$ : número de Euler;

$\mu_m$ : coeficiente de atenuação de massa;

$\lambda$ : comprimento de onda;

$\rho$ : densidade do objeto;

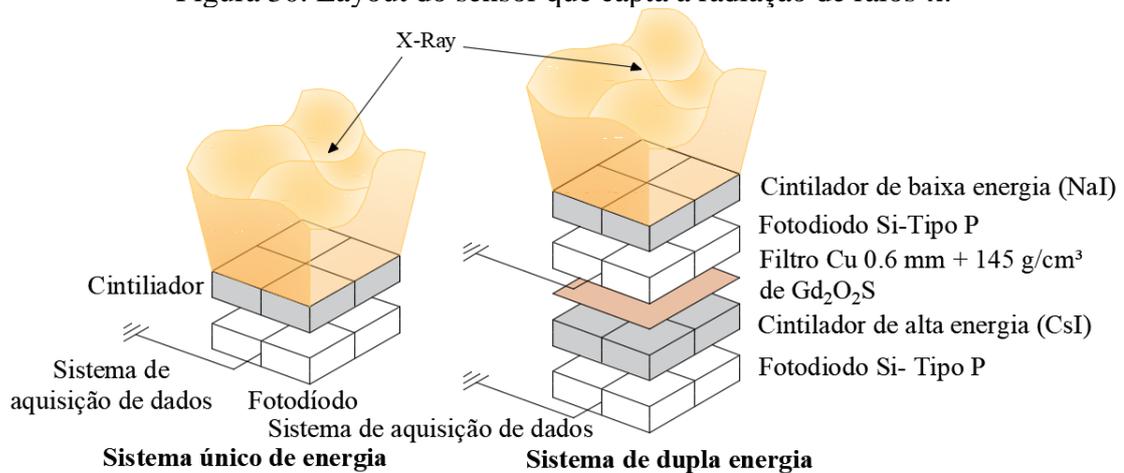
$x$ : espessura do objeto;

$C_m$ : constante de propriedades específica de cada material com seu comprimento de onda definido.

Outro método matemático que pode equacionar a intensidade do sinal de raios-x atenuado pela partícula, registrado no cintilador, pode usar a dedução, já explicada na Equação 12, dada por Carlsson e Carlsson (1996), Berwanger e Gaastra (2014) e Martz Jr. *et al.*, (2017).

Coesamente a leitura da radiação atenuada registrada pelos cintiladores geram duas imagens radiográficas, ou do grupo de partículas, que fora submetida ao *scan*, uma de alta e outra baixa energia registradas. Os dois níveis de energia atingem a camada de NaI, porém suas propriedades registram apenas os níveis de baixa energia. O filtro de Cu de 0,6 mm revestido com uma camada de oxissulfeto de gadolínio ( $Gd_2O_2S$ ) e com densidade de  $145 \text{ g/cm}^3$ , permite a passagem da radiação dos níveis de energias mais altas. O cintilador de iodeto de cério (CsI) captura a alta energia que atravessou o filtro, possibilitando enviar o sinal. Dessa maneira, a interpretação mais coesa, quando o sinal atinge os cintiladores, está no entendimento que: as energias atenuadas das partículas de menor densidade equivalente são captadas apenas no fotodiodo ligado ao cintilador de iodeto de sódio (ver Figura 31), e a energia atenuada das partículas de maior densidade equivalente conseguem atravessar o filtro permitindo ser captadas pelo cintilador de iodeto de cério.

Figura 30. Layout do sensor que capta a radiação de raios-x.



Fonte: adaptado de Young, 2017

Os cristais dos cintiladores de NaI e CsI da tecnologia COMEX<sup>®</sup> tem dimensões de 0,2 a 0,1 mm em suas extremidades laterais (largura), 0,6 a 0,1 mm de comprimento e espessura de 3 mm respectivamente (COMEX, 2018). Os fotodiodos são silício tipo P dopados com fósforo (P) e desempenham o papel de amplificadores de energia do fotodiodo para enviar o sinal ao *driver*. A Tabela 5 elucida as propriedades correlatas com a capacidade de registrar a energia do fóton, percentual de energia registrada, coeficiente de temperatura entre 25 °C a 50 °C, tempo de decaimento em nanosegundos (*ns*), comprimento de onda na máxima emissão (*nm*) e o índices de refração dado em lumens.

Tabela 5. Propriedades físicas de cintiladores usados no *automatic sorting* modelo COMEX *Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D*<sup>®</sup>.

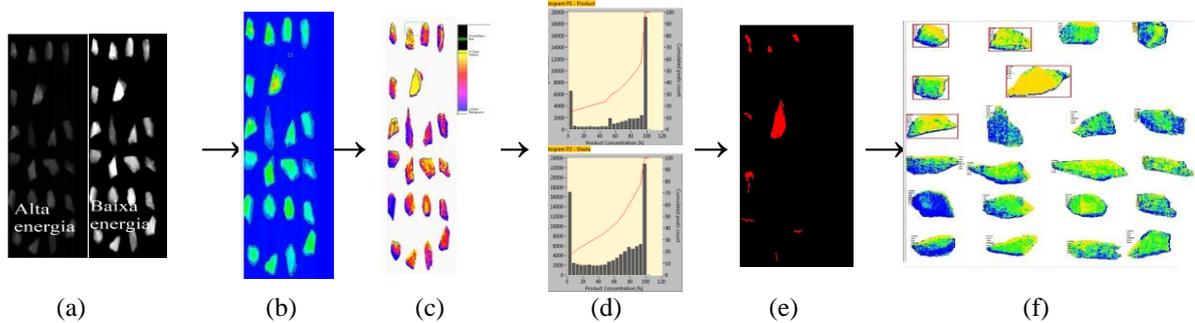
Propriedades	NaI	CsI
Nível de rendimento (keV) ou (lm)	38	54
Produção de luz (%)	100	45
Coeficiente de temperatura (%) (25°C a 50°C)	-0.3	0.01
Decaimento da energia (ns)	250	1000
Comprimento de onda na máxima (nm)	415	550
Índice de refração	1.85	1.79

Esses cintiladores revelam as propriedades de densidade equivalente ou *bulk* de cada partícula, interpretando o sinal da baixa e da alta energia atenuada (ver Figura 31-a), na qual cada *pixel* de imagem revela uma cor hierárquica equivalente para cada sinal de energia atenuada em escala dinâmica quando sobrepostas as duas imagens radiográficas (ver Figura 31-b).

As cores relativas à densidade são apresentadas em uma escala de RGB, onde partículas de menor densidade são reveladas pela cor azul e as de maior densidade tendem à cor amarela (ver Figura 31-c). A plotagem de dois histogramas auxilia na interpretação das configurações dessas características por contagem de *pixel*, percentual da cor do produto concentrado e

percentual de *pixels* acumulados (ver Figura 31-d). Esta última ferramenta tem relação direta para auxiliar os valores dos limites de densidade equivalente na separação dos grupos de partículas de interesse das que serão rejeitadas.

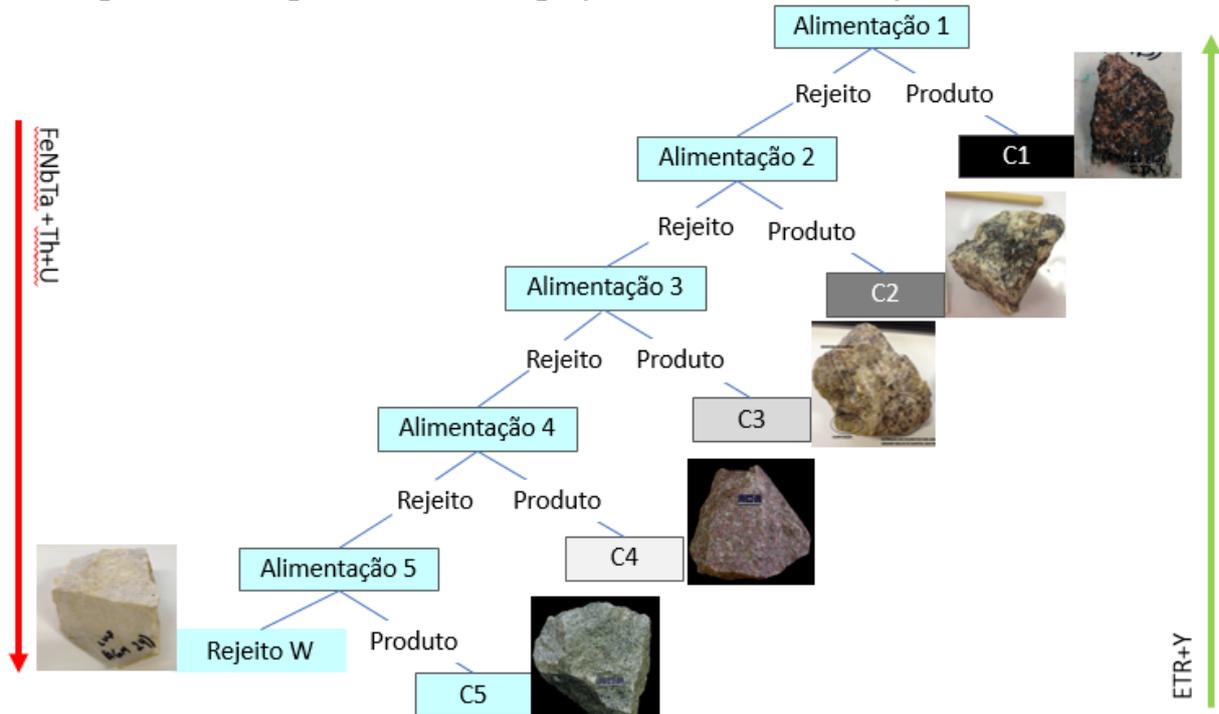
Figura 31. Sequência de imagem capturada por sensor DE-XRT e tratadas pelo software Comex-CXR.



A ferramenta que determina os limites de detectabilidade, explora o *range* de características das cores do grupo de partículas possibilitando ajustá-las, consoante condições de operação para rejeitar partículas de maior ou menor densidade, como ilustrado na Figura 31-e. O *scan* de separação por sensor DE-XRT explora o percentual dos limites de saturação da cor pré-estabelecida como parâmetro de seletividade, por tanto, as partículas que serão rejeitadas são identificadas pelo *software Comex-sorter* por caixas vermelhas como ilustra a Figura 31-f.

Para os testes de detectabilidade assistida por sensor DE-XRT, as amostras recebidas da mina de Pitinga foram submetidas ao *scan*, uma a uma, com alimentação contínua cujos parâmetros de operação foram maximizados para detectar partículas da maior para a menor densidade relativa, pois essa característica é indicadora de maior quantidade de xenotima disseminada e conseqüentemente transporta os teores de ETR mais elevados. Dessa maneira, os cinco estágios foram planejados para detectar os melhores teores de ETR logo no primeiro estágio de modo que a alimentação foi submetida ao *scan* gerando um produto e um rejeito, entretanto a massa do rejeito seguia como a alimentação do próximo estágio, tomando essa metodologia até a obtenção do estéril após o quinto estágio, como ilustra o fluxograma da Figura 32.

Figura 32. Fluxograma da metodologia para os testes assistidos por sensor DE-XRT.



Com essa metodologia esperava-se que os teores dos elementos metálicos e deletérios (Th+U) aumentasse proporcionalmente com o avanço dos estágios. Esperava-se também que os cortes de maior densidade nos primeiros estágios permitiriam a maior quantidade de rochas portadoras do mineral xenotima.

### 3.3. ANÁLISES QUÍMICAS

As análises de caracterização química multielementar das partículas submetidas ao *scan*, assistido por sensores óptico e de DE-XRT, foram feitas em triplicatas pelo laboratório Actlabs – *Activation Laboratories Ltd*, situado no Canadá, usando o método de análise por espectroscopia de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Toda preparação das amostras e metodologias adotadas foram executadas pela Actlabs.

É importante ratificar que, para quantificação de elementos de terras raras, Th e U, se fez necessário determinar o teor dos outros elementos por espectrometria de fluorescência de raios-x (EFRX) com análise de perda ao fogo (LOI – do inglês: *loss on ignition*) usando o corpo analisado em pérolas. No primeiro teste de análise multielementar foram quantificados os percentuais de 13 óxidos como: SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; MnO; MgO; CaO; Na<sub>2</sub>O; K<sub>2</sub>O; TiO<sub>2</sub>; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e ZrO<sub>2</sub>, quantificados em termos percentuais. Posteriormente as análises elementares realizadas por ICP-MS contemplam a leitura de 45 elementos, cujas nomenclatura

a seguir abrange: Sc, Be, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, Sb, Cs, Ba, Bi, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Th e U, quantificados em uma unidade de partes por milhões (ppm) com limites de tolerância das análises variando entre 0,01 a 5 para o elementos metálicos e 0,01 a 0,5 para os elementos das terras raras e radioativos no ICP.

Para abertura das amostras foi adotada uma granulometria menor que 0,074 mm. Essa granulometria, segundo a Actlabs, garante a oxidação completa dos minerais resistentes com peróxido de sódio para posterior fusão a 650 °C em forno mufla. As amostras foram abertas por solubilização a 1 mol/L em metaborato de lítio/tetraborato sob agitação constante a  $\pm 70$  °C. Sequencialmente as soluções preparadas foram submetidas à análise por ICP-MS onde uma calibração era realizada a cada 10 análises durante todo o procedimento.

#### 3.4. ANÁLISE PETROGRÁFICA

A análise petrográfica visou avaliar o comportamento tecnológico das rochas com foco em seus aspectos ou parâmetros composicionais como mineralogia, percentual de minerais, textura, tamanho absoluto ou relativo, forma, relação de contato entre cristais, tipo e grau de alterações ou de microfissuras, entre outros.

A interpretação das análises petrográficas foram assistidas por estudante do curso de geologia, bolsista do projeto intitulado Geologia, mineralogia e caracterização tecnológica do minério no depósito do granito Madeira e em planta piloto, com vistas à exploração de ETRP na mina Pitinga (AM). Avaliação do potencial para ETRP de granitos análogos na Província Estanífera de Goiás, vinculado ao IGEO/UFRGS sob supervisão do professor Dr. Artur Cezar Bastos Neto. A caracterização petrográfica das massas obtidas em cada estágio visou a identificar os minérios nas massas onde elucidação está consoante aos resultados obtidos.

A descrição petrográfica foi realizada em pelo menos uma amostra de cada estágio para avaliar a presença da xenotima, indicadora de elementos de terras raras, e outros minerais. Esta análise também ajudará a visualizar se as massas dos últimos estágios podem ter xenotima ou gagarinita. Para este teste foram usadas lâminas delgadas que foram confeccionadas no Instituto de Geociências (IGEO) da UFRGS.

O corte das lâminas foi realizado com serra elétrica, de fabricação AVA, para rochas semipreciosas usando disco diamantado irrigado com água. As dimensões finais como largura, comprimento e espessura das lâminas foram tomadas em 20 mm x 60 mm x 1 mm seguido

polimentos com abrasivo de carbetto de silício (1° com grão 320 e 2° com grão 1000). As lâminas de rochas foram impregnadas em resina GY279 catalisada com Hy951Br e coladas no vidro para polimento abrasivo com grão n° 1500. A descrição das lâminas foi feita sob luz natural e transmitida com auxílio de microscópio binocular Leica DMLP.

### 3.5. ANÁLISE DE MASSA ESPECÍFICA

Os testes com multiplicnômetro a gás foram realizadas no LAPROM/UFRGS teve por finalidade verificar a massa específica de um material adotando o princípio de Arquimedes, onde o deslocamento de um determinado volume do fluído é equivalente ao volume de um material que fora submergido. Nesta ótica, o deslocamento do fluído é um gás que pode penetrar nos poros finos para assegurar a máxima precisão. Por essa razão, o fabricante do equipamento recomenda usar o gás hélio por ter a capacidade de penetrar os microporos ou fissuras de uma da partícula com magnitude de até  $1 \text{ \AA}$  ( $10^{-10} \text{ m}$ ).

O princípio que rege a medida da massa específica (densidade real) de uma dada amostra está fundamentado na diferença de pressão de uma quantidade conhecida de hélio, permitindo fluir de um volume de referência conhecido, para dentro de uma célula com uma amostra sólida ou em pó. Dessa maneira entende-se que para encontrar o valor da massa específica é necessário conhecer o volume partícula ( $V_p$ ) dentro da célula, o volume de referência ( $V_r$ ), o volume da célula ( $V_c$ ) e a pressão ambiente da célula ( $P_n$ ) escrita na Equação 18, tomando a umidade e temperatura do ambiente como parâmetros que influenciam no resultado da leitura.

$$V_p = V_c - V_r \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right) - 1 \right] \quad (18)$$

Para execução dos testes usou-se o picnômetro a gás modelo MUP-5DC (ver Figura 33) usando gás hélio que dispõe de três células porta amostras (pequena, média e grande) acomodadas na câmara de pressão. As amostras foram obtidas das lascas de lâminas petrográficas com tamanho de partícula entre 5 mm a 1 cm para serem acondicionadas na célula de tamanho médio do multiplicnômetro. Os testes de análise de massa específica foram realizados em todas as partículas consoante sua localização no lote de cada massa.

Figura 33. Multipicnômetro com identificação de comandos, câmara e cilindro de gás hélio.



1. Botão liga/desliga;
2. Leitor digital de pressão;
3. Controle para monitorar o valor digital;
4. Câmara para célula e amostra;
5. Indicador da posição das Válvulas I e II;
6. Válvula I;
7. Válvula seletora de referência;
8. Válvula II;
9. Válvula de entrada de gás;
10. Controle do fluxo de entrada de gás;
11. Válvula de saída de gás;
12. Controle de fluxo da saída de gás;
13. Cilindro de gás hélio.

Fonte: Instruments, 2002

Neste teste foram analisadas as 42 peças submetidas ao *scan* de sensor ótico e de DE-XRT respeitando a obtenção das peças em cada massa dos respectivos estágios. O cálculo efetivo para determinar a densidade deve obedecer às condições de operação considerando o volume de calibração da célula média escrita pela Equação 19.

$$V_{r\ c\ média} = \frac{V_{c\ grande}}{\left[\left(\frac{P_{1r\ média}}{P_{2c\ média}}\right) - 1\right]} \quad (19)$$

Em que:

$V_{r\ c\ médio}$ : Volume de referência da célula média;

$V_{c\ grande}$ : Volume de referência da célula grande;

$P_{1r\ média}$ : pressão de referência da célula média;

$P_{2c\ média}$ : pressão da célula média.

Posteriormente, a Equação 20 permite determinar precisamente a massa específica ( $\rho_{me}$ ) da partícula usando apenas a massa da amostra ( $m_{(g)}$ ) em razão do volume da partícula ( $V_p$ ), dado em  $cm^3$ , dentro da célula usada.

$$\rho_{me} = \frac{m_{(g)}}{V_p(cm^3)} \quad (20)$$

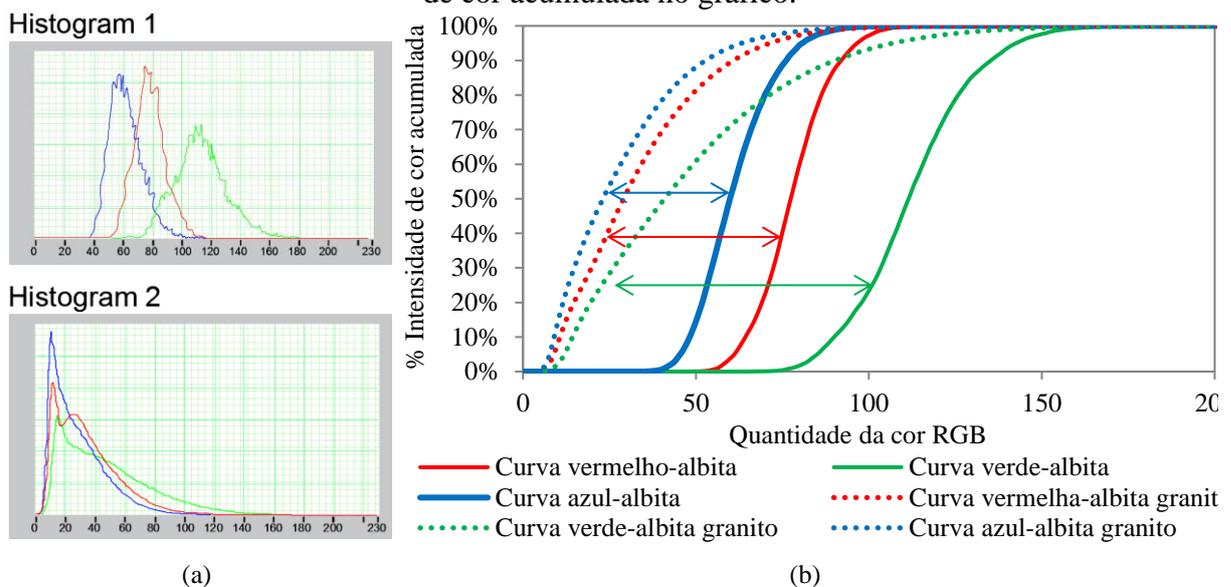
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes realizados com as amostras da mina de Pitinga compreendem as análises de dados do *scan* no equipamento *sorting*, bem como a análise química multielementar das partículas. As amostras de minérios portadores de ETR na fração entre -10 mm +5 mm foram submetidas ao *scan* assistido por sensor óptico e DE-XRT.

### 4.1. SCAN COM SENSOR ÓPTICO

A afinidade ao *scan* assistida por sensor de imagem CCD, contemplou o lote em estudo, onde foi submetido em todas as amostras fornecidas pela mina de Pitinga. Os dados com os ajustes de calibração revelam os espectros de ondas eletromagnéticas, sensíveis à visão nas cores em RGB (*red*, *green* e *blue*, em português: vermelho, verde e azul). Na Figura 34-a, onde pode se analisar o histograma 1, reproduz claramente a distribuição da quantidade de cores (RGB) da rocha albitizada relacionada tida como rejeito, evidencia a possibilidade de rejeitá-las seletivamente das demais rochas, aqui intituladas apenas de albita granito. Já no histograma 2, onde reproduz o comportamento da distribuição de cores (RGB) para as partículas que não seriam rejeitadas no processo, apresentou um deslocamento de cores tendendo a valores de quantidade de cor menores.

Figura 34. Comportamento das curvas do RGB nos histogramas e percentual da intensidade de cor acumulada no gráfico.



Assim, fica clara a leitura nos histogramas 1 e 2 que é possível detectar partículas albitizadas para separá-la das demais peças presentes no lote. Essa rejeição se torna viável se considerar um limite, na escala de cor calibrada, com os valores no vermelho (R) entre  $\pm 15$  a 50, de  $\pm 20$  a 70 para o verde (G) e de  $\pm 15$  a 40 para a cor azul (B), nas curvas Gaussianas para

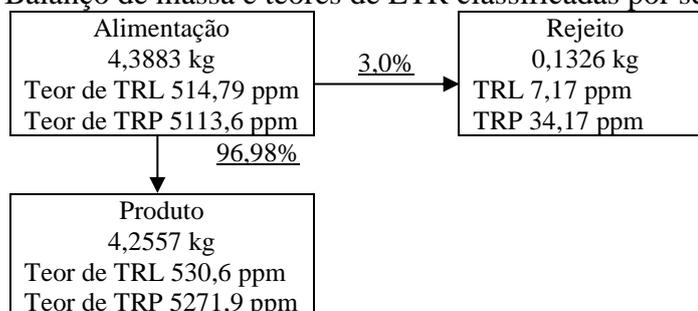
o RGB. Como reafirmação da interpretação dos valores expostos nos histogramas, o gráfico da Figura 34-b ilustra a interpretação dos valores percentuais da intensidade de cores acumuladas nas abscissas, em função da quantidade de cor no eixo das ordenadas.

Neste entendimento, as áreas apontadas pelas flechas correlatas a suas respectivas cores, ainda na Figura 35-b, revelam os valores para estimar o limite de corte seletivo tomando a cor refletida associada a um valor percentual da intensidade dessa cor por limites de área das partículas. Coesamente a aplicação dos parâmetros adotados assegura uma seletividade pelo *scan* de imagem para rejeitar rochas albitizadas. Obviamente a maximização da tecnologia se comporta com menor imperfeição para detecção, quando esses limites percentuais da intensidade de cor estiverem próximos dos valores que tangenciam as curvas exponenciais ajustadas com os padrões pré-existent das partículas que se deseja rejeitar ou não.

Praticamente esses valores remetem em apenas um estágio intitulado de *sorter* 1 assistido por sensor de imagem com a *Camera Basler L301kc – colour line scan* e suas respectivas características já ponderadas anteriormente. Portanto, os testes no lote em tela usando a tecnologia SBS sugeriram que a rejeição de partículas, cujas características apresentam cores (RGB) semelhantes as curvas de calibração do histograma 1, rejeite apenas rochas albitizadas.

Os valores de balanço de massa do lote submetido ao *scan* de imagem e seu percentual de recuperação evidenciam a relação com a massa de alimentação, produto e o rejeito, reafirmando a sugestão do parágrafo anterior, revelando a afinidade do sensor *Camera Basler L301kc – colour line scan* para detectar apenas rochas albitizadas. Nos resultados, as terras raras foram divididas em duas classes, TR leves (La ao Eu) e pesadas [Gd ao Lu mais Y – (IUPAC, 2008)], os valores no fluxograma da Figura 35, reproduzem os teores que o sensor detectou nas partículas de albita, entendida aqui como rejeito existente da massa global.

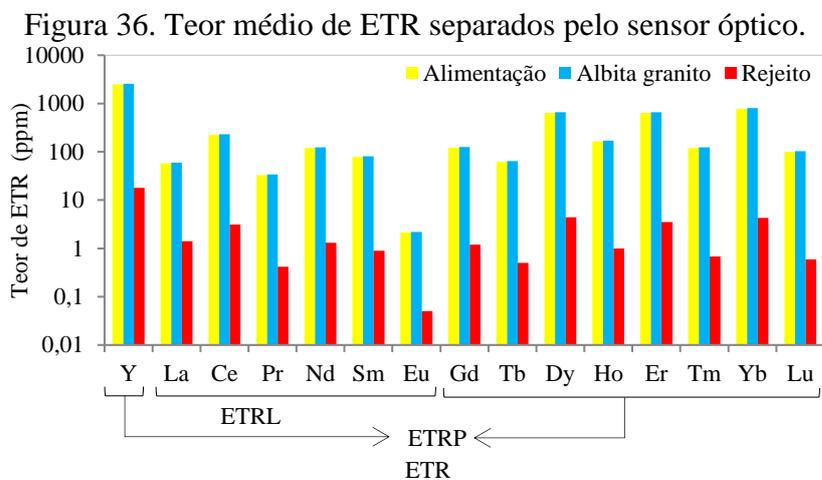
Figura 35. Balanço de massa e teores de ETR classificadas por sensor óptico.



A recuperação mássica de 3,0% é um valor que pode ser inexpressivo para considerar que houve rejeição de contaminantes devido sua representatividade não ser tão relevante. Por

outro lado, deve-se aceitar a detecção como um evento positivo devido ao fato de que mais de 96% dessa massa, composta de albíta granitos, foram evitadas como rejeito, mostrando que não houve perdas de partículas portadoras de ETR. Assim, seria impreciso admitir que este sensor pode separar partículas que sejam portadoras de ETR, usando a cor como parâmetro de seletividade, mas a fácil detecção de partículas albitizadas, pode ser detectada e removida da massa global, quando o espectro eletromagnético sensível a visão for igual ou semelhante as curvas do histograma 1, na Figura 35-a, apresentada anteriormente.

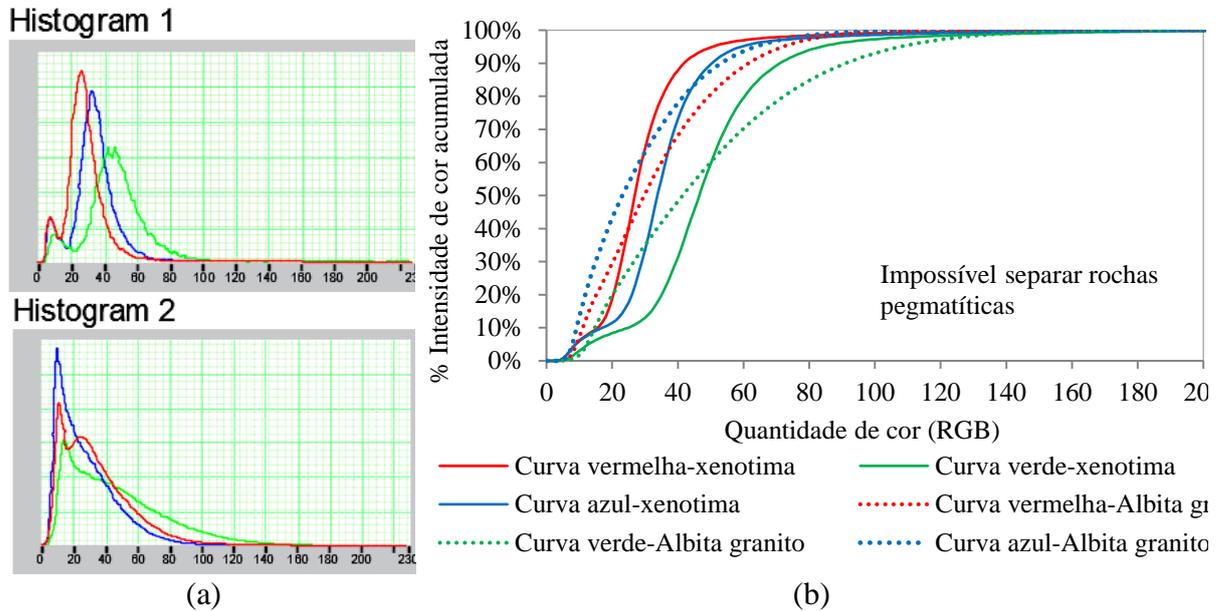
Com essa observação, a massa tida como produto no fluxograma consta os valores de teores com aproximadamente 97% da massa de alimentação, deixando os teores de Y e dos ETR leves e pesados, semelhantes aos teores da alimentação. O Rejeito tem inexpressivo teor de ETR e massa do produto. O gráfico da Figura 36 revela o comportamento dos teores de ETR totais entre a alimentação, produto (albíta granito) e rejeito mostrando que praticamente os valores são inexpressíveis para separar rejeito visto que representa menos de 1% em todo depósito (Taboca, 2017). Em contraponto, percebe-se que os valores dos teores entre a massa de alimentação e a massa do produto são pouco alteradas.



O segundo teste foi calibrado para investigar a afinidade do sensor de imagem na detecção de rochas ricas em xenotimas. Desta forma, o sensor óptico teve sua calibração configurada com as melhores condições que atendessem a detecção das partículas portadoras de ETR (ricas em xenotima). Após todos os ajustes de cores RGB e variação dos percentuais de tolerância de cores nos *pixels*, notou-se que os índices de reflectância do espectro eletromagnético sensível a visão, para as rochas ricas em xenotima, é muito semelhante as demais amostras da massa, confirmando a pouca afinidade do sensor óptico na detecção seletiva de rochas ricas em xenotimas. Essa imperfeição é fundamentada nas curvas Gaussianas, dos histogramas: 1 que ilustra a calibração das cores RGB para separar rochas mineralizadas com

xenotima (ETR) e 2 para rochas que não apresentam xenotima ou estejam albitizadas na Figura 37-a.

Figura 37. Histogramas e gráfico nas cores RGB em função do percentual da intensidade de cor no sensor DE-XRT.



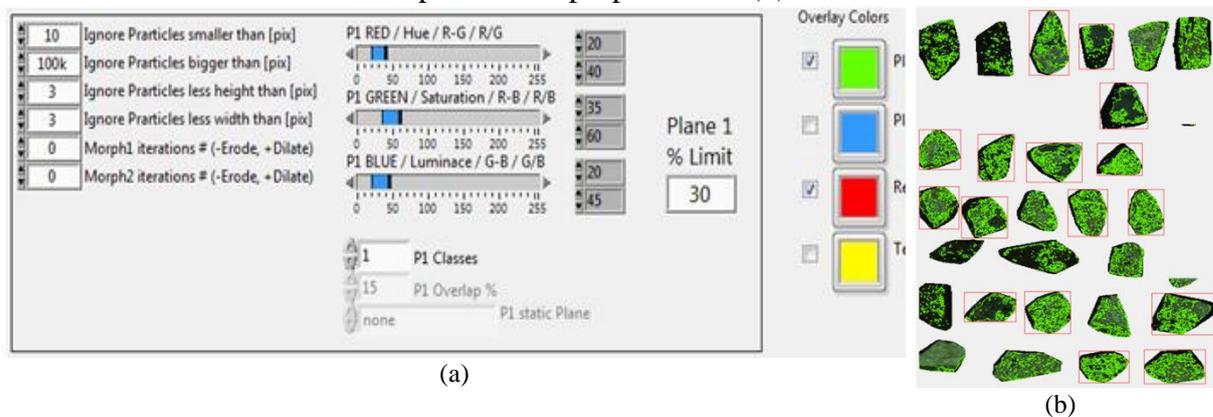
Neste entendimento, o aumento da quantidade de cor (RGB) se interceptam mais de uma vez quando o percentual de intensidade de cor acumulada aumenta. Este comportamento é refletido no gráfico da Figura 37-b devido ao espectro de onda da cor emitida pela superfície das rochas albita granito, *premium e super-premium*, apresentarem as características de cor semelhantes para toda massa global. Como resultante da detecção há uma imperfeição da leitura do sensor para detectar partículas com xenotima para esta condição.

Sob uma outra ótica, quando os valores das cores RGB são plotados em um gráfico, adotando o percentual de cor acumulada no eixo das ordenadas, em função da quantidade de cor (RGB) no eixo das abscissas (ver Figura 38-b), é possível notar que as curvas do gráfico se interceptam em pelo menos um ou dois pontos. Este comportamento do gráfico é reflexo do comportamento do espectro de luz emitida pela superfície das rochas onde é notória a semelhança na massa global, pelos dados de calibração. Para que houvesse permissividade de detecção, seria necessário que houvesse pelo menos um deslocamento de área maior das as cores RGB entre as amostras estudadas no eixo das abscissas.

A Figura 38-a ilustra as melhores condições de limites das cores RGB proposta para detectar as rochas com mineralização de xenotima e, na Figura 38-b, reflete a seletividade da partícula, nas caixas vermelhas, que apresenta características que atendem aos limites de

detectabilidade para capturar as massas submetidas ao *scan* no sensor *Camera Basler L301kc – colour line scan*.

Figura 38. Limites de cores RGB para detectar xenotima (a) e exemplo de seletividade com os parâmetros propostos em (b).



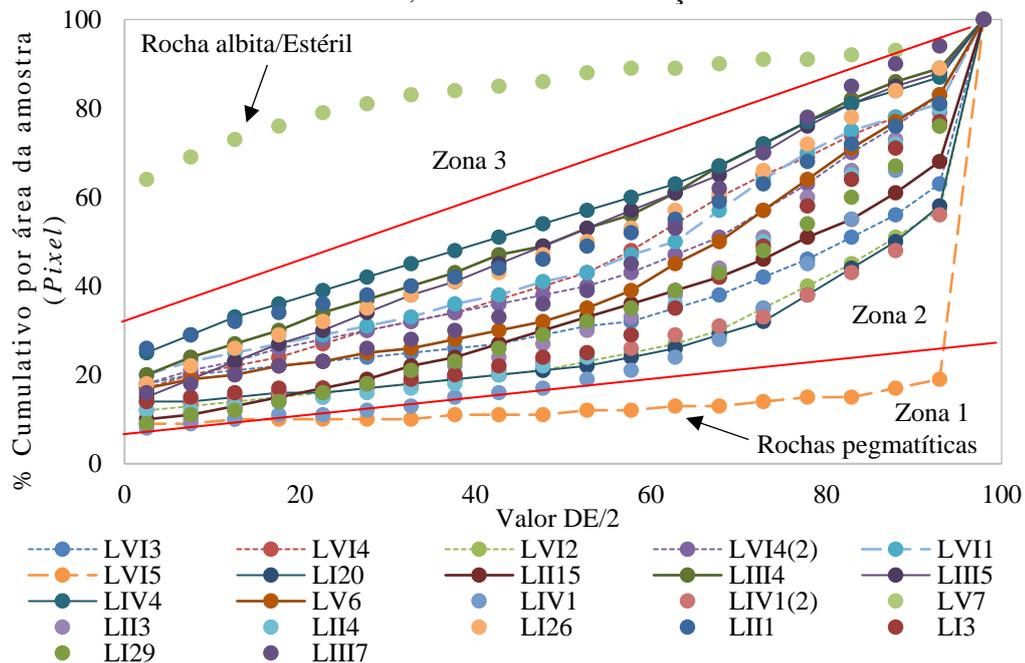
Observando a imagem da Figura 38-b é possível notar que tanto as rochas pegmatíticas e portadoras de ETR no topo da imagem são selecionadas por caixas vermelhas aleatoriamente mostrando que tanto as rochas AGN, AGB e outras são detectadas também por caixas vermelhas. Fica claro então que as rochas albitizada na parte inferior da imagem também são selecionadas aleatoriamente junto com as demais rochas do albita granito comum. Como pode ser notado, o resultado da detecção ocorreu de forma aleatória, com a configuração ajustada para separar partícula mineralizada com xenotima, reafirmando que o sensor gera imagens de detecção com imperfeições, devido as condições das propriedades de reflectância do espectro eletromagnético emitida pela superfície das partículas.

#### 4.2. SCAN COM SENSOR DE-XRT

A afinidade ao *scan* do sensor DE-XRT foi testada para investigar a detecção de partículas ricas em xenotimas, que teriam maior aptidão em ser portadoras de ETR leves e pesadas. Dessa maneira as propriedades de densidade equivalente das amostras, a detecção ocorreu para aquelas que tendem a cor RGB amarela. Ou seja, as partículas com maior densidade equivalente registram a maior atenuação de energia dos raios-x.

O gráfico, da Figura 39, ilustra a quantidade percentual de cor acumulada por área da partícula em *pixels*, em função da quantidade de cor relativa em RGB correspondente a densidade equivalente (DE) das partículas de calibração, ora quantificadas pelos níveis de energia do sensor DE-XRT. Neste sentido, quanto maior for a densidade equivalente de uma partícula, menores serão os valores percentuais acumulados de *pixels* por área da imagem mapeada no eixo das ordenadas.

Figura 39. Valores de atenuação da dupla energia equivalente tratada pelo *software* Comex-CXR e, amostras de calibração.



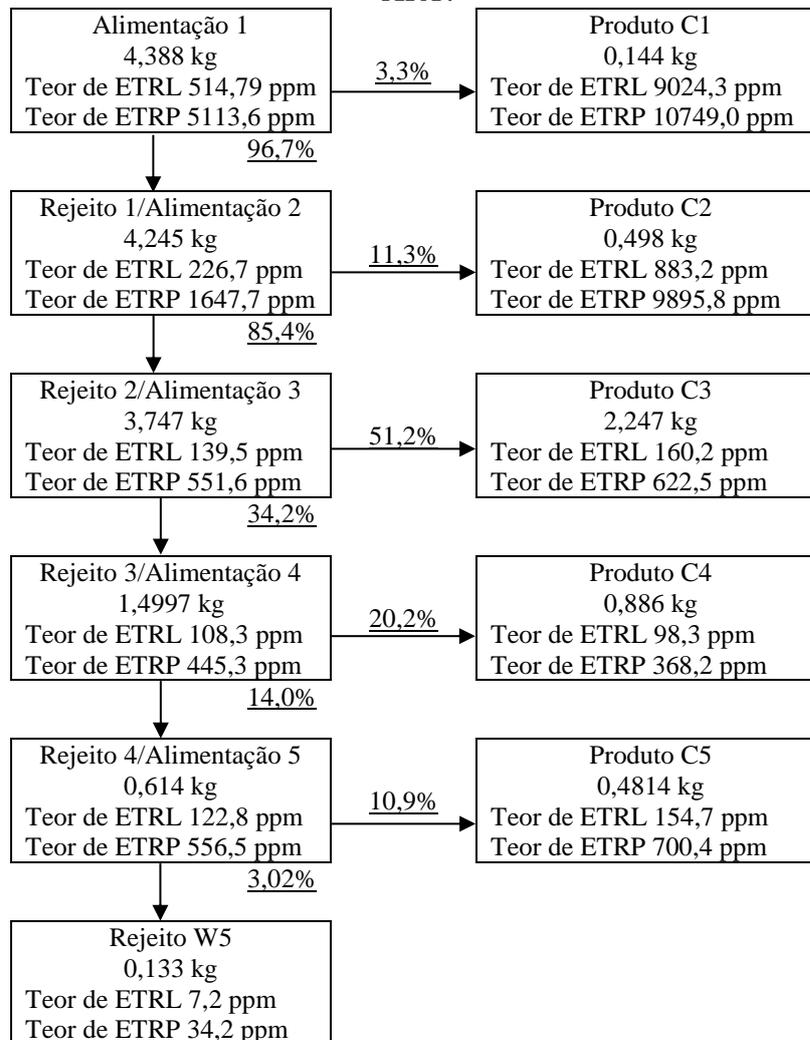
Dessa maneira, sob uma visão macroscópica, a identificação das rochas ficou simples de entender que o acúmulo da menor quantidade de *pixels* por área no eixo das ordenadas apresentam maior densidade equivalente. Ainda no gráfico acima, o registro dos *pixels*, se refletido com níveis de energia atenuada, mostra que o sensor DE-XRT detecta, com base na propriedade física de densidade equivalente/*bulk*, evidência três zonas distintas de amostras, a saber: o grupo da zona 1 é possível detectar partículas que apresentam maior densidade equivalente; o grupo da zona 2 é possível detectar partículas com intensidade intermediária; e, o grupo da zona 3 que apresenta partículas com densidade equivalente inferior às demais. Nesta perspectiva é possível maximizar o processo de separação para retirar partículas que tenham maior densidade *bulk* sendo consequentemente onde há maior presença de elementos pesados de interesse presente na massa global.

Como resultado dos testes de detecção realizados para separar partículas ricas em xenotima, partículas com maior teor de ETR, que por sua vez, são as de maior densidade, foi possível explorar os parâmetros de detecção para comprovar a afinidade do sensor DE-XRT, permitindo separá-las seletivamente apontando o maior teor de ETR leves e pesadas nos estágios seguintes.

O fluxograma da Figura 40 elucidada os estágios da separação, onde a partir da alimentação, mostra que o equipamento separou no primeiro estágio e gerou um rejeito que se tornou a alimentação da próxima separação, cujos estágios se repetiram com a mesma

metodologia, até a obtenção do rejeito 5 indicando os valores de teores dos elementos de terras raras leves (ETRL) e pesadas (ETRP) a partir dos dados de análise química obtidos do laboratório Actlabs – *Activation Laboratories Ltd* disponível no Anexo A.

Figura 40. Distribuição de massa e teores dos ETR das partículas detectadas por sensor DE-XRT.



No primeiro estágio, o *sorter* obteve no C1, aproximadamente 3,3% de massa de 4,4 kg alimentada, elevando o teor de ETRP de aproximadamente 5,1 mil ppm para mais de 10 mil ppm, comparado aos 514 ppm para 9 mil ppm de ETRL. No segundo estágio, aproximadamente 4,2 kg da massa rejeitada, ou seja, 96,7% dessa massa se torna a segunda alimentação com resultado mostrando que o sensor DE-XRT recuperou 11,3% da massa da alimentação com teor de ETRP acima de 9 mil ppm e 883 ppm de ETRL. Nos estágios seguintes a separação de ETRP foi maior que 600 ppm, 300 ppm e 700 ppm, já nas massas de produtos C3, C4 e C5 enquanto que para os ETRL esses ganhos foram de 160, 98 e 154 ppm respectivamente.

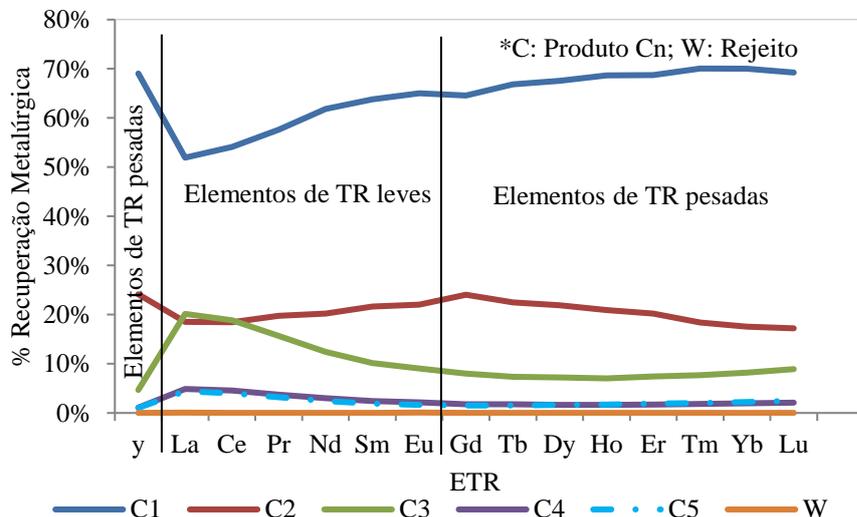
Os dados de recuperação metalúrgica apresentada na Tabela 6 mostram o quanto promissor é a aptidão do sensor na detecção das partículas portadoras de ETR, pois os valores de recuperação metalúrgica detalhados em cada estágio são expressos para cada elemento ETRL e ETRP. Tendo a alimentação com 100% dos ETR no primeiro para estágio, o sensor DE-XRT recuperou em média mais 60% desses elementos leves (ETRL, com exceção do La, Ce e Pr) e pesados (ETRP) e no segundo estágio para obter C2 a recuperação metalúrgica foi maior que 20%.

Tabela 6. Recuperação metalúrgica dos ETR detectados pelo sensor DE-XRT.

Tipo	ETRP Elementos de terras raras leves							Elementos de terras raras pesados - ETRP								
	Elemento	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Unidade	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Alimentação 1 (ROM)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
C1	69	52	54	58	62	64	65	65	67	68	69	69	70	70	69	
Rejeito 1/Alimentação 2	31	48	46	42	38	36	35	35	33	32	31	31	30	30	31	
C2	24	19	18	20	20	22	22	24	23	22	21	20	18	18	17	
Rejeito 2/Alimentação 3	7	30	27	23	18	15	13	11	11	11	10	11	12	12	14	
C3	5	20	19	16	12	10	9	8	7	7	7	7	8	8	9	
Rejeito 3/Alimentação 4	2	9	9	7	5	4	4	3	3	3	3	4	4	4	5	
C4	1	5	5	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Rejeito 4/Alimentação 5	1	5	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
C5	1	4	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Rejeito W5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

O gráfico, da Figura 41, expressa o comportamento do percentual de recuperação metalúrgica dos ETRL com o ítrio mais os ETRP em cada uma das massas obtidas (C) e do rejeito final (W) deixando com maior evidência a composição dos valores da tabela anterior.

Figura 41. Recuperação metalúrgica dos ETR leves e pesados detectados pelo sensor DE-XRT.



Considerando os teores médios para ETRL e ETRP pode-se notar que aproximadamente 52% a 65%, 19% a 22% e de 20% a 9% foram as recuperações metalúrgicas para os ETRL (La ao Eu) nos estágios de separação para os produtos C1, C2 e C3. Quanto à recuperação metalúrgica para os ETRP, os valores oscilaram entre 65% a 70%, 24% a 17% e de 8% a 9%, também nos estágios de C1, C2 e C3, mostrando o potencial do sensor para detectar mineralizações portadoras dos elementos em estudo.

Nesta ótica, uma avaliação da recuperação metalúrgica acumulada, onde é possível quantificar os percentuais de ETRL e ETRP, das massas tidas como produtos pelo sensor DE-XRT permite apontar o produto C3 como o melhor estágio para detecção, se desejável for evitar parte dos elementos metálicos e deletérios. A Tabela 7 proporciona o entendimento dos valores de teor, teor acumulado, recuperação metalúrgica e recuperação mássica acumulada para cada estágio de separação assistido pelo sensor de DE-XRT. Os resultados mostram que o terceiro estágio seria sugerido com o limite de detecção para o sensor em estudo separar o material com recuperação metalúrgica de 94% e 96% para os ETRL e ETRP, onde aproximadamente 66% da massa seria recuperada cuja limitação na linha vermelha da tabela estão demarcando claramente a ponderação amparada pelos valores.

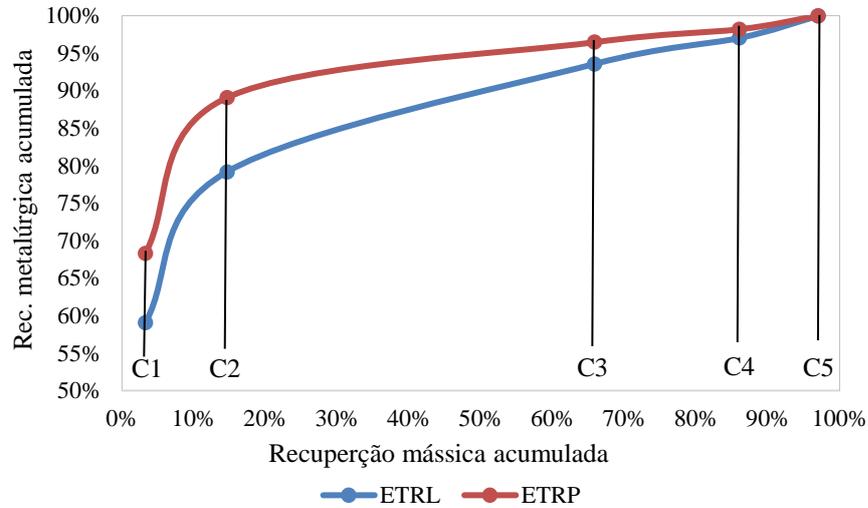
Tabela 7. Teor acumulado, recuperação metalúrgicas e mássica acumulada em cada produto.

	Teor (ppm)		Teor acumulado (ppm)		Recuperação Metalúrgica Acumulada		Recuperação Mássica acumulada
	ETRL	ETRP	ETRL	ETRP	ETRL*	ETRP*	
C1	9024,3	107490,0	9024,3	107490,0	59%	68%	3%
C2	883,2	9895,8	9907,5	117385,8	79%	89%	15%
C3	160,2	622,5	10067,8	118008,3	94%	96%	66%
C4	98,3	368,2	10166,0	118376,5	97%	98%	86%
C5	154,7	700,4	10320,7	119076,8	100%	100%	97%

\*ETRL: Elementos de terras raras leve; \*\* ETRP: Elementos de terras raras pesado

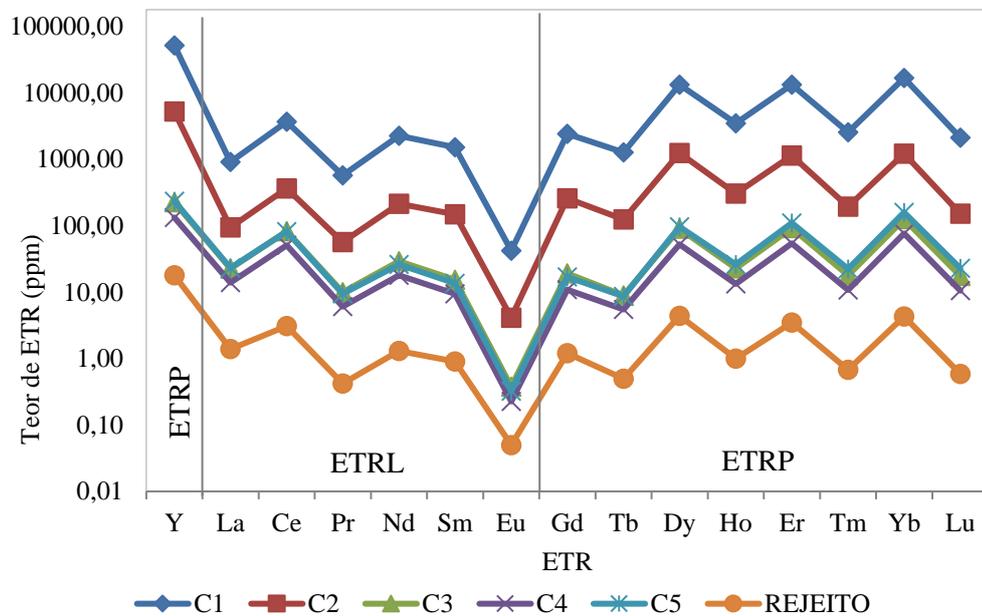
O gráfico da Figura 42 ilustra o comportamento da recuperação metalúrgica acumulada em função do aumento da massa recuperada entre o C1 e C5. A curva do gráfico evidencia uma baixa recuperação mássica no primeiro estágio, mas o teor de aproximadamente 60% (ETRL) e 67% (ETRP) são elevados. Por tanto, quando observados, como sugestão, a recuperação mássica no terceiro estágio, apresenta resultados mais satisfatórios pois os teores dos metais recuperados estão entre 94% e 96%, mostrando que o sensor de DE-XRT pode assistir à detecção de minérios portadores de ETR.

Figura 42. Recuperação metalúrgica em função do ganho de massa recuperada.



Um outro ponto bastante notório, vai ao encontro com a citação de Bastos Neto *et al.*, (2014) e a informação citada na apresentação da (Taboca, 2017) no IV Seminários de Terras Raras, reafirmando os teores médios, obtidos pela análise química multielementar – ICP, dos ETRL e ETRP (ver Figura 43) obtidos em cada massa obtida como produto neste trabalho evidencia que os ETRP estão mais presentes no depósito de Pitinga do que os ETRL.

Figura 43. Distribuição dos teores dos ETRL e ETRP nos produtos.



Um outro fator que contribuiu para este trabalho foi interpretação exploratória que permitiu avaliar a afinidade do sensor DE-XRT em detectar seletivamente as partículas portadoras de ETR para remover, ou não, partículas promissoras em Sn, Ta, Nb e Zr (metais) e em partículas deletérias como a torita (Th) e os pirocloro ou zircão que transportam o U-Pb

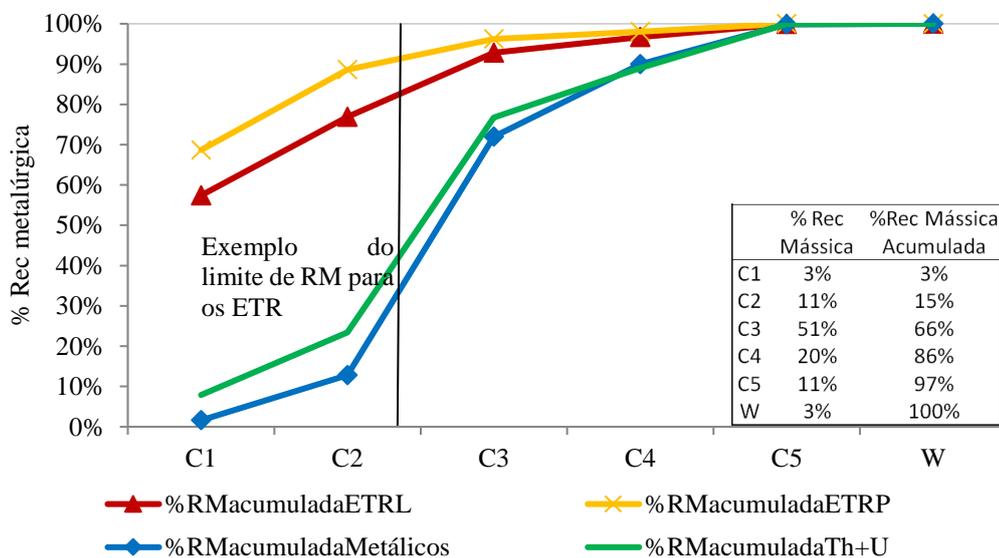
(Bastos Neto *et al.*, 2010). Os valores expressos na Tabela 8 evidenciam a relação dos teores, recuperação metalúrgica e recuperação mássica para os ETRL, ETRP, metais e Th mais U.

Tabela 8. Teores, e recuperação metalúrgica e mássica dos ETRL, ETRP, metais e Th+U.

	ETRL (ppm)	ETRP (ppm)	Metais (ppm)	Th+U (ppm)	Rec Metalúrgica Metais	Rec Metalúrgica Th+U	Rec Metalúrgica ETRL (%)	Rec Metalúrgica ETRP (%)	Rec Mássica Simples	Rec Mássica Acumulada
Feed	514,8	5113,6	7695,8	965,1	-	-	-	-	-	-
C1	9024,3	107490	3787,0	2327,0	1,6%	7,9%	57,4%	68,7%	3,3%	3,3%
C2	883,2	9895,8	7612,1	1319,7	11,2%	15,5%	19,5%	19,9%	11,6%	14,6%
C3	160,2	622,5	8884,3	1004,9	59,1%	53,3%	15,9%	7,7%	51,2%	65,8%
C4	98,3	368,16	6859,9	586,2	18,0%	12,3%	3,9%	1,8%	20,2%	86,0%
C5	154,7	700,36	6974,4	960,7	9,9%	10,9%	3,3%	1,9%	11,0%	97,0%
W	7,2	34,17	307,4	29,5	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	3,0%	100,0%

Assim sendo, a Tabela acima deixa clara que a massa recuperada nos produtos C1 e C2 recupera metalurgicamente mais de 70% dos ETRL e ETRP com baixa recuperação metalúrgica de metais (Sn, Ta, Nb e Zr) e Th+U até ao rejeito (W). De maneira conexa, a exploração dos dados de recuperação metalurgia acumulada dos ETRL com ETRP correlatas a recuperação metalúrgica acumulada dos metais, Th e U está claramente evidenciado na Figura 44.

Figura 44. Recuperação metalúrgica acumulada dos ETRL, ETRP, metais, Th e U.



\*RM: recuperação metalúrgica; ETRL: elementos de terras raras leves; ETRP: elementos de terras raras pesadas

A justificativa mais coesa para a detecção/separação ser distinta entre os ETR, metais, Th e U já foi citado por Bastos Neto *et al.*, (2014), quando em seu estudo sobre as gênesis das rochas albita granito no depósito de Madeira em Pitinga. Estes minérios podem ser separados seletivamente deixando claro que a mineralização do depósito consiste de cassiterita (Sn), pirocloro com columbita ( $Nb_2O_5$ ,  $Ta_2O_5$ ), zircão (Zr, Hf), pirocloro que ocorre associado ao

zircão carrega em sua composição mineralógica o U e Pb, podendo ainda estar junto ou associado a torita (Th). Assim pode-se notar que a recuperação metalúrgica desses elementos metálicos, (Sn, Ta, Nb e Zr) com os deletérios (Th+U), ocorrem como agregados replicando uma acentuada recuperação após o produto C3 no gráfico acima. Enquanto que os ETR e Y, por estarem diluídos na xenotima e gagarinita disseminada no pegmatito, ocorrerem em veios espalhados em diversos pontos do depósito, e desta forma é compreensível uma boa recuperação metalúrgica com baixos teores de dos metálicos e deletérios notado logo nos produtos C1 e C2.

Ponderadamente observa-se que é possível avaliar os estágios enfatizando uma boa recuperação metalúrgica dos ETR+Y, mas estando ciente que haverá uma baixa recuperação mássica nos produtos C1 e C2. Assim como a inversa é verdadeira, uma alta recuperação mássica pode trazer uma presença maior de metálicos e elementos deletérios somada à massa de rochas portadoras de ETR+Y.

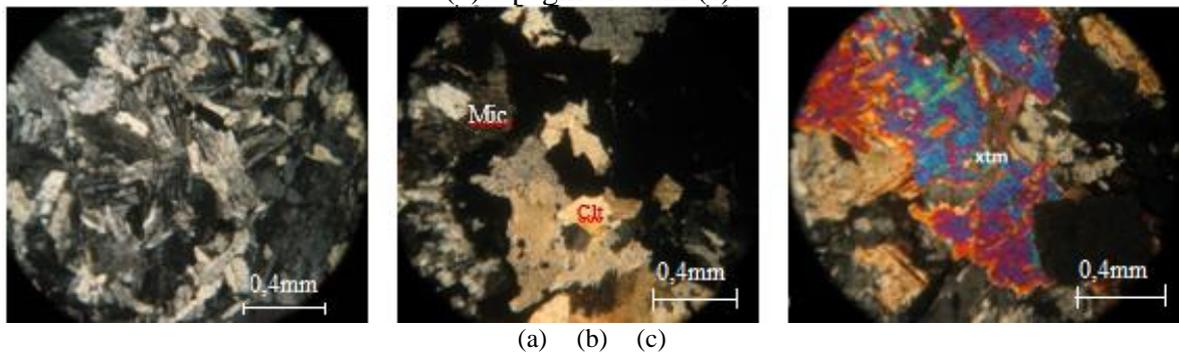
#### 4.3. ANÁLISE PETROGRÁFICA

Os dados com lâminas delgadas é uma análise qualitativa, que visou verificar a mineralogia relacionada ao comportamento mineralógico, obtidas nas massas dos produtos. Particularmente, a identificação dos minérios portadores de ETR como xenotima (ETR+Y), deletérios como a torita (Th+U), pirocloro  $(\text{Na,Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})$ , cassiterita ( $\text{SnO}_2$ ), columbita  $(\text{Fe, Mn})(\text{Nb,Ta})_7\text{O}_6$ , entre outros, estão aqui complementados pela análise petrográfica. Tendo a xenotima como principal portador de Y, este mineral recebe os ETR em sua rede cristalina realocando ou substituindo o Y, em sua matriz cristalina, por outros elementos que apresentem semelhança de raio iônico e/ou ajustes de cargas elétricas. Este fenômeno é conhecido por diadocia e justifica xenotima como portadora dos ETR para Pitinga.

Neste trabalho, olhando para os dados de detecção obtidos com o sensor ótico, de maneira conceitual, seria possível separar todas as rochas com 99% constituída de albita (rocha cuja matriz mineralógica é constituída de albitito) gerando apenas um produto e um rejeito, como já citado anteriormente. Neste entendimento, quando a luz transmitida atinge a superfície de uma partícula, as imperfeições de forma da partícula, e clivagem dos grãos na superfície da partícula provocam o espalhamento da luz, gerando áreas escuras na imagem do material, uma vez que o sensor de imagem captura apenas os raios de luz refletidos a  $90^\circ$  em escala dinâmica. Este fenômeno ocasiona a interpretação de duas ou mais cores falsas ou na emissão de cores escuras.

Neste entendimento, a homogeneização mineralógica de uma rocha totalmente albitizada permite ser facilmente detectada pelo comprimento de onda no espectro eletromagnético, sensível à visão, refletido de sua superfície justificando uma boa separabilidade conceitual como fora apontado pela Figura 34 anteriormente. As lâminas petrográficas, com aumento de 10x, mostram na Figura 45-a claramente a cor refletida por rocha albitito sob luz transmitida (rejeito); a identificação de criolita hidrotermal (clt), mica (Mic) portando flúor corrosivo e zona escura impossível de identificar (ver Figura 45-b) são imagens comuns para um albita granito; e na Figura 45-c fica bem visível a coloração verde-rosa causada pela birrefringência com presença de xenotima (xtn) na matriz de quartzo-feldspato.

Figura 45. Luz transmitida da lâmina petrográfica (10x) no albitito em (a), albita granito em (b) e pegmatito em (c).



Sob uma outra ótica, quando se faz uma análise desses dados de lâminas petrográficas para uma abordagem dos resultados obtidos com o sensor DE-XRT, entende-se que a composição mineralógica tem maior relevância do que as características de cor de superfície assumida para o sensor de imagem. Por se tratar de uma separação que se apropria das densidades equivalente sem contato físico ou químico, é esperado que as massas obtidas nos testes de separação para o C1 e C2 identifiquem os minérios portadores de ETR com maior frequência do que o C3 ao C6. Neste caso seria aceitável, para o estudo em tela, considerar os produtos C3 ao C5 como um *by-products* ricos em minerais metálicos, já explorados pela mina, rico também em mineral deletério seguido de rejeito no C6 como citado na Tabela 8 anteriormente.

Para compreender a complexidade mineralógica de Pitinga e a afinidade do sensor DE-XRT em separá-los, é possível apontar, ainda dentro do estudo de caracterização petrográfica, um resumo dos principais minerais e elementos de interesses que estão sendo explorados atualmente no depósito de Pitinga, e o seu potencial para obter possíveis *by-products* na Tabela 9. O detalhamento de todos os minérios está discriminado no Apêndice E.

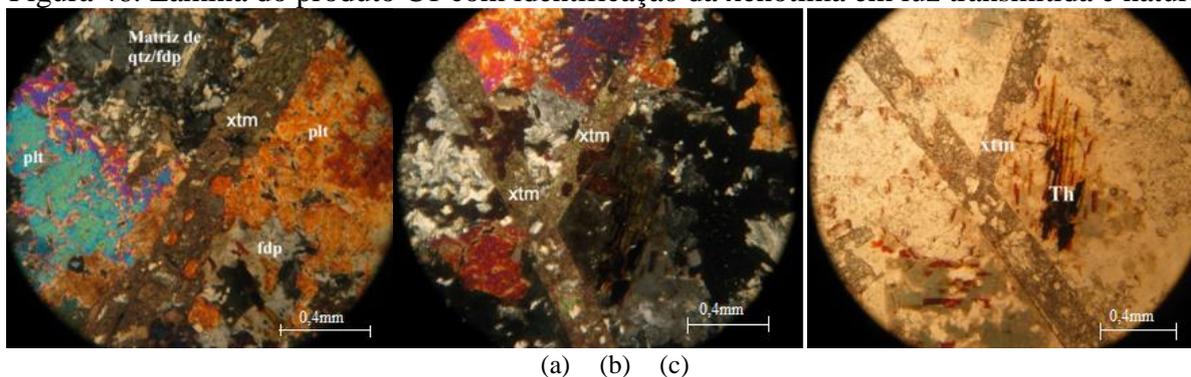
Tabela 9. Mineralogia de Pitinga resumida pelo IGEO/UFRGS.

Situação atual	Elemento de interesse	Mineral principal	Outros
Explorados	Estanho	Cassiterita	
	Nióbio e tântalo	Pirocloro (Na,Ca) $2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH},\text{F})$	Columbita $(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Nb},\text{Ta})_7\text{O}_6$
	ETR	Xenotima ( $\text{YPO}_4$ )	Gagarinita $(\text{NaCaYF}_6)$ ; Waimirita (Fluoreto de ítrio com ETRP)
Possíveis <i>by-products</i>	Zircônio	Zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ )	
	Flúor	Criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ )	Fluorita ( $\text{CaF}_2$ )
	Urânio e tório	Torita $(\text{Th},\text{U})\text{SiO}_4$	Torionita e zircão
	Lítio	Polilitionita ( $\text{KLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ )	Siderofilita e anfibólio

As massas entre os produtos C1 e C2, apresentam xenotima em abundância no contexto do albita granito, dispersa na matriz quartzo-feldspato. Nesta matriz, a albita predomina em relação ao microclínio, e em relação ao quartzo. A xenotima também se apresenta como fenocristal nas partes pegmatíticas com inclusões comuns (formada precocemente e com tamanho maior que a matriz), seja de feldspatos, criolita ou de micas, assim como pirocloro e torita. A polilitionita é comum, com clivagens preenchidas por óxidos e o zircão ocorre, em determinadas amostras, com abundância acima de 1% com o quartzo englobando a matriz.

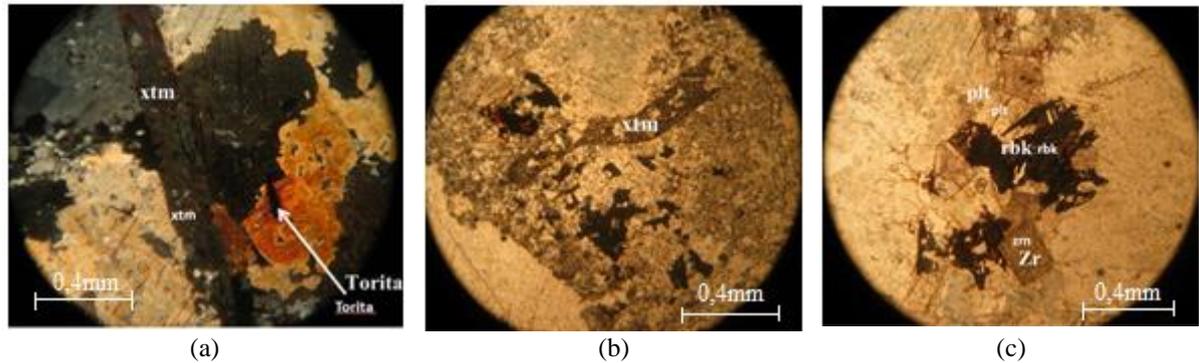
A imagem da lâmina petrográfica sob luz transmitida, ilustrada na Figura 46-a,b, identifica a mineralização de xenotima (xtm) como cristais isolados ou inter cruzados e são comuns no primeiro estágio (C1), assim como também, a presença da polilitionita (plt), feldspato (fdp), e matriz de quartzo e feldspato (qtz/fdp). No entanto quando a incidência de luz natural atinge a mesma área da imagem em (b) é possível visualizar a presença da torita (Th) sob luz natural (ver Figura 46-c).

Figura 46. Lâmina do produto C1 com identificação da xenotima em luz transmitida e natural.



No contexto que obedece a obtenção de partículas com maior aptidão em ser portador de ETR, a massa do segundo estágio (C2), além de apresentar xenotima isolada com as mesmas características do C1, é muito frequente sua presença dentro da polilitionita (plt), com pouca presença de torita (Th) (ver Figura 47-a,b). Os minérios de zircão (Zr), reibeckita (rbk), polilitionita albita e quartzo passam a serem mais frequentes do que no C1 (ver Figura 47-c). Neste entendimento a presença frequente da xenotima nestas massas C1 e C2 justificam os elevados teores de ETRL e ETRP.

Figura 47. Lâmina do produto C2 com identificação da xenotima em luz transmitida (a) e natural em (b) com outros minerais na luz natural em (c).

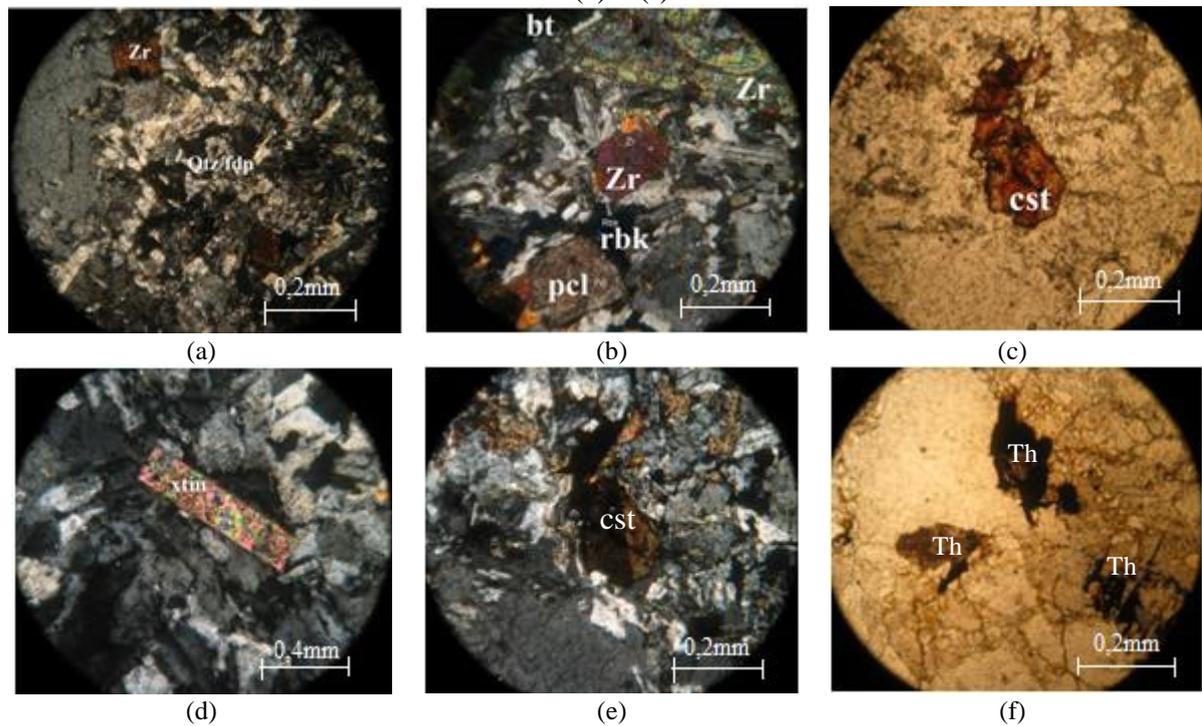


Em geral, as massas obtidas entre os produtos C3 a C5 apresentam o albita granito com textura inequigranular, composta por uma matriz de granulometria média, quartzo-feldspato (fdp), com a albita predominando em relação ao microclínio e ao quartzo (ver Figura 48-a), englobando os minerais da matriz. Os fenocristais de feldspato estão comumente alterados para argilas brancas e corroídos, indicando que houve um evento de hidrotermalização.

A presença de partículas com mineralização agregada constituída basicamente por zircão (Zr), biotita (bt), flúor (Fl), pirocloro (pcl), riebeckita (rbk), são mais frequentes entre os produtos C3, e ao C5 onde as litologias do quartzo e feldspato albitizados são mais comuns. A polilitionita comum, cuja ocorrência é tida como produto de alteração da biotita, aparece corroída. A criolita é comum abundante e está corroendo os minerais da matriz, mas é pouco abundante e intersiticial aparecendo disseminada.

O zircão (Zr) e o pirocloro (pcl) columbitizado aparecem com muita frequência nas rochas entre o C3 ao C5. A riebeckita (rbk) e biotita (bt) tem abundância variável, desde sem ocorrência até abundância de aproximadamente 5% (ver Figura 48-b). A cassiterita (cst) aparece com grão esparsos e localizado com maior frequência (ver Figura 48-c).

Figura 48. Lâminas dos produtos C3 ao C5 com luz transmita em (a), (b), (d), (e) e luz natural em (c) e (f).



A xenotima (xtm) ainda aparece nas massas entre C3 e C5, mas em quantidades muito inexpressivas (ver Figura 48-d). Esta existência está correlacionada aos fenômenos geológicos que carrearam a xenotima para estar inclusa na matriz de quartzo e feldspato justificando os baixos teores de aproximadamente 160 ppm para o ETRL nas massas dos produtos C3 ao C5.

Além da presença de quartzo-feldspato na matriz os minerais metálicos e deletérios, passa a ter grãos maiores e aparecem com maior abundância como o caso da cassiterita (ver Figura 48-e) e da torita (ver Figura 48-f). A presença desses minerais metálicos e deletérios entre as massas de produto C3 ao C5, justifica os maiores teores de Sn, Ta, Nb, Th e U, mostrando que o sensor DE-XRT tem potencial para detectar e separar os minérios portadores de ETR dos demais ricos em metais com Th e U associados.

#### 4.4. MASSA ESPECÍFICA

Nesta seção serão adotados os dados de atenuação média de energia do material estudado, para ser correlacionado aos dados de massa específica, uma vez que, quanto maior os valores de cores cumulativa por área da amostra (em unidade de *pixel*), menor será a massa específica da partícula tomando como verdadeira a sua inversa. Assim, tendo como sua máxima os valores de energia atenuada é possível afirmar que estes estão diretamente relacionados a massa específica do material.

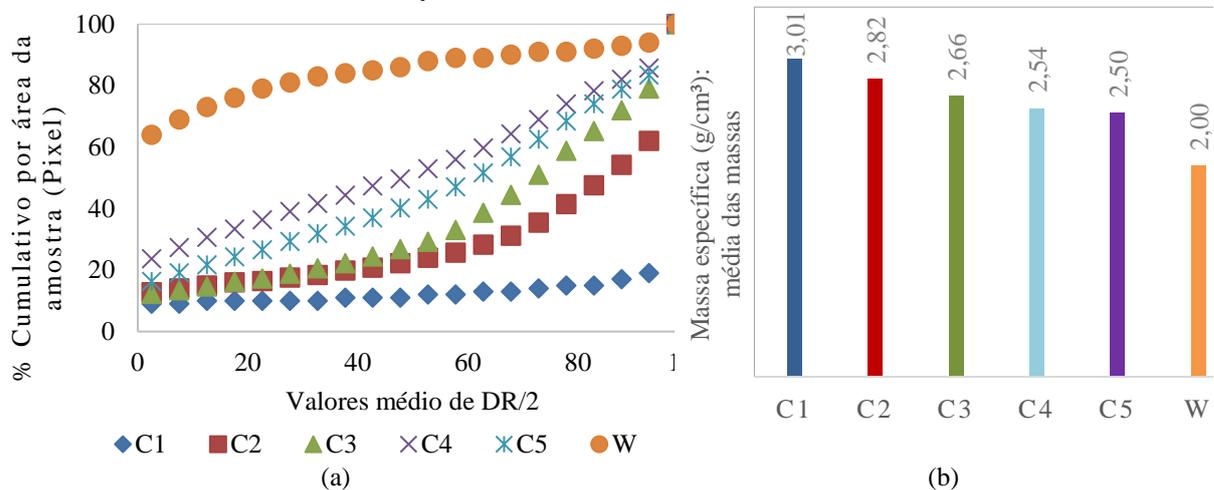
A massa específica média do material obedece aos estágios disposto anteriormente na Figura 39, onde as massas obtidas nos produtos entre o C1 e o C5 com uma massa de rejeito W expressam os valores de ETR do maior para o menor teor. Os valores exibidos na Tabela 10 confirma a viabilidade, detecção de minérios portadores de ETR por sensor de DE-XRT, pois a massa específica exhibe valor decrescente do produto “C1” ao rejeito “W” assessorando a ideia de que a detecção/separação ocorre do material de maior para o de menor densidade.

Tabela 10. Valores de massa específica dos produtos separados no sensor DE-XRT.

Produto	$\rho_{\text{médio}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
C1	3.01
C2	2.82
C3	2.66
C4	2.50
C5	2.54
W	2.00

Os valores de atenuação médio do sensor DE-XRT observada em cada massa obtida, consoante ilustração na Figura 50-a,b permite visualizar os níveis de energia do espectro de radiação atenuada usando o percentual de cumulativo de cores por área da partícula em cada *pixel*. Nesta ótica, é possível visualizar que a massa do produto em C1 apresentou a menor atenuação, justificada pelo maior valor de massa específica de 3,01 g/cm<sup>3</sup>, seguido da segunda maior atenuação, C2, onde sua massa específica média foi de 2,82 g/cm<sup>3</sup>. Até a massa do produto C3 é notada uma terceira atenuação de energia distinta das demais sustentada na massa específica média de 2,66 g/cm<sup>3</sup>. Até este ponto é possível ter uma visão clara de que a energia atenuada dos minérios portadores de ETR depende diretamente da massa específica das partículas investigadas.

Figura 49. Valores de atenuação média da dupla energia atenuada relacionada a massa específica em cada massa obtida.



No entanto, quando se observa os níveis de energia médio das massas em C4 e C5, comparando com os valores de massa específica média, é possível notar que ambas apresentam densidades praticamente semelhantes, podendo justificar ao fato dos níveis de energia atenuada média no C4 ser um maior do que o C5. Em outra ótica a massa rejeitada (W), evidenciada pela análise petrográfica como um albitito puro, apresenta a menor massa específica de todas as amostras mostrando que é possível rejeitar facilmente esse tipo de material explorando sua densidade de 2 g/cm<sup>3</sup>. Assim, é notado que os níveis de energia de calibração, mesmo constando uma zona 2 de material com energia atenuada como uma nuvem de dados, a detecção de partículas portadoras de ETR pode ser separada, e é possível, reafirmando as ponderações anteriormente discutidas sobre o gráfico da Figura 39.

## 5. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa abordou-se a afinidade de dois sensores (óptico e DE-XRT) no equipamento Comex Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D instalado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul cujas conclusões está pautada nos tópicos a seguir.

- O estudo com sensor óptico mostrou que a tecnologia tem afinidade em rejeitar seletivamente apenas partículas que tenha características de rochas albitizadas para seu espectro de cor compreendido no RGB característico. Por outro lado, quando a configuração sugerida para detectar partículas de albita granito e de xenotima, o sensor demonstrou não ter afinidade para esta detectabilidade seletiva. Desta maneira, como não há quantidade representativa de rochas albitizadas, seria presunçoso afirmar que o sensor óptico irá elevar os teores de ETR..
- O sensor DE-XRT tem potencial de afinidade para detectar seletivamente partículas ETR leves e pesadas. Uma calibração para detecção seletiva de minérios, portadores de ETR, é possível ser realizada em observação de três zonas distintas de densidade relativa mapeada pela atenuação dos níveis energia das amostras estudadas. Estas zonas de trabalhabilidade no sensor DE-XRT permite obter 4 tipos de produtos associados, possibilitando rejeitar partículas que estejam somente na zona 1, esteja na zona 1 e 2 ou sejam a zona 2 e 3 respectivamente.
- Sob o ponto de vista de recuperação mássica, o sensor DE-XRT conseguiu recuperar mais de 3% da massa com teores de ETRL maior de 9 mil ppm e para o ETRP esses teores ultrapassaram 10 mil ppm. No entanto, a maior relevância para separar com esse sensor se observa nos estágios 2 e 3, onde a recuperação mássica foi de 11,3% e 51,2% respectivamente, porém os teores de ETR leves e pesados foram de 883 ppm e 9895 ppm no produto C2 e no C 3 esses teores foram quantificados em 160 ppm e 622 ppm.
- Por outro lado, a recuperação metalúrgica mostrou que o produto C1, mesmo com menor massa, carrega a maior quantidade expressiva de ETR leves e pesadas. Mesmo assim, a recuperação metalúrgica nas massas obtidas nos estágios C2 e C3 mostraram recuperação metalúrgica de aproximadamente de 15% a 20% de ETR leves e pesados.
- Quando observado a recuperação metalúrgica acumulada do ETR nos estágios seguintes pode-se notar que o produto C1 e C2 obtiveram 79% (ETRL) e 89% (ETRP) com recuperação mássica acumulada de 15%. Entretanto, o estudo de detectabilidade do sensor mostrou ter suscetibilidade em identificar partículas portadoras de ETR em todos os estágios, mas com o estágio de produto C3 com teores acumulados de 94% e 96% de

ETR leves e pesados, deve-se notar que há uma recuperação mássica acumulada de aproximadamente 66%.

- A separação mostrou também que, além de detectar e remover partículas portadoras de ETR, é possível evitar uma recuperação metalúrgica desses elementos metálicos na ordem de aproximadamente 87% e 92% dos minérios deletérios até o segundo estágio (C2). Mas, se considerada uma configuração ajustada para remover os ETR até o terceiro estágio (C3), é possível evitar mais de 28% da recuperação metalúrgica desses metais e mais de 23% dos minérios deletérios portadores de Th+U.
- As análises petrográficas tem confirmados que as massas nos produtos C1 e C2 são portadores de minérios de xenotima, mesmo sendo sua matriz mineralógica de quartzo, feldspato e polilitionita. Nos produtos C3 ao rejeito “W” a presença de minérios como zircão, cassiterita, tantalita-columbita e torita passam a serem mais frequentes e abundantes. Essas evidências concatenam para afirmar que o sensor, além de ter separados os minérios portadores de ETR leves e pesados e mineralogia detalhada também confirmaram a afinidade da tecnologia para este fim.
- Os dados massa específica mostraram que as partículas foram detectadas da maior para menor densidade, onde a massa do C1 apresentou maior densidade com  $3,01 \text{ g/cm}^3$  alinhada com as maiores energias atenuadas, equivalente ao percentual de cores acumulados por unidade de área em cada *pixel*. Assim, as massas adjacentes aos produtos C2, C3, C4, C5 e W apresentaram massa específica decrescente de 2,82; 2,66; 2,54; 2,50 e  $2 \text{ g/cm}^3$ . Em particular os produtos C4 e C5 apresentaram massa específica semelhantes justificando uma variação para mais nos níveis de energia registradas para estes dois estágios.
- Sob uma perspectiva otimista com o minério de Pitinga, mesmo se tratando de um estudo ainda incipiente na investigação da afinidade do sensor óptico e DE-XRT para detectar minério portador de ETR, pode-se concluir que o primeiro sensor detectou apenas o espectro de onda da rocha albitizada. No que tange ao segundo sensor, pode-se afirmar que é possível detectar minérios portadores de ETR e separar no primeiro e segundo estágio, com expressiva recuperação mássica. As partículas que tem os maiores teores de ETR leves e pesados garantem que os minérios deletérios e a maior parte dos minérios metálicos não estejam dentro do processo dos ETR.

## REFERÊNCIAS

- Antoniassi, J.L., 2017. Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatítico do Brasil. Tese de doutorado, USP, São Paulo
- Agricola, G., 1556. *De re metallic libri XII.* Fourier Verlag 2003 ed. s.l.:Wiebaden.
- Alves, M. A. d. S., Pereira, V. P., Bastos Neto, A. C. & Menegotto, E., 2018. Weathering of the Madeira world-class Sn-Nb-Ta (Cryolite, REE, U, Th) deposit, Pitinga Mine (Amazon Brazil). *Journal of Geochemical Exploration*, March, Volume 186, pp. 61-76.
- Andrade, R. H. P., 2014. Terras raras. Em: T. M. Lima & C. A. R. Neves, eds. *Sumário Mineral*. Brasília: DNPM, pp. 114-115.
- Basler, 2007. *L300 L301 kc: user manual*. s.l.:Basler the power of sight.
- Bastos Neto, A. C. *et al.*, 2014. U–Pb dating of the Madeira Suite and structural control of the albite-enriched granite at Pitinga (Amazonia, Brazil): Evolution of the A-type magmatism and implications for the genesis of the Madeira Sn–Ta–Nb (REE, cryolite) world-class deposit. *Precambrian Research*, April, Volume 243, pp. 181-196.
- Bastos Neto, A. C. *et al.*, 2005. A jazida criolita da mina Pitinga (Amazonas). Em: O. J. Marini & R. A. Fuck, eds. *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: Copyrigh, pp. 481-547.
- Bastos Neto, A. C. *et al.*, 2010. World-class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira a-type granite, Pitinga Mining District. Volume 47, pp. 1329-1357.
- Bastos Neto, A. C. *et al.*, 2010. World-class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the MAadeira a-type granite, Pitinga Mining District. Volume 47, pp. 1329-1357.
- Berwanger, M. & Gaastra, M., 2014. Fields of application for sensor technologies in the raw materials industry. Em: *Sensor technologies: impulses forthe materials industry*. Aachen: Shaker Verlag, pp. 35-40.
- Berwanger, M. & Mual, A., 2014. Principles of VIS. Em: *Sensor technologies: impulses for the raw materials industry*. Aachen: Shaker Verlag, pp. 101-123.
- Bettens, A. & Lapointe, C., 1955. *Eletronic concentration of low-grade ore with the Lapointe Picker*, s.l.: s.n.

- Bogard, P., 2014. *The End of Night: Searching for Natural Darkness in an Age of Artificial*. New York: Back Bay Books.
- Burger, W. & Berge, M., 2006. *Digitale bildverarbeitung*. 1 ed. s.l.:XMedia Press.
- Burt, R. O., 1984. *Gravity concentration Technology*. 1 ed. Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo: Elsevier.
- Carlsson, C. A. & Carlsson, G. A., 1996. *Basic physics of X-ray imaging*, s.l.: s.n.
- Colborne, G., 1963. Electronic ore sorting at Beaverlodge. *Can. Mitt. Metall. Bull.*, 56(616), pp. 664-668.
- COMEX, 2016. *Laboratory sorting system MSX*. [Online]  
Available at: <http://www.comex-group.com/products-and-solutions/sorting-technology/laboratory-sorting-system-msx>  
[Acesso em 23 Mach 2018].
- COMEX, I. I. T. ®., 2018. *Comunicação pessoal*. s.l.:s.n.
- Connelly, N. G., Hartshorn, R. M., Damhus, T. & Hutton, A. T., 2005. *Nomenclature of Inorganic Chemistry*, UK: IUPAC.
- Cooper, H. R., 1976. On-stream x-ray analysis. Em: M. C. Fuerstenau, ed. *Flotation*. Salt Lake City(Utah): American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, pp. 865-894.
- Costa, C. F. d. M., 2010. *Evolução geológica da região de Pitinga (Amazonas) e suas aplicações na gênese da mineralização de Sn-Nb-Ta-F (Y, ETR, Li) associada ao granito madeira*. 1 ed. Porto Alegre: LUMI/UFRGS.
- Costa, C. F. d. M., 2010. *Evolução geológica da região de Pitinga (Amazonas) e suas aplicações na gênese da mineralização de Sn-Nb-Ta-F (Y, ETR, Li) associada ao granito madeira*. s.l.:LUME-UFRG.
- Costi, H. T., Dall'Agnol, R. & Moura, C. A. V., 2000. *Geology and Pb-Pb geochronology of Paleoproterozoic vulcanic and granitic rocks of the Piringa Province, northern Brazil*. 42 ed. s.l.:International Geology Reviews.
- Cui, H., 2015. *Beneficiation of rare earth elements bearing ancylite*. These of Master of Science - Metallurgical & Materials Engineering - in: Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School ed. s.l.:s.n.

- Dinali, G. S., 2014. *Elementos de terras raras em materiais derivados da indústria de fosfato no Brasil*. Lavras: UFLA.
- Duffy, K.-A. *et al.*, 2015. In search of the holy grail-bulk ore sorting. *Austmine 2015 Whitepaper*, 16 Feb, pp. 2-16.
- Dutra, M. & Garcia, M., 2012. *O depósito Nb-Ta de Pitinga, Amazona*. Ouro Preto, SimeXMin.
- Garcia, M., 2013. *O projeto ETR da mina Pitinga*. Brasília: s.n.
- Gill, C. B., 1991. *Materials beneficiation*. 1 ed. New Yourk: Springer-Verlag.
- Hadlich, I. W., Bastos Neto, A. C., Botelho, N. F. & Pereira, V. P., s.d. (Submitted to Ore Geology Reviews). The thorite mineralization associated with the Madeira deposit (Pitinga Amazonas, Brazil).
- Handy, R., 1918. *Hand-sorting of mill feed*, Colorado: SME.
- Haus, J., 2010. *Optical sensor: basics applications*. s.l.:Wiley-VCH Velarg GmbH & Co. KGaA.
- Haxel, G. B., Hedrick, J. B. & Orris, G. J., 2002. *Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology*. [Online]  
Available at: <https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/>  
[Acesso em 22 2017 2017].
- Hols, G. & Lomheim, T., 2011. *CMOS/CCD sensor and camera systems*. 2 ed. Winter Park: JCD Publishing.
- Hubbell, J. & Seltzer, S., 2004. *Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest*, s.l.: NIST.
- Humphries, M., 2013. *Rare earth elements: the global supply Chain*, Washington: Congressional Research Service.
- Instruments, Q., 2002. *Multipycnometer*, s.l.: s.n.
- Jaireth, S., Hoatson, D. M. & Mieзитis, Y., 2014. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews*, Volume 62, pp. 72-128.
- Jenkinson, D. e. a., 1971. *Coal sorting by X-ray transmission*, London: Instn. Min. Metall.

- Jordens, A., Cheng, Y. P. & Waters, K. E., 2013. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, Volume 41, pp. 97-114.
- Kennedy, A., 1985. Mineral processing developments at Hammaslathi. *Finland. Mitt. Mag.*, pp. 121-129.
- Ketelhodt, L. & Bergmann, C., 2010. Dual energy X-ray transmission sorting of coal. July, Volume 110, pp. 371-378.
- Kim, T.-S. *et al.*, 2013. Current Korean R&D and investment strategies in response to ree demand & supply concerns. *Proceeding of the 52nd Conference of Metallurgists (COM), Hosting by Materials Science Technology Conference (MS&T)*, 27 10, pp. 11-23.
- Klinger, J. M., 2015. A historical geography of rare earth elements: From discovery to the atomic age. *The Extractive Industries and Society*, August, 2(3), pp. 572-580.
- Knapp, H., Neubert, K., Schropp, C. & Wotruba, H., 2014. Viable applications of sensor-based sorting for the processing of mineral resources. *ChemBioEngRev*, 1(3), pp. 86-95.
- Köpcke, M., Worcholik, M. & Knapp, H., 2014. Principles of x-ray transmission. Em: K. Nienhaus, T. Pretz & H. Wotruba, eds. *Sensor technologies: impulses for the raw materials industry*. Aachen: RWTHAACHEN, pp. 54-63.
- Krishnamurthy, N. & Gupta, C. K., 2016. *Extrative metallurgical of rare earth*. 2° ed. s.l.:CRC Press.
- Lapido-Loreiro, F. E., 2013. *O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras*. 1 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI.
- Lapointe, C. & Wilmot, R., 1952. *Eletronic concentration of ore with the Lapointe Belt Picker*, s.l.: s.n.
- Lifton, J. & Hatch, G., 2015. *TMR - Technology Metals research*. [Online] Available at: <http://www.techmetalsresearch.com/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index/> [Acesso em 24 11 2017].
- Lima, P. C. R., 2012. *Terras-raras: elementos estratégicos para o Brasil*, Brasília: s.n.
- Lindner, H., 2010. *Physik für ingenieure*. 18 ed. s.l.:Carls Hanser Verlag.
- Loius, H., 1928. *The preparation of coal for the market*. London: s.n.

- Martins, C. & Lima, P. C. R., 2014. *Minerais estratégicos e terras-raras*. 3 ed. Brasília: Câmara dos Deputados.
- Martz Jr., H. E., Logan, C. M., Schneberk, D. J. & Shull, P. J., 2017. *X-ray imaging: fundamentals, industrial techniques, and applications*. New Yourk: CRC Press: Taylor & Francis Group.
- Minuzzil, O. R., Bastos Neto, A. C., Pereira, V. P. & Nunes, L., 2006. A columbitização do pirocloro do albita granito na Mina Pitinga (AM): relações com a mineralização de criolita. *Revista Brasileira de Geociências*, Volume 36, pp. 124-137.
- Murphy, B., Zyl, J. V. & Domingos, G., 2012. Underground preconcentration by ore sorting and coarse gravity separation. 26-17 March, pp. 1-8.
- MWIR, S., 2017. *Specim MWIR handbook*. s.l.
- Neubert, K., Knapp, H. & Wotruba, H., 2013. *Sensor-based sorting of metal ores*. Sozopol, Bulgaria, s.n., p. 245–250.
- Neubert, K. & Wotruba, H., 2017. Investigations on the detectability of rare-earth minerals using dual-energy x-ray transmission sorting. *Journal of Sustainable Metallurgy*, March, 3(1), pp. 3-12.
- Neumann, R. & Barreto, J. C. G., 2013. *Caracterização mineralógica de pré-concentrado de minerais de elementos terras raras*, Rio de Janeiro: CETEM.
- Newman, P. & Whelan, P., 1952. Photometric separation of ores in lump form. *Process Symposium Recent Developments in Mineral Dressing*.
- NIST, s.d. *National Institute of Standards and Technology*, s.l.: Physucal Measurement Laboratory.
- Ohta, J., 2008. *Smart CMOS image sensors and applications*. 1 ed. London: CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Oliveira, D. & Inverno, C., 2014. Classification of rare earth deposit and occurrence types: what's new?. *Comunicações Geológicas*, 2(101), pp. 821-823.
- Orris, G. J. & Grauch, R. I., 2002. *Rare earth element mines, deposits, and occurrences*, Washington: Scholar's Choice.
- Paludo, C. M., 2015. *Caracterização dos minerais de ETR nos pegmatitos do albita granito Madeira (Pitinga, AM)*. Porto Alegre: Instituto de Geociências/UFRGS.

- Petter, R. A., 2015. *A técnica de análise de risco econômico aplicada a diferentes cenários de investimento: Minas de elementos de terras raras e reciclagem de rejeitos de material de demolição e construção civil*. Porto Alegre: UFRGS.
- Pires, A. C., 2010. *Xenotima, gargarinita, fluoceritae waimirita da mina de Pitinga (AM): mineralogia e avaliação preliminar do potencial do albita granito para exploração de elementos de terras raras e ítrio*. Tese (doutorado) ed. Porto Alegre: IGEO/UFRGS.
- Revuelta, M. B., 2018. *Mineral resources: from exploration to sustainability assessment*. Madrid: Springer.
- Riedel, F. & Dehler, M., 2010. Recovery of unliberated diamonds by x-ray transmission sorting. *Conference Diamonds - Source to Use*, 1-3 March, pp. 193-199.
- Romero, J. L. & McCord, S. A., 2012. *Rare earth elements: procurement, application, and reclamation*, Oak Ridge, US: Sandia Report.
- Salter, J. D. & Wyatt, N. G., 1991. Sorting in the minerals industry: Past, present and future. *Minerals Engineering*, Volume 4, pp. 779-796.
- Santos, E. G., Paranhos, R. S., Petter, C. O. & Young, A. S., 2017. Preliminary Analysis of the Application of Sensor Based Sorting on a Limestone Mine in the Region Caçapava do Sul, Brazil. *The Minerals, Metals & Materials Series*, pp. 579-586.
- Sedra, A. S. & Smith, K. C., 2004. *Microeletronic circuits*. 5 ed. New Yourk: Oxford University.
- Serra, O. A., 2011. Terras Raras - Brasil x China. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 22(5), pp. 809-812.
- Sousa Filho, P. C. d. & Serra, O. A., 2014. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas. *Química Nova*, 37(1), pp. 753-760.
- Speim, 2017. *Specim FX17 handbook*. s.l.
- Stolnik, D., 2015. *Caracterização da xenotima na fáceis pegmatítica do albita granito de núcleo, Pitinga (AM)*. Monografia ed. Porto Alegre: IGEO/UFRGS.
- Suli, L. M. *et al.*, 2017. A Review of Rare Earth Mineral Processing Technology. *Chemical Engineering Research Bulletin*, pp. 20-35.
- Taboca, M., 2017. *Oportunidades e barreiras para a exploração de TR pela Mineração Taboca*. São Paulo, IPT, p. Apresentação.

- Takehara, L., Silveira, F. V. & Santos, R. V., 2016. Potentiality of rare earth elements in Brazil. Em: I. B. De Lima & W. Leal, eds. *Rare Earth Industry: Technological, Economic and Environmental Implications*. Amsterdam: Copyright-Elsevier, pp. 57-72.
- Tong, Y., 2012. *Technical amenability study of laboratory-scale sensor-based ore sorting on a Mississippi Valley type lead-zinc ore*. Vancouver: The University of British Columbia.
- Veras, M. M. *et al.*, 2018. Detection of rare earth ore by sensor-based sorting technology-SBS. *Minerals engineering*, Mach, pp. 96-111.
- Veras, M. M., Young, A. S., Sampaio, C. H. & Petter, C. O., 2016. A mining breakthrough, preconcentration by sensor-based sorter. *mining engineering magazine*, Volume 01, pp. 38-42.
- VJ x-ray source, 2016. *DWG NUMBER: SPC – P038*, s.l.: VJ Technologies Company.
- Walters, A. & Lusty, P., 2011. *Rare earth elements*, London: MineralsUK.
- Wang, D. *et al.*, 2014. A dual detector approach for X-ray differential phase contrast imaging. *Radiation Physics and Chemistry*, 31 12, Volume 95, pp. 86-90.
- Wills, B. A., 2016. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 8 ed. s.l.:Elsevier.
- Wotruba, H. & Riedel, F., 2005. Ore Preconcentration with Sensor-Based Sorting. *Aufbereitungs-Technik/Mineral Processing*, 46(5), pp. 4-13.
- Yamada, T., 2006. CCD image sensors. Em: *Imagem sensors and signal processing for digital still cameras*. New York: Taylor & Francis Group, LLC, pp. 94-140.
- Young, A. S., 2017. *Uso da separação automática por sensor de raios-x na pré-concentração de minérios: ferro e zinco*. Porto Alegre: LAPROM/UFRGS.
- Zepf, V., 2016. An overview of the usefulness and strategic value of rare earth metals. Em: I. B. d. Lima & W. Leal Filho, eds. *Rare Earth Industry: technological, economic, and environmental implications*. London: Elsevier and Book Aid, pp. 3-17.
- Zhi Li, L. & Yang, X., 2016. Chapter 9 - China's rare earth resources, mineralogy, and beneficiation. Em: I. B. d. Lima & W. Leal Filho, eds. *Rare earths industry: technological, economic, and environmental implications*. s.l.:Elsevier, pp. 139-150.

## APÊNDICE A

Lista com nome dos minérios portadores de terras raras conhecidos até 2018.

Aeschinita	Caisichita	Fergusonita	Uangoita	Luesita	Samrskita
Allanita	Cerianita	Fersmita	Hidroxilapatita	Miserita	Steenstrupina
Anatasa	Ceriopirocloro	Flocencita	Imorita	Monazita	Stilwelita
Ancilita	Cerita	Fluocerita	Joaquinita	Mosandrita	Sichisita
Apatita	Chevquinita	Fluorapatita	Kainosita	Parisita	Tengerita
Astrofilita	Churchita	Fluorita	Kamfaugita	Perovskita	Talenita
Baduileita	Colofana	Formanita	Karnasurtita	Plumbopirocloro	Torita
Bariopirocloro	Columbita	Gadolinita	Keivita	Policrasa	Titanite
Bastnasita	Cordilita	Gagarinita	Kuliokita	Polilitionita	Vesuvianita
Branerita	Crandalita	Gitinsita	Lavenita	Pirocloro	Wolerita
Britolita	Daquingshanita	Gorceixita	Lessingita	Rabdofana	Xenotima
Broctita	Davidita	Goiazita	Leucofanita	Rinkita	Itrialita
Burbanquita	Eudialita	Helandita	Loparita	Rosenbuschita	Itrotantalita
Carbocernaita	Euxenita	Hinganita	Lovchorrita	Sahamalita	Zirkelita

## APÊNDICE B

Produção dos óxidos de terras raras seguidos de teor e valor da cesta apresentada por cada um dos projetos que exploravam consoante o país e nome do projeto até 2015.

Project	Country	Owner(s)	Ticker Symbol(s)	MR (Mt)	TREO (wt%)	TREO (Mt)	In-Situ TREO (USD/t (MR))	Basket Price USD/kg
Aksu Diamas	TUR	<u>AMR Mineral Metal Inc.</u>	N/A	494	0.07	0.345	9.92	14.21
Araxá	BRA	<u>MBAC Fertilizer Corp.</u>	TSX:MBC, OTCQX:MBCFF	28.3	4.21	1.19	487.38	11.58
Ashram Main	CAN	<u>Commerce Resources Corp.</u>	TSX.V:CCE, OTCQX:CMRZF , F:D7H	239.7	1.9	4.549	255.86	13.48
Ashram MHREO	CAN	<u>Commerce Resources Corp.</u>	TSX.V:CCE, OTCQX:CMRZF , F:D7H	9.4	1.61	0.151	272.59	16.89
Bear Lodge	USA	<u>Rare Element Resources Ltd.</u>	TSX:RES, MKT:REE	57.9	2.68	1.553	396.15	14.78
Bokan	USA	<u>Ucore Rare Metals Inc.</u>	TSX.V:UCU, OTCQX:UURAF	5.8	0.6	0.035	140.72	23.37
Brockmans	AUS	<u>Hastings Technology Metals Limited</u>	ASX:HAS	36.2	0.21	0.076	65.09	31
Browns Range	AUS	<u>Northern Minerals Limited</u>	ASX:NTU	9	0.63	0.057	198.92	31.57
Buckton	CAN	<u>DNI Metals Inc.</u>	TSX.V:DNI, F:DG7	3433.5	0.03	0.878	4.95	19.38
Buckton South	CAN	<u>DNI Metals Inc.</u>	TSX.V:DNI, F:DG7	496.7	0.03	0.124	4.93	20.11
Charley Creek (JV)	AUS	<u>Crossland Strategic Metals Ltd.</u>	ASX:CUX	805.3	0.03	0.235	5.36	18.38
Charley Creek (JV)	AUS	EMMCO Mining Sdn Bhd	N/A	805.3	0.03	0.235	5.36	18.38
Clay-Howells	CAN	<u>Canada Rare Earth Corp.</u>	TSX.V:LL	8.5	0.73	0.062	118.82	16.3
Cummins Range	AUS	<u>Navigator Resources Limited</u>	ASX:NAV	4.9	1.74	0.085	221.24	12.71
Dubbo Zirconia Project	AUS	<u>Alkane Resources Ltd.</u>	ASX:ALK, OTCQX:ANLKY	73.2	0.89	0.651	146.85	16.5
Eco Ridge	CAN	<u>Pele Mountain Resources Inc.</u>	TSX.V:GEM, OTCQX:GOLDF	59.3	0.16	0.093	22.44	14.32
Elliott Lake Teasdale	CAN	<u>Appia Energy Corp.</u>	N/A	51.6	0.19	0.098	25.34	13.31
Foxtrot	CAN	<u>Search Minerals Inc.</u>	TSX.V:SMY	14.4	1.01	0.146	179.83	17.73
Glenover (JV)	ZAF	<u>Galileo Resources PLC</u>	AIM:GLR	10.4	2.13	0.221	393.93	18.48
Glenover (JV)	ZAF	<u>Fer-Min-Ore (Pty) Ltd.</u>	N/A	10.4	2.13	0.221	393.93	18.48
Grande-Vallée	CAN	<u>Orbite Aluminae Inc.</u>	TSX:ORT, OTCQX:EORBF	1209.6	0.05	0.606	7.97	15.91

Hoidas Lake	CAN	<u>Great Western Minerals Group Ltd.</u>	TSX.V:GWG, OTCQX:GWMGF	2.8	2.4	0.068	377.56	15.72
Kangankunde	MWI	<u>Lynas Corporation Ltd.</u>	ASX:LYC, OTCQX:LYSDY	2.5	4.24	0.107	460.4	10.86
Kipawa	CAN	<u>Matamec Explorations Inc.</u>	TSX.V:MAT, OTCQX:MHRE F	27.1	0.39	0.107	83.66	21.19
Kutessay II	KGZ	<u>Stans Energy Corp.</u>	TSX.V:HRE, OTCQX:HREEF	18	0.26	0.047	78.01	30.15
Kvanefjeld	GRL	<u>Greenland Minerals and Energy Ltd.</u>	ASX:GGG, PK:GDLNF	673	1.09	7.369	144.57	13.2
La Paz	USA	<u>Formerly AusROC Metals Ltd.</u>	ASX:ARK	128.2	0.04	0.056	8.58	19.49
Lavergne-Springer	CAN	<u>Canada Rare Earth Corp.</u>	TSX.V:LL	16.9	1.16	0.197	154.41	13.27
Lofdal	NA M	<u>Namibia Rare Earths Inc.</u>	TSX:NRE	1.7	0.59	0.01	181.28	30.65
Milo	AUS	<u>GBM Resources Ltd.</u>	ASX:GBZ	187	0.06	0.115	9.42	15.27
Montviel	CAN	<u>Geomega Resources Inc.</u>	TSX.V:GMA	266.6	1.45	3.878	185.38	12.74
Mount Weld CLD	AUS	<u>Lynas Corporation Ltd.</u>	ASX:LYC, OTCQX:LYSDY	14.9	9.73	1.454	1361.38	13.99
Mount Weld Duncan	AUS	<u>Lynas Corporation Ltd.</u>	ASX:LYC, OTCQX:LYSDY	9	4.84	0.435	846.35	17.5
Mountain Pass	USA	<u>Molycorp Inc.</u>	NYSE:MCP	31.6	6.57	2.072	628.78	9.57
Mrima Hill High Grade	KEN	<u>Pacific Wildcat Resources Corp.</u>	TSX.V:PAW	26.9	7.04	1.893	932.67	13.24
Mrima Hill Main	KEN	<u>Pacific Wildcat Resources Corp.</u>	TSX.V:PAW	132.5	3.21	4.252	492.35	15.35
Nechalacho Basal	CAN	<u>Avalon Rare Metals Inc.</u>	TSX:AVL, MKT:AVL	125.7	1.43	1.799	305.14	21.33
Nechalacho Upper	CAN	<u>Avalon Rare Metals Inc.</u>	TSX:AVL, MKT:AVL	177.7	1.32	2.353	233.46	17.63
Ngualla	TZA	<u>Peak Resources Ltd.</u>	ASX:PEK	41.7	4.19	1.748	519.34	12.39
Niobec	CAN	<u>Magris Resources Inc.</u>	N/A	1058.6	1.73	18.363	242.34	13.97
Nolans	AUS	<u>Arafura Resources Ltd.</u>	ASX:ARU, PK:ARAFF	55.9	2.59	1.45	393.24	15.16
Norra Kärr	SWE	<u>Tasman Metals Ltd.</u>	TSX.V:TSM, MKT:TAS, F:T61	31.1	0.61	0.188	139.87	23.12
Olserum	SWE	<u>Tasman Metals Ltd.</u>	TSX.V:TSM, MKT:TAS, F:T61	7.8	0.62	0.048	134.75	21.86
Round Top	USA	<u>Texas Rare Earth Resources Corp.</u>	OTCQX:TRER	905.9	0.06	0.573	13.82	21.87
Sarfartoq	GRL	<u>Hudson Resources Inc.</u>	TSX.V:HUD, OTCQX:HUDRF	8.3	1.72	0.143	242.64	14.12
Serra Verde	BRA	<u>Mining Ventures Brasil Ltda.</u>	N/A	909	0.16	1.454	26.95	16.84
Songwe Hill	MWI	<u>Mkango Resources Ltd.</u>	TSX.V:MKA	31.8	1.48	0.469	219.51	14.85
Sørensen	GRL	<u>Greenland Minerals and Energy Ltd.</u>	ASX:GGG, PK:GDLNF	242	1.1	2.667	135.33	12.28

Steenkampskr al	ZAF	Thorium Foundation	N/A	0.7	14	0.093	2166.1 1	15.4 7
Storkwitz	GER	<u>Seltenerden Storkwitz AG</u>	N/A	4.5	0.45	0.02	54.71	12.1 1
Strange Lake Enriched	CAN	<u>Quest Rare Minerals Ltd.</u>	TSX:QRM, MKT:QRM	20	1.44	0.288	315.08	21.8 7
Strange Lake Granite	CAN	<u>Quest Rare Minerals Ltd.</u>	TSX:QRM, MKT:QRM	472.5	0.87	4.118	175.08	20.0 9
TANBREEZ	GRL	<u>Rimbal Pty Ltd</u>	N/A	4300	0.65	28.05 8	119.92	18.3 8
Tantalus	MD G	<u>Tantalus Rare Earths AG</u>	F:TAE:GR	627.7	0.08	0.562	13.91	16.8 1
Two Tom	CAN	<u>Canada Rare Earth Corp.</u>	TSX.V:LL	40.6	1.18	0.48	163.6	13.8 4
Wigu Hill Twiga	TZA	<u>Montero Mining and Exploration Ltd.</u>	TSX.V:MON	0.5	5.27	0.025	403.26	7.65
Xiluvo	MO Z	Promac Lda.  <u>Hastings Technology Metals Limited</u>	N/A	1.1	2.03	0.023	301.62	14.8 6
Yangibana (JV)	AUS	<u>Rare Earth Minerals PLC</u>	ASX:HAS	6.8	1.52	0.103	234.59	15.4
Yangibana (JV)	AUS	<u>Frontier Rare Earths Ltd.</u>	AIM:REM	6.8	1.52	0.103	234.59	15.4
Zandkopsdrift (JV)	ZAF	<u>Korea Resources Corp.</u>	PK:FREFF	46.8	1.89	0.886	271.46	14.3 4
Zandkopsdrift (JV)	ZAF	<u>Greenland Minerals and Energy Ltd.</u>	N/A	46.8	1.89	0.886	271.46	14.3 4
Zone 3	GRL	<u>Greenland Minerals and Energy Ltd.</u>	ASX:GGG, PK:GDLNF	95.3	1.16	1.106	139.85	12.0 5

## APÊNDICE C

Tabela representativa com os elementos de terras raras evidenciando o uso que cada indústria faz de cada um de seus elementos consoante aplicação e a funcionalidade ou melhorias na tecnologia aplicada.

Uso industrial	Aplicação da ETR	Funcionalidade	ETR
Veículos elétricos, híbridos, plug-in.	Imãs Permanentes.	Motores elétricos.	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Geração eólica e hidrelétrica.	Imãs Permanente.	Geradores sem engrenagem	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Fermentas elétrica sem fio.	Imãs Permanente.	Motores compactos, leves e potentes.	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Discos rígidos de computadores.	Imãs Permanente.	Motores compactos, leves e potentes.	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Equipamento para diagnósticos por imagem (MRI).	Imãs Permanente.	Geração de campos magnéticos.	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Unidades de craqueamento catalítico em leito fluidizado.	Catalisadores.	Propiciam sítios ácidos para a matriz catalítica.	La, Ce, Pr e Nd
Conversores catalíticos para redução de emissões atmosféricas.	Catalisadores.	Capacidade de oxidação do CO e Ozônio para CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> .	Ce, La
Indústria automotiva.	Ligas Metálicas ferrosas contendo ETR.	Melhoria de desempenho das ligas e usos ampliados de usos industriais das ligas.	Todos ETR
Indústria aeroespacial, energia nuclear, fabricação de satélites, linhas de transmissão, sistemas de refrigeração magnética e outros.	Ligas Metálicas não ferrosas contendo ETR.	Melhoria de desempenho das ligas e usos ampliados de usos industriais das ligas.	Todos ETRs
Lâmpadas fluorescentes compactas e lineares, LEDs, entre outros sistemas de iluminação.	Fósforos.	Redução do consumo de energia, com melhoria das características de cor e luminescência.	Y, Eu, Tb
Dispositivos móveis sem fio, displays em telas planas.	Fósforos.	Fósforos excitados por UV em baixa pressão.	Y, Eu, Tb, Gd, Ce
Detetores de raios x e raios gama.	Fósforos.	Captura de luz de cintilação e sistemas de detecção.	Y, Eu, Tb, La, Ce
Pós para polimento de vidros e lentes.	Pós para Polimentos.	Melhoria das propriedades óticas de vidros e lentes.	Ce
Fabricação de vidros e lentes.	Mudanças de propriedades química e físicas de vidros e lentes.	Descoloração de vidros, bloqueio de luz UV e composição de vidros especiais.	La,Ce,Nd,Pr,Yb,Ho,Er
Fibras ópticas para telecomunicação.	Fibras ópticas dopadas com ETRs.	Amplificação do sinal.	Y, Eu, Tb, Er, Nd e Ho
Sensores de Gases, incluindo CO.	Cerâmicos.	Monitoramento e controle de emissões gasosas. Melhoria do desempenho de motores a combustão.	Y
Lasers para usos diversos (medicina, defesa e outros).	Cerâmicos.	Orientação de artefatos de defesa, precisão de corte e incisões.	Y, Nd e outros
Dispositivos para armazenagem de energia.	Cerâmicos.	Alta densidade energética em comparação com capacitores convencionais.	Todos TRs
Dispositivos para armazenagem de energia.	Baterias de Ni-metal hidreto.	Melhor custo benefício que baterias de íons de Lítio.	La

(Fonte: adaptado de Petter, 2015)

## APÊNDICE D

Informações de todos os projetos mineiros que usaram tecnologia de sensores ou SBS apresentando o interstício, nome projeto, empresas e quais foram os desenvolvimentos e aplicações do sensor de raios-x para a indústria mineral.

### Pioneirismo

Ano	Projeto	Companhia	Eventos
1957	Nchanga Consolited, Zambia	Anglo-American	Célula única, análise de fluxo múltiplo baseado no espectro Philips
1958	Sullivan no Kimberly B.C.	Comico	Monitor de cobre e zinco em caldas filtradas, leitura tirada do filtro de baterias com o espectrômetro Philips
1959	Arthur e Magma Concentrators, Utah	Kennecott Copper	Detector único de linha, analisava molibdênio no concentrado de cobre em fluxo contínuo
1959	Anaconda, Montana	Anaconda Company	Espectrometria em pesquisa aplicada

### Período de desenvolvimento nos anos 60

Ano	Projeto	Companhia	Eventos
1961	Weed, Montana	Anaconda Company	Primeiro modelo de analisador em fluxo dedicado como concentrador (Quantometer, pesquisa aplicada em laboratório).
1962	Morenci, Arizona	Phelps Dodge Corporation	Usado em laboratório de pesquisa aplicada em fluxo simples.
1962	Friedensville, Pensilvânia	New Jersey Zinc Company	Primeira instalação de sistema com células múltiplas no processo (North American Philips).
1963	Ray Mines, Arizona	Kennecott Copper	Implementação de sistema com células múltiplas no processo (North American Philips).
1963	Nchanga, Zambia	Anglo-American	Implementação de sistema com células múltiplas no processo (North American Philips).
1963	Mission, Arizona	Asarco	Implementação de sistema com células múltiplas no processo (North American Philips).
1964	Pyhasalmi, Finland	Outokumpu	Implementação de sistema com células múltiplas no processo (North American Philips).
1965	Fletcher, Missouri	St. Joe Minerals	Implementação de sistema com células única, General electric.
1965	Ecstall at Timmins, Ontario	Texasgulf	Implementação de sistema com células múltiplas no processo, dois sistemas (Pesquisa aplicada em laboratório).
1965	Nevada Mines at Mc Gill, Nevada	Kennecott Copper	Implementação de sistema com células única, General electric.
1965	Chino Mines, New Mexico	Kennecott Copper	Implementação de sistema com células múltiplas no processo (North American Philips).
1965	White Pine, Michigan	Kennecott Copper	Implementação de sistema multianalisador Heaos em concentrador.
1965	Frood-Stoble at Sudbury, Ontario	International Kichel	Pesquisa aplicada em laboratório, Sistema de fluxo duplo.
1965	Nittetsu, Japan	Dowa Mining	Pesquisa aplicada em laboratório, Sistema de fluxo simples.
1966	New Broken Hill, N.S.W. Australia	Zinc Corporation	Espectrômetro Philips adaptado para fluxo de polpa.
1967	Harjavalta, Finland	Outokumpu	Espectrômetro Philips modificado para monitorar cobre em grumos filtrados.
1967	Lake Dufault, Quebec	Falconbridge nickel mines	Espectrômetro de laboratório modificado para análise on-stream.
1967	Copperhill, Tennessee		Pesquisa aplicada em laboratório, Sistema de fluxo simples.

1967	Palaborwa, SO, Africa	Palaborwa Mining Company	Sistema de fluxo duplo, Elliott Automation.
1967	Opemiska, Canada	Falconbridge nickel mines	Pesquisa aplicada de laboratório, sistema em fluxo simples.
1968	Pyhasalmi, Finland	Outokumpu	Protótipo do analisador de fluxo de circulação.
1968	North Broken Hill, Australia	N.S.W. Australia	Primeira operação com sonda instalada on-stream, análise de isótopos por absorção <i>on-stream</i> , General Electric em cooperação com Australian A.E.C.
1968	Tyrone, New Mexico	Phelps Dodge	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo simples.
1968	Ozark Lead, Missouri	Kennecott Copper	Pesquisa aplicada em laboratório, Sistema de fluxo duplo.
1968	Mount Isa, Australia	Mount Isa Mines	Espectrômetro Philips adaptado análise de polpa em fluxo.
1968	Twin Buttes, Arizona	Anaconda Company	Pesquisa aplicada de laboratório, Sistema múltiplo em linha.
1968	Kristineberg, Sweden	Boliden	Sistema múltiplo em linha, Elliott Automation.
1968	Kamioka Mines, Japan	Mitsui Mine and Metals	Espectrômetro Rigaku-Denki adaptado análise de polpa em fluxo.
1968	Mattagami Lake, Quebec	Noranda	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo duplo.
1968	Zinc Corporation, N.S.W. Australia	Australian Mining	Análise de isótopos <i>on-stream</i> , análises de células em fluxo.
1969	Arthur and Magma, Utah	Kennecott Nickel	Pesquisa de laboratório aplicada, unidade múltiplo de fluxo em cada concentrador.
1969	Coopercliff N°2, Ontario	International Nickel	Pesquisa de laboratório aplicada, unidade múltiplo de fluxo.
1969	Pymasalmi, Finland	Outokumpu	Segundo protótipo por sistema de circulação, unidade múltiplo de fluxo.
1969	Lynn Lake, Manitoba	Sherrit-Gordon Mines	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo duplo.
1969	Flin Flon, Manitoba	Hudson Bay Mining and Smelting	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo duplo.
1969	Clarabelle, Ontario	International Kickel	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo duplo.
1969	Fletcher, Missouri	St. Joe Minerals	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo duplo.
1969	Opemiska, Ontario	Falconbridge Nickel Mines	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo simples.
1969	Avoca, Ireland	-	Ensaio de análises em sonda <i>in-stream</i> desenvolvido pelo laboratório U.K. Warren Springs.
1969	Manibridge, Manitoba	Falconbridge Nickel Mines	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo simples.
1969	New Broken Hill Consolidated, N.S.W. Australia	Zinc Corporation	Instalação de protótipo sistema de sonda <i>in-stream</i> Amdel-Philips.
1969	Cobar, Australia	-	Ensaio com sonda Amdel-Philips <i>in-stream</i> aplicada a rotina.

## Período de aplicação nos anos 70

Ano	Projeto	Companhia	Eventos
1970	Balmat, New York	St. Joe Minerals	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema em fluxo duplo
1970	Peko Mines, Northern Territory, Australia	-	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips
1970	Gaspe, Quebec	Noranda	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema de fluxo múltiplo.
1970	Keretti, Finland	Outokumpu	Leitura em sistema múltiplo de circulação.
1970	Pymasalmi, Finland	Outokumpu	Leitura em sistema múltiplo de circulação, instalação da segunda unidade.

1971	Orchan Lake, Quebec	Noranda	Pesquisa de laboratório aplicada, sistema múltiplo em linha.
1971	Vihanti, Finland	Outokumpu	Leitura em sistema múltiplo de circulação.
1972	Bor Mines, Yugoslavia	-	Elliott Automation, sistema de fluxo múltiplo.
1972	Komioka, Japan	Mitsui Mining and Metals	Rigaku-Denkia, aplicação em linha múltiplas, primeira unidade de produção em série.
1972	Brushy Creek, Missouri	St. Joe Minerals	Pesquisa de laboratório aplicada em linha.
1972	Kanmantoo, South Australia	-	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips, três instalações.
1972	Vuonos, Finland	Outokumpu	Transmissão múltipla, instalação da primeira unidade.
1972	Mount Isa, Australia	Mount Isa Mines	Transmissão múltipla.
1972	Ruttan Lake, Manitoba	Sherritt-Gordon Mines	Transmissão múltipla.
1972	Mt. Lyell, Tasmania	-	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips, duas instalações.
1972	Morenci, Arizona	Phelps Dodge	Transmissão múltipla.
1973	Brunswick, Canada	Noranda	Transmissão múltipla.
1973	Magmont, Missouri	Cominco American	Transmissão múltipla.
1973	Kotalahti, Finland	Outokumpu	Transmissão múltipla.
1973	Vuonos, Finland	Outokumpu	Pesquisa de laboratório aplicada, instalação da segunda unidade.
1974	Heath Steele, New Brunswick	Amax Lead and Zinc	Transmissão múltipla.
1974	Pinto Valley, Arizona	Cities Service Chemicals and Metals	Pesquisa de laboratório aplicada, transmissão múltipla.
1974	Buic, Missouri	Amax Lead and Zinc	Transmissão múltipla.
1974	Amalik, USSR	-	Pesquisa de laboratório aplicada, transmissão múltipla.
1974	Kombinat GHM Polcowice Lubin, Poland	-	Transmissão múltipla.
1974	Sullivan, Kimberley, B.C.	Cominco	Transmissão múltipla.
1974	Chambishi, Zambia	Roan Consolidated	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips.
1975	Kombinat Norilsk, USSR	-	Transmissão múltipla, segunda unidade instalada.
1975	El Teniente, Chile	Chile Copper	Transmissão múltipla.
1975	Western Mining, Australia	Western Australia	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips.
1975	Metcalf, Arizona	Phelps Dodge	Transmissão múltipla.
1975	Bolaget, Sweden	Vieille Montagne	Transmissão múltipla.
1975	Kombinat Norilsk, USSR	-	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips.
1975	Avoca Mines, Ireland	-	Transmissão múltipla.
1975	Renison, Tasmania	-	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips.
1975	North Broken Hill, N.S.W., Australia	-	Sonda de análise <i>in-stream</i> de Amdel-Philips.
1976	Sar Cheshmeh, Iran	-	Transmissão múltipla.
1976	Baluba, Zambia	Roan Consolidated	Transmissão múltipla.
1976	Viburnum, Missouri	St. Joe Minerals	Transmissão múltipla.
1976	Kombinat GHM Polcowice Lubin, Poland	-	Transmissão múltipla, instalação da segunda unidade.

Fonte: adaptado de Cooper (1976)

## APÊNDICE E

Descrição petrográfica realizada pela equipe do IGEO/UFRGS das amostras usadas neste estudo.

- Xenotima: prismas euédricos com birrefringência alta (verde-rosa 2ª ordem), hábito prismático alongado, sendo incolor em luz natural (LN). Há muitas inclusões, principalmente de pirocloro, torita e de cristais da matriz, que também aparecem corroendo as bordas dos cristais. A xenotima encontra-se na matriz e como fenocristal. ( $YPO_4$ , com os ETR substituindo o Y por seus raios atômicos similares). Os fenocristais ocorrem tanto como cristais isolados como em aglomerados, ao passo que os cristais menores da matriz ocorrem dispersos; é mais frequente nas porções de textura mais grossa do granito do que nas porções mais finas, porém é muito mais enriquecida nos pegmatitos, onde também apresenta cristais de dimensões muito maiores. A xenotima é o principal mineral de Y e ETR e devido à sua acumulação nos pegmatitos do albita granito de núcleo (AGN) e nas cavidades miarolíticas, as taxas de Y são maiores no AGN, comumente maior que 0,2% de  $Y_2O_3$  e em excepcionais circunstâncias 0,7%; são maiores que no albita granito de borda (AGB) (<0,1%).
- Pirocloro: os grãos de pirocloro são marrons, amarelos ou caramelos, são subédricos a euédricos e têm tamanho variando entre 0,07 mm e 0,41 mm, se tornando progressivamente pretos (isótopos) com a columbitização. Caráter primário. O contato com albita e criolita frequentemente é marcado por bordas reativas, e os contatos com zircão e quartzo são retilíneos, límpidos e não reativos; contatos com zircão e quartzo são retilíneos, límpidos, indicando ausência de reação.
- Criolita: pode ter macla (quando está grande, bem desenvolvida); intersticial, aspecto creme à LN, opaco à NC, relevo alto.
- Torita: grão compridos, há borda de alteração, opaco (jacaré) com grão de até 0,5mm de diâmetro.
- Cassiterita: possui aspecto rosado e relevo forte, pode apresentar macla, geralmente subédricos de 0,01mm à 1mm.
- Clorita: absorve vários comprimentos de onda da luz, em marrom e verde; clivagem.
- Clorita peninita – Mica azul bem forte.
- Polilitionita – mica incolor ou levemente azulada/esverdeada com alta birrefringência. Recorrente junto à xenotima.

- Gagarinita (Fluoreto de terras raras): à LN aspecto “enferrujado”, ou incolor, anédrica, uniaxial positivo, fraturas irregulares são comuns. Sua fórmula é  $\text{Nax} (\text{Cax}, \text{Y}, \text{ETR}_{2-x}) \text{F}_6$ , sendo que os ETR ocorrem substituindo parcialmente o Y e os conteúdos de Na e Ca.
- Zircão: Hábito característico com extremidades poligonais, com relevo forte, zonação, birrefringência alta. Os zircões primários ocorrem com até 0,1mm, anédricos, comumente como inclusões nos fenocristais de quartzo. O zircão tardio é mais abundante, euédrico a subédrico, de 0,1 à 1mm, com inclusões de albita, criolita e fases opacas.
- Mica verde-marrom: Fe-Li mica
- Quartzo: Incolor à Luz natural e acinzentado à luz transmitida (LT). Há duas gerações de quartzo, um precoce e um tardio. A primeira é composta de quartzo macrocristalino limpo, com topázio em fraturas cortando a criolita maciça. A segunda geração é caracterizada por uma massa de quartzo microcristalino, com óxido de ferro avermelha distribuído ao longo dos grãos corroendo todos os minerais do AGN e a criolita maciça.

## ANEXO A

Dados de análise química do Laboratório Actlabs – *Activation Laboratories Ltd* – Elementos com óxidos quantificados por pérolas em EFRX. A planilha deve ser analisada em termos de continuação, posta lado a lado.

	Analyte Symbol	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	LOI	Total
	Unit Symbol	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	Detection Limit	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.01		0.01
ID LAB	ID TRABALHO	FUS-ICP											
1	C2 - PEG14B - 2R	51.66	13.63	6.95	0.209	0.02	0.04	2.66	7.88	0.12	0.1	2.91	86.18
2	C2 - 21 - 2R	31.87	8.56	5.41	0.129	0.03	0.89	1.75	4.12	0.082	12.21	2.34	67.4
3	C2 - PEG09 - 2R	52.67	8.8	6	0.56	0.04	0.06	3.18	4.38	0.059	0.12	3.06	78.92
4	C3 - LI22	72.77	11.35	3.17	0.037	0.02	0.61	3.75	4.2	0.036	0.03	0.52	96.49
5	C3 - LII4	70.14	13.21	1.87	0.035	0.02	0.03	5.9	3.8	0.016	< 0.01	1.9	96.93
6	C3 - LIII10	68.81	13.36	2.62	0.037	< 0.01	0.02	6.19	4.04	0.018	< 0.01	1.63	96.72
7	C3 - LI23	70.07	11.9	2.57	0.055	0.02	0.02	5.68	4.09	0.022	< 0.01	1.44	95.86
8	C3 - LI3	70.53	12.4	2.56	0.049	0.01	0.03	5.87	4.16	0.038	< 0.01	1.82	97.46
9	C3 - LI21	72.18	14.19	1.29	0.028	0.02	0.03	2.78	5.59	0.015	< 0.01	1.36	97.47
10	C3 - LI6	71.59	12.69	2.49	0.05	0.08	0.05	5.16	3.94	0.074	< 0.01	1.71	97.84
11	C4 - LIII4 (F17200)	69.86	12.75	2.34	0.046	0.02	0.02	6.82	3.12	0.037	0.01	1.65	96.68
12	C3 - LII3	64.44	16.79	3.05	0.044	0.05	0.08	6.36	4.94	0.021	< 0.01	0.64	96.42
13	C3 - LV1	71.02	13.2	2.94	0.054	0.06	0.06	4.22	4.62	0.025	0.03	0.62	96.84
14	C2 - LVI3	68.6	11.64	2.96	0.081	0.01	0.72	4.7	3.32	0.015	0.31	1.37	93.73
15	C3 - LII9	72.86	11.21	5.25	0.073	0.12	0.09	2.98	3.83	0.033	< 0.01	0.83	97.28
16	C3 - LV3	73.76	11.46	2.04	0.038	< 0.01	0.02	3.54	4.62	0.021	< 0.01	0.62	96.12
17	C3 - LII2	67.21	13.06	3.83	0.072	0.61	1.14	3.93	4.63	0.04	0.12	2.36	97
18	C4 - LIII8 (AGM16A)	69.54	13.8	3.24	0.03	0.33	0.78	4.89	4.36	0.037	< 0.01	1.17	98.18
19	C2 - LVI2	54.85	13.48	5.28	0.153	0.31	0.64	7.37	3.05	0.074	0.18	2.68	88.06
20	C5 - LIII5 (AGM25)	70.46	11.89	3.21	0.043	0.13	0.36	4.64	4.31	0.022	< 0.01	1.62	96.67
21	C3 - LII5	64.4	12.18	2.24	0.039	1.39	4.99	3.34	3.44	0.049	0.01	5.32	97.4
22	C2 - PEG14 - 2R	51.53	11.86	7.94	0.357	0.16	0.47	0.58	6.89	0.109	1.74	2.19	83.83
23	C5 - LV8 (AGM25)	69.11	14.03	1.63	0.039	0.43	0.75	4.38	5.77	0.009	0.06	1.46	97.68
24	C5 - LII5	71.7	12.93	3.81	0.048	0.17	0.36	4.16	4.24	0.026	0.01	0.92	98.38
25	C3 - PEG03 - 2R	48.85	16.66	1.51	0.037	0.13	0.32	9.7	8.25	0.007	0.51	3.35	89.34
26	C5 - LII8	69.77	13.21	2.68	0.034	0.11	2.25	4.05	4.23	0.017	0.03	2.08	98.46
27	C2 - LI4	66.61	12.1	3.48	0.087	0.35	0.67	6.3	3.91	0.032	0.09	2.47	96.1
28	C2 - LI20	51.47	12.27	5.44	0.13	0.03	0.66	5.52	6.27	0.048	0.15	4.31	86.29
29	C3 - LI7	70.11	12.28	3.07	0.042	0.13	1.54	4.03	4.39	0.022	0.04	1.97	97.63
30	C4 - AGT02A - 2R	70.01	13.12	2.13	0.045	0.13	2.14	4.15	4.27	0.017	< 0.01	1.98	97.99
31	C4 - LII9	71.31	12.21	3.09	0.057	0.04	0.13	5.59	3.94	0.044	0.03	1.43	97.87
32	C3 - LII4	74.22	11.21	2.66	0.042	0.13	1.03	4.15	3.52	0.026	0.05	1.1	98.13

33	C4 - LI9	74.23	11.73	2.7	0.041	0.16	0.64	4.24	3.38	0.032	0.02	0.94	98.1
34	C5 - LIII5	69.16	12.45	3.88	0.042	0.02	0.12	5.63	4.39	0.037	< 0.01	2.37	98.11
35	C3 - LI2	69.78	12.17	2.93	0.053	0.29	0.6	5.52	3.97	0.047	< 0.01	2.18	97.54
36	C6 - LV7 (AGM24)	68.64	18.28	1.36	0.01	0.04	0.28	10.78	0.18	0.003	0.02	0.6	100.2
37	C4 - LIV5 (AGM20)	82.13	9.65	1.26	0.011	0.08	0.17	5.95	0.27	0.004	0.01	0.38	99.9
38	C4 - LI12	71.02	12.35	4.56	0.068	0.1	0.24	4.51	4.01	0.021	0.05	1.33	98.27
39	C3 - LI17	74.65	10.79	3.27	0.059	0.09	0.2	5.28	3.02	0.019	0.02	1.39	98.78
40	C4 - LI1	71.81	11.54	3.21	0.062	0.04	0.06	5.36	4.41	0.042	0.05	1.94	98.53
41	C1 - LVI5 (F170A4)	44.81	11.15	3.8	0.099	0.01	1.86	4.08	4.78	0.046	2.66	3.51	76.8
42	C3 - LI2	72.99	11.17	4.17	0.056	0.09	0.64	3.74	3.97	0.021	0.09	1.22	98.16

Continuação dos dados de análise química do Laboratório Actlabs – *Activation Laboratories Ltd.*

Sc	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	1	5	20	1	20	10	30	1	1	5	2	2
FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-MS	FUS-ICP								
9	354	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	4410	33	22	< 5	29900	231
12	286	9	< 20	< 1	< 20	< 10	3790	27	19	27	13700	941
7	10790	< 5	60	< 1	< 20	< 10		17	14	< 5	16600	149
2	19	9	< 20	< 1	< 20	< 10	70	54	5	< 5	3740	24
2	22	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	610	66	8	< 5	6330	42
1	28	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	840	65	9	< 5	7730	57
1	39	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	1590	57	9	< 5	8200	57
2	27	< 5	< 20	< 1	< 20	40	970	56	7	6	6160	46
1	29	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	160	72	7	< 5	9810	62
2	27	6	< 20	< 1	< 20	< 10	1870	53	7	< 5	7260	63
1	67	< 5	< 20	< 1	< 20	10	1560	60	6	< 5	4680	37
3	17	33	< 20	< 1	< 20	< 10	380	78	5	< 5	3960	27
3	26	30	< 20	< 1	< 20	20	90	66	5	< 5	3700	25
7	61	6	< 20	< 1	< 20	< 10	1560	59	13	5	9090	142
2	13	33	< 20	< 1	< 20	< 10	220	68	5	< 5	2970	21
1	22	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	820	62	7	< 5	6920	43
3	25	11	< 20	1	< 20	< 10	550	63	8	< 5	7940	47
< 1	24	< 5	140	< 1	< 20	< 10	210	63	6	< 5	3760	29
5	182	< 5	< 20	< 1	< 20	10	8860	47	10	< 5	12400	88
1	45	< 5	< 20	1	< 20	< 10	1300	56	7	< 5	6710	73
2	23	7	150	< 1	< 20	< 10	340	54	7	< 5	6300	116
11	353	8	< 20	< 1	20	< 10	4470	34	25	5	24000	416
< 1	27	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	180	70	6	< 5	4770	44
2	16	12	170	< 1	< 20	< 10	200	63	5	< 5	3300	27
6	70	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	580	45	11	< 5	15000	244
1	25	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	210	58	8	< 5	6580	31
4	37	7	160	< 1	< 20	< 10	1580	50	11	< 5	8100	40
7	270	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	2040	35	20	6	16800	156

2	153	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	330	60	7	< 5	5560	31
1	28	< 5	150	< 1	< 20	< 10	340	62	7	< 5	8610	45
< 1	89	< 5	30	< 1	< 20	< 10	1400	50	6	< 5	6130	48
2	24	5	20	< 1	< 20	< 10	140	48	6	< 5	3020	27
1	18	13	180	< 1	< 20	< 10	90	53	5	< 5	2660	22
3	16	5	< 20	1	< 20	< 10	480	61	7	< 5	5630	44
1	32	< 5	< 20	< 1	< 20	< 10	970	59	7	< 5	6180	49
< 1	23	< 5	70	< 1	< 20	< 10	50	90	6	< 5	185	6
< 1	15	< 5	30	< 1	< 20	< 10	50	49	5	< 5	332	5
2	21	< 5	20	< 1	< 20	< 10	370	60	9	< 5	5510	36
2	30	< 5	270	< 1	< 20	< 10	1210	50	10	< 5	5330	57
2	21	< 5	20	< 1	< 20	< 10	1080	50	8	< 5	5840	46
4	181	5	20	1	20	10	1340	55	21	24	15600	147
2	15	19	< 20	1	< 20	< 10	140	70	6	< 5	3300	30

Continuação dos dados de análise química do Laboratório Actlabs – *Activation Laboratories Ltd*

Y	Zr	Nb	Mo	Ag	In	Sn	Sb	Cs	Ba	Bi	La	Ce
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
2	4	1	2	0.5	0.2	1	0.5	0.5	3	0.4	0.1	0.1
FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-MS	FUS-ICP	FUS-MS	FUS-MS	FUS-MS						
749	10		< 2	< 0.5	7.4	389	0.9	496	12	81.1	78.1	263
85190	634		< 2	5.1	26.3	1440	< 0.5	205	69	33.8	85.1	520
808	6		32	< 0.5	32.5	115	< 0.5	248	8	3.8	25	85.4
341	6413	1950	< 2	18.7	5.4	486	< 0.5	9.1	31	65.3	22.2	89
118	3991	1540	< 2	12.3	5.2	933	< 0.5	209	11	28.9	15.2	55.3
75	4948	1540	< 2	14.5	8.7	2000	1.7	80.6	8	17.4	13	46.3
62	6199	1510	< 2	19.2	9	2000	1.9	161	8	11.5	17.1	64.2
76	3701	1220	< 2	11.3	5.6	1010	2	143	14	11.2	23.1	82.1
113	3154	1720	< 2	9	7.7	1630	1.5	59.5	13	19.2	8.9	26.4
39	3526	1360	< 2	10.6	5.2	658	2.3	217	58	10.8	17.4	61.9
58	6545	1710	< 2	21.5	8.4	1760	0.6	89	9	36.1	25.6	91.7
149	7080	1910	< 2	21.9	6.1	459	0.7	8.8	47	2.8	10.4	41.4
287	9309	2020	< 2	31.5	10.2	1900	0.8	9.7	45	7.1	29.1	104
10200	4839		< 2	14.7	29.3	2510	1.3	105	10	32	69.7	278
206	10330	1850	< 2	30.8	13.8	3270	0.6	7.5	32	23.2	23.9	94.9
63	6350	1470	2	19.8	11.1	2840	0.6	149	13	22	15.3	54.4
827	5212	1730	11	15.7	9.1	1830	< 0.5	78.3	18	22.8	17.4	61.1
67	3285	1280	10	9.5	7.1	2020	< 0.5	15.1	26	1.6	18.8	69.7
1418	4057		159	12.8	17.1	322	< 0.5	155	11	12.1	39.8	130
98	5489	1170	2	16.3	7.1	1720	2.5	101	10	8.9	24.7	80.6
128	5618	1530	11	16.8	8.6	2160	1	42.5	22	4.8	18.9	61.5
13620	1455		< 2	4.1	15.7	2520	0.7	405	26	16.7	39.9	181
462	3447	1080	< 2	10.7	1.6	230	< 0.5	28.3	27	1.5	28.9	100
218	5546	1470	11	16.1	6.7	1120	< 0.5	10.2	35	2.9	28.8	110

3905	291	135	< 2	1.1	10.6	552	< 0.5	152	25	10.9	4.5	20.9
90	4847	1610	< 2	13.4	8.5	1840	0.9	52.4	9	48	10.6	34.8
78	8561	1820	11	25.3	17.9	2750	1.8	139	15	16.1	18.1	64.1
12080	446		< 2	1.2	6	545	< 0.5	255	13	2.9	292	1150
227	5872	1510	< 2	17.5	4.4	469	0.5	43.1	33	64.7	74.9	276
62	2884	1560	10	8.2	7.7	1630	1.1	58	10	17.6	13.7	51.1
72	3381	702	< 2	10.2	4.7	886	< 0.5	144	12	9.8	17.9	61.3
242	8397	1160	< 2	26	7.6	1150	0.6	15	43	16	36.7	131
219	7487	1140	10	24	4.5	378	0.5	9.4	31	56.5	7.4	29.5
146	3810	991	< 2	14.8	2	109	< 0.5	85.8	15	7.8	16.1	58.6
129	4089	891	< 2	15.8	1.6	899	< 0.5	161	15	9.5	16.3	56.8
18	240	35	7	0.7	0.2	28	< 0.5	4.3	6	5.2	1.4	3.1
42	2618	89	< 2	8.2	7.3	2050	< 0.5	6.6	7	2.4	2.8	12.2
340	3038	1160	4	9.7	6.9	1460	< 0.5	65.8	18	12.8	15.3	53.1
81	3980	1120	17	11.7	11.8	1890	1.4	89.2	11	11.3	12.1	42.7
106	4122	1010	< 2	13.1	6.2	1100	< 0.5	132	17	6.3	24.3	85.9
52110	3433		2	16.2	1.9	354	0.5	214	72	4.1	915	3700
1878	7620	1340	< 2	28.3	2.7	456	< 0.5	12.9	36	1.3	38.3	147

Continuação dos dados de análise química do Laboratório Actlabs – *Activation Laboratories Ltd*

Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf
ppm												
0.05	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.04	0.2
FUS-MS												
26.3	60.2	21.8	0.5	27.8	17.2	215	62.4	282	58.9	417	57.9	4.9
122	701	1040	37.9	2670	1880	22700	6670	29500	6260	44000	5950	201
10.6	34.6	21.5	0.55	33.5	15.5	157	38.9	151	28.8	197	27	2.1
11.7	34.9	23	0.52	27.7	12.6	121	29.2	111	20	137	18.7	403
6.31	17.2	10	0.22	12.3	5.5	53.1	12.4	48.8	9.72	66.9	9.54	332
5.71	16.8	10.4	0.24	11.4	4.7	38.3	7.6	28	5.41	40.3	6.06	393
7.64	21.5	11.3	0.24	10.5	4	33.3	7.1	27.6	5.87	47.8	7.7	453
9.23	25.5	8.6	0.2	7.6	3.2	30.2	7.3	29.9	6	46	6.96	255
3.9	11.7	8.2	0.21	12	5.5	50	10.9	39.8	7.27	51.4	7.27	279
7.22	20.4	9.3	0.26	8.5	3.3	26.6	5.5	19.5	3.74	28.3	4.55	319
11.4	34.8	13.5	0.27	11.8	4.2	35.8	8.2	31.8	6.26	48.4	7.78	489
5.1	16.1	11	0.26	14.2	6.3	60.3	14.4	55.6	10.6	78.2	11.5	494
12.5	33.8	16.2	0.38	20.1	9.5	97.6	23.9	94.7	17.9	125	17.8	651
47.3	199	185	5.68	421	215	2310	583	2280	391	2520	327	479
10.9	29.5	16.9	0.39	20.1	8.6	79	18.1	69.3	13.3	96.3	14.4	657
6.14	16.4	7.2	0.16	6.7	2.8	27.8	7.2	32.2	7.35	61.3	10	486
6.92	20.9	17.3	0.64	39.6	24.8	321	96.9	434	88.2	612	83.2	438
7.73	20.3	9.1	0.2	8.1	3.6	32.5	7.3	28.3	5.73	42.8	6.61	236
14.9	43.5	26.2	0.94	56	34.6	445	130	568	117	821	114	281
10	27.6	12.4	0.24	11.4	5.2	54.7	15.5	66.8	13.1	96.8	15	340
6.95	18.9	10	0.3	12.2	5.5	54	12.7	50.6	10.3	74.9	10.8	466

28	119	161	5.82	411	300	3720	1110	4790	1010	7100	914	169
10.9	28.8	14.6	0.37	22.4	12.7	157	44.2	192	39.2	277	38.9	284
12.9	36.1	18.4	0.44	19.5	8.6	83.9	20.6	80.7	15.5	107	15.5	343
4.67	26.3	41.7	1.49	106	80.2	997	299	1350	294	2140	284	28.9
4.31	13.7	10	0.27	15.8	8.2	89.7	23.5	100	20.5	148	20.7	413
7.69	22.8	14.2	0.39	18.3	8.7	86.8	21.4	88.8	18.3	135	19.5	786
185	693	439	11.5	670	300	2750	648	2200	354	2020	227	46.3
34.4	102	41.6	0.87	45.4	19.2	199	50.9	203	37.9	257	34.5	426
6.61	21.3	12.7	0.31	16.5	6.9	63.3	14.2	50.4	9.06	60.6	8.17	264
7.45	23.1	8.8	0.19	8.5	3.2	27	6	22.1	4.24	30.6	4.35	221
14.9	39	19.2	0.41	19.8	9.8	87.7	21.1	82.4	16.4	118	16.2	529
4.01	14.5	14.1	0.36	17.7	9.3	84.3	19.5	73.7	13.8	93.6	12.7	432
6.97	20	11	0.26	12.3	5.8	56	13.7	54.7	11.4	84	11.9	266
7.01	21.5	9.5	0.22	10.4	4.6	45.8	11.5	45.3	9.35	67.1	9.3	282
0.42	1.3	0.9	< 0.05	1.2	0.5	4.4	1	3.5	0.68	4.3	0.59	16.5
1.62	5.6	2.8	0.06	3.2	1.4	12.3	2.9	12	2.55	19.7	3.1	206
5.87	16.5	10.5	0.34	18.6	11.8	132	37.8	164	33.6	234	30.1	265
5.13	14.1	9.6	0.23	11.4	5	38.6	7.8	27.9	5.5	40	5.47	350
9.69	25.1	9.4	0.19	8.5	4.3	41.2	10.7	45.5	9.65	70.7	10	279
577	2270	1520	42.3	2420	1280	13300	3490	13400	2570	16800	2120	385
22.8	85.9	59.8	1.66	93.2	47.1	478	122	472	88.6	587	73.6	434

Continuação dos dados de análise química do Laboratório Actlabs – *Activation Laboratories Ltd*

Ta	W	Tl	Pb	Th	U	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Zn
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%
0.1	1	0.1	5	0.1	0.1	0.003	0.003	0.003	0.01
FUS-MS	FUS-MS	FUS-MS	FUS-MS	FUS-MS	FUS-MS	FUS-XRF	FUS-XRF	FUS-XRF	FUS-Na2O2
	45	21.5	1550	165	75.2	0.041	0.354	< 0.003	
	171	11.5	1890	6880	118	0.156	0.44	0.153	
	19	11.2	238	51.7	45.3	0.015	0.102	< 0.003	8.38
287	15	8.8	139	673	260				
218	24	7.7	698	1410	113				
231	9	12.6	719	608	178				
218	6	18.7	899	350	259				
158	11	8.7	986	437	157				
237	18	15.8	380	583	154				
187	4	13.7	1220	340	163				
233	8	8.2	4720	400	285				
242	9	9.8	1060	850	184				
289	12	8.8	803	990	264				
	26	11.2	934	1640	188	0.035	0.304	0.656	
273	10	7.9	117	1370	310				
243	10	9.5	1910	426	289				
252	26	10.7	248	1880	76.4				

194	22	6.9	480	106	279			
	25	8.3	1540	1680	175	0.015	0.167	0.532
179	10	14.3	874	670	327			
217	12	7.4	137	645	155			
	56	19.6	1250	5160	63.7	0.043	0.332	0.199
245	15	8.9	291	344	180			
220	9	7.6	114	1030	311			
10.6	9	34.2	1230	351	15.6			
223	18	9.6	123	731	106			
260	12	13.4	832	1060	210			
	33	14.8	211	378	54.6	0.016	0.162	0.056
214	11	9.7	149	1120	218			
224	21	14.1	280	729	140			
111	5	14.9	1720	278	156			
190	9	8	215	813	379			
187	8	7.3	134	340	159			
122	18	9.1	1070	1220	284			
116	5	11.1	833	332	158			
4.4	2	0.6	161	17.4	12.1			
18.1	7	0.7	85	50.3	46.9			
183	20	8.6	126	1520	63			
195	8	10.5	845	680	167			
148	9	9.2	556	515	189			
	127	13.1	315	2130	197	0.054	0.166	0.468
178	11	8.9	121	876	360			

---