

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

AARON SAMUEL YOUNG

**USO DA SEPARAÇÃO AUTOMÁTICA POR SENSOR DE RAIOS X NA PRÉ-
CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS: FERRO E ZINCO**

PORTO ALEGRE
2017
AARON SAMUEL YOUNG

USO DA SEPARAÇÃO AUTOMÁTICA POR SENSOR DE RAIOS X NA PRÉ- CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS: FERRO E ZINCO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Petter

PORTO ALEGRE

2017

AARON SAMUEL YOUNG

USO DA SEPARAÇÃO AUTOMÁTICA POR SENSOR DE RAIOS X NA PRÉ- CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS: FERRO E ZINCO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Tecnologia Mineral Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais (PPGE3M).

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter (Orientador)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann (coordenador do PPGE3M/UFRGS)

Aprovada em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Margaret Armstrong

Prof. Dra. Gelsa Edith Navarro

Prof. Dr. Weslei Monteiro Ambrós

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e meus pais, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Ciências de Materiais, PPGE3M, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGE3M pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Ao CNPQ pela provisão da bolsa de mestrado.

Em especial ao Dr. Carlos Petter que apostou no meu potencial quando me chamou para o programa.

“A educação é o que resta depois de se ter esquecido o que se aprendeu na escola”.

(Albert Einstein)

RESUMO

O COMEX *Lab-Sorter* MSX-400-VL-XR-3D (*Sorter*) foi avaliado, sob diferentes condições operacionais em relação a sua capacidade de realizar testes de pré-concentração em escala laboratorial, visando o uso dos resultados gerados para aplicação industrial. Para tal, 24 testes de separação (bem como mais testes de calibração) foram realizados para dois minérios diferentes (a base de ferro e zinco). Nesses testes, aproximadamente 73 kg de minério foram avaliados para fins de separação no equipamento acima citado. *Este* mostrou a capacidade de aumentar o teor do minério de ferro acima de 60% Fe, aproveitando assim de 46% da massa do material no tamanho *Lump* (-31 +12,7mm) que era anteriormente classificado como rejeito pela mina e tinha um teor de apenas 53% de Fe. Com respeito do Zinco, o equipamento recuperou 93% do minério de zinco, aumentando seu teor acima de 27% Zn. Dessa forma, o *Sorter* eliminou 27% da massa do ROM a ser alimentado na planta de beneficiamento da mina de zinco. As configurações de porcentagem ideal para o ferro eram de 150-220 *threshold* e 75% porcentagem, e para o zinco as configurações ideais eram de 0-100 *threshold* para a *granulometria maior* (-50 +19 mm) e de 0-150 para a *granulometria menor* (-25 +8mm), ambos com 75% porcentagem.

Palavras-chave: Engenharia de Minas. *Sorting*. Separação por sensor de transmissão de raio-x em energia dupla. Pré-Concentração de minério.

YOUNG, Aaron Samuel. **USO DA SEPARAÇÃO AUTOMÁTICA POR SENSOR DE RAIOS X NA PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS: FERRO E ZINCO**. 2017. 124. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The MS-400-VL-XR-3D COMEX *Lab-Sorter* (*Sorter*) was evaluated under different operating conditions for its ability to carry out pre-concentration tests at the laboratory scale, with the intention of using the results generated for industrial application. To this end, 24 separation tests (and many more calibration tests) were performed for two different ores (iron and zinc). In these tests, more than 73 kg of ore was passed, particle per particle in the equipment. The *Sorter* showed the ability to increase the iron ore content to over 60% Fe, thus taking advantage of 46% of the mass of the Lump size material (-31 + 12.7mm) that was previously classified as waste and had a grade of only 53% Fe. With respect to Zinc, the *Sorter* recovered 93% of the zinc ore, increasing its content above 27% Zn. In this way, the *Sorter* eliminated 27% of the ROM mass to be fed into the zinc mine beneficiation plant. The ideal percentage configurations for the iron were 150-220 *threshold* and 75% percentage, and for zinc the ideal configurations were 0-100 *threshold* for the large particle size (-50 +19 mm) and 0-150 for the small particle size (-25 + 8mm), both with 75% percentage.

Keywords: Mining Engineering. Ore Sorting. Separation by Dual Energy X-ray Transmission Sensors. Pre-concentration of Mining Ores. Sorting.

YOUNG, Aaron Samuel. **USO DO SISTEMA LAB-SORTER MSX-400-VL-XR-3D NA PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS: FERRO E ZINCO.** 2017. 124. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Separador Modelo M17.....	8
Figura 2. Distribuição da Tecnologia do MikroSort® ao longo do globo.....	11
Figura 3. Os dois principais modelos de <i>Sorter</i> utilizados atualmente.	12
Figura 4. Diagrama de um tubo de raio-X.	16
Figura 5. Voltagem aplicada e o resultado relativo na intensidade do raio-X.	18
Figura 6. Coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) e o coeficiente de absorção de energia em massa (μ_{en}/ρ) do ferro e a energia do fóton.....	20
Figura 7. Exemplo teórico da influência da posição do material durante a verificação e os dados compilados resultantes.	24
Figura 8. Curva de transmissão teórica DE-XRT para 124 / 62kV para variação no conteúdo de ZnS.	25
Figura 9. Cálculo do modelo de misturas de PbS a 110kV / 62kV e a 83kV / 50kV..	26
Figura 10. μ/ρ de Ferro por energia de fóton dos elementos comuns examinados...	28
Figura 11. Conversão de imagens de raios X em uma figura tratada.	29
Figura 12. Layout de configuração de um sensor de energia e energia dupla simples.	30
Figura 13. Estudo de caso de minério ferro do COMEX (redução de material de rejeito).	37
Figura 14. Estudo de caso de minério ferro do COMEX (aumento de produto).	38
Figura 15. Esquemática do equipamento COMEX <i>Lab-Sorter</i> MSX-400-VL-XR-3D.	40
Figura 16. A entrada (500 mm de largura) do equipamento para alimentação de material.....	41
Figura 17. Diagrama da janela de Be ⁺ do tubo de raio-X usado no <i>Sorter</i>	43
Figura 18. Exemplo teórico de curvas da classificação de atenuação de Raios-X por Dupla Energia usado no <i>Sorter</i>	49
Figura 19. Lotes de ferro usado nos testes de separação por DE-XRT.	52
Figura 20. O minério de ferro na esteira antes de realizar o <i>escaneamento</i>	53
Figura 21. Fluxograma dos testes de ferro.....	54
Figura 22. Balanço Seguindo o Princípio Arquimedes	56
Figura 23. Fluxograma dos testes de zinco, para os dois granulometrias.....	59

Figura 24. Imagens do raios-X (alto esquerda, baixo meio) e imagem feito pelo CXR (direta).....	61
Figura 25. Recuperação e teor de ferro por massa recuperada.....	72
Figura 26. Teores de Fe por concentração (produtos acumulados), rejeito e alimentação.....	73
Figura 27. Teores de SiO ₂ por concentração (produtos acumulados), rejeito e alimentação.....	74
Figura 28. Teores de Al ₂ O ₃ por concentração (produtos acumulados), rejeito e alimentação.....	75
Figura 29. Gráfico de Radar dos produtos, rejeito e alimentação.....	77
Figura 30. Teores (Fe%) e massa recuperado (%) por alimentação uniforme.....	79
Figura 31. Linha de tendência e correlação dos resultados do minério de ferro.....	80
Figura 32. Imagens de raios-X (alto na esquerda, baixo no meio) e a imagem feito pelo CXR (a direita).....	82
Figura 33. Zinco teores por testes 1 e 2 da granulometria -50+19mm.....	86
Figura 34. Zinco teores por testes 1 e 2 da granulometria -25+8mm.....	87
Figura 35. Recuperacoes Médias dos elementos por faixa granulometrica dos produtosde zinco.....	88
Figura 36. Histograma dos teste com minério de zinco no <i>Software</i> MSX do COMEX.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Processos para Análise de Composição <i>On-Stream</i> ,.....	9
Tabela 1. Processos para Análise de Composição <i>On-Stream</i> ,.....	10
Tabela 3. O espectro eletromagnético, os diferentes sensores disponíveis para a classificação baseada em sensores e os minérios que geralmente usam.	15
Tabela 4. As densidades atômicas dos elementos dos produtos nos testes.	27
Tabela 5. As densidades atômicas dos elementos associados com rejeito.	27
Tabela 6. Sumário dos sensores atualmente usado para tratamento de partículas. .	35
Tabela 7. Componentes do equipamento COMEX <i>Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D</i>	39
Tabela 8. Especificações ambientais para operação do computador industrial.	44
Tabela 9. Resultados dos testes de calibração do equipamento para os testes do minério de ferro.	62
Tabela 10. Granulometria dos lotes de ferro.	62
Tabela 11. Resultados do lote 1 do minério de ferro.....	63
Tabela 12. Resultados do lote 2 do minério de ferro.....	65
Tabela 13. Resultados do lote 3 do minério de ferro.....	67
Tabela 14. Resultados do lote 4 do minério de Ferro.....	68
Tabela 15. Resultados do lote 5 para o minério de Ferro.	69
Tabela 16. Valores das concentrações possíveis pelo <i>Sorter</i> por lote para o minério de ferro estudado.	71
Tabela 17. Recuperação do ferro no <i>Sorter</i> por concentração cumulativa dos lotes.	76
Tabela 18. Composição mássica por alimentação uniforme.....	78
Tabela 24. Relações estatísticas para os teores de produto e Lote.....	80
Tabela 20. Resultados dos testes de calibração do equipamento para os testes do minério de zinco.	83
Tabela 21. Resultados dos testes para o minério de zinco na fração -50 +19 mm. ...	84
Tabela 22. Resultados dos testes para o minério de zinco na fração -25 +8 mm.	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DE-XRT	Transmissão dupla de raio-X
<i>Threshold</i>	Valores que estabelecem o limite de intensidade de raios-X para realizar uma separação
<i>Sorter</i>	Equipamento usado no estudo, COMEX Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D
<i>ROM</i>	“ <i>Run of Mine</i> ” material de lavra logo após a primeira britagem
<i>NIST</i>	Instituto Nacional de padronização e Tecnologia, <i>National Institute of Standards and Technology</i> (NIST)
<i>CXR</i>	<i>Software</i> de calibração do <i>Sorter</i> e análise do raios-X
<i>MW</i>	Micro-ondas, ondas do espectro magnético
<i>NIR</i>	Próximo ao Infravermelho
<i>Grms</i>	<i>Aceleração da raiz-médio-quadrado de vibração</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
<i>Bremsstrahlung</i>	“Radiação de frenagem”, tipo de radiação de raio-X de espectro contínuo
<i>EM</i>	Sensor Eletromagnético

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atenuação m^{-1}
ρ	Densidade g/cm^3
*	Valores calculados
\ln	logaritmo natural
ϕ	Recuperação metalúrgica acumulada de todo o ferro dentro do lote
δ	Concentração, conforme a descrição em cima
e	Número de <i>Euler</i>
μ/ρ	Coeficiente de atenuação mássica cm^2/kg
μ_{en}/ρ	Coeficiente de absorção de energia em massa
dB	Decibéis
m	Metros
cm	Centímetros
cm^3	Centímetros cúbicos
ft	Pés
tph	Toneladas por hora (métrico)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Estrutura do documento	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Histórico da separação baseada em sensores.....	4
2.2 Princípios de funcionamento de sensores.....	13
2.3 As técnicas de separação	22
2.4 Aplicações de sensores na mineração.....	31
2.5 Elaboraões de outros testes.....	35
3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	38
3.1 Apresentação do equipamento.....	39
3.2 Funcionamento do equipamento	41
3.2.1 Apresentação do material ou das partículas	41
3.2.2 Detecção do material.....	42
3.2.3 Processamento ou análise dos dados gerados.....	43
3.2.4 Sistema físico de Separação.....	44
3.3 Operação do Equipamento.....	44

3.3.1	<i>Escaneamento</i> e calibração do equipamento.....	44
3.3.2	Testes de verificação da calibração	49
3.3.3	Testes de <i>Sorting</i> completo.....	50
4.	MATERIAIS E METODOS.....	51
4.1	Os testes do minério de ferro	51
4.1.1	Descrição do minério de Ferro	51
4.1.3	Preparação do minério de ferro.....	52
4.1.4	<i>Escaneamento</i> e calibração do minério de ferro	53
4.1.5	Testes completas do minério de ferro	53
4.1.6	Análise de densidade do minério de ferro	55
4.1.6	Análise química do minério de ferro	57
4.2	Os testes do minério de zinco	57
4.2.1	Descrição do Zinco.....	58
4.2.2	Preparação do minério de zinco.....	58
4.2.3	<i>Escaneamento</i> e calibração do minério de zinco	58
4.2.4	Testes completo do minério de zinco	59
4.2.5	Análise química do minério de ferro	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1	Organização dos resultados dos testes	60
5.2	Resultados e discussão do ferro	60
5.2.1	Resultados do <i>Escaneamento</i> do minério de ferro.....	60

5.2.2 Resultados do peneiramento dos lotes de ferro	62
5.2.3 Resultados por cada lote do minério de ferro	63
5.2.3.1 Resultados do Lote 1.....	63
5.2.3.2 Resultados do Lote 2.....	65
5.2.3.3 Resultados do Lote 3.....	66
5.2.3.4 Resultados do Lote 4.....	67
5.2.3.5 Resultados do Lote 5.....	69
5.2.4 Resultados totais do minério de ferro.....	70
5.2.5 Discussão dos resultados do minério de ferro.....	76
5.2.6 Análise estatística dos resultados do minério de ferro	79
5.3 Resultados e discussão do Zinco.....	81
5.3.1 Resultados do <i>Escaneamento</i> do minério de zinco.....	81
5.3.2 Resultados por cada granulometria do minério de zinco.....	83
5.3.2.1 Resultados da granulometria maior (-50 +19mm)	83
5.3.2.2 Resultados da granulometria menor (-25 +8mm)	84
5.3.3 Resultados totais do minério de zinco.....	86
5.3.4 Discussão dos resultados do minério do zinco.....	88
5.3 Discussões gerais	89
6. CONCLUSÕES	92
6.1 Estudos futuros	94
REFERÊNCIAS.....	95

APÊNDICE I:.....	101
APÊNDICE II:.....	108
APÊNDICE II:.....	114

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

A aplicação de sistemas de classificação para materiais baseados em sensores apresenta grande potencial de utilização no processamento mineral. No entanto, devido à variedade de sensores disponíveis, construção mecânica sofisticada e uso intensivo de recursos computacionais, os sistemas em operação tendem a serem restritos à aplicações específicas e carentes de flexibilidade operacional.

É prática comum, ao se realizar uma pesquisa de separação de minérios, que uma grande quantidade de material de alimentação seja enviada para os potenciais fornecedores de equipamentos a fim de realizar testes preliminares de separação. Neste caso, a única comparação válida que pode ser feita entre os diferentes métodos de classificação, tipos de sensores e arquiteturas de software, consiste no uso de diferentes dispositivos operando com o mesmo material de entrada. Ainda, o material de alimentação deve ser representativo e o trabalho de teste deve incluir uma variedade de configurações de sistemas de classificação diferentes, os quais envolvem sensores de diversos tipos. Este procedimento é muitas vezes complicado e demorado. Além disso, qualquer trabalho de pesquisa potencial neste tópico pode ser realizado principalmente, e quase unicamente, pelos produtores de equipamentos. As instituições de pesquisa, como universidades ou centros de pesquisa, necessitam frequentemente comprar equipamentos de classificação de grande escala para inclusão deste tipo de tecnologia em seus programas de pesquisa (STRYDOM, 2010).

A escala de operação de equipamentos industriais que implementam separações baseados em sensores não é conveniente para realização de trabalhos de pesquisa, muitas vezes fornecendo limitações práticas para testes eficientes. Também, embora esse tipo de técnica esteja presente há muitos anos no mercado, informações a respeito do processamento de sinais e o modo como os mesmos são transmitidos pelos sensores ainda são muito limitadas. Dados diretos obtidos por meio de sensores geralmente não estão disponíveis e só podem ser exibidos na

forma de imagens já pré-processadas. Assim, não é possível comparar o software de diferentes fornecedores de classificação diretamente. Eventualmente, quando os resultados do trabalho de pesquisa devem ser ampliados em escala industrial, torna-se muito difícil encontrar as melhores condições de classificação. Conseqüentemente, o sistema de classificação em escala industrial é novamente ajustado e otimizado na planta, de forma que apenas uma parte da informação obtidas em testes laboratoriais é aplicável. Deste modo, a participação efetiva de instituições de pesquisa na geração de resultados em escala industrial se encontra bastante limitada.

Neste contexto, o presente estudo busca fornecer subsídios para o emprego de classificação por sensores em escala laboratorial de modo a se aproximar o máximo possível da aplicação industrial. Em uma tentativa para preencher o espaço deixado pelas empresas de alta tecnologia, esse estudo visa atender as necessidades de usinas de pequeno porte que não estão em posição de arriscar seus recursos em testes caros e demorados. Além de realizar testes práticos, o estudo procura auxiliar na compreensão da técnica de classificação baseada em sensores para melhor capacitar os pesquisadores na área.

O recente sistema de classificação modelo MSX desenvolvido pela COMEX tem como objetivo a melhoria da qualidade dos testes de separação usando sensores em escala laboratorial a fim de facilitar a ampliação de escala dos resultados. Aquele sistema permite uma análise e separação mais eficiente de partículas com composição complexa. Esse sistema pode se provar especialmente útil quando uma aplicação específica requer o uso simultâneo de diferentes sensores na mesma unidade de classificação (KOLACZ, 2012). Dispondo do primeiro equipamento da linha COMEX MSX do mundo, o Laboratório de Processamento Mineral da UFRGS fornece condições apropriadas para o desenvolvimento de diversos estudos envolvendo a separação por sensores. É com este propósito em mente que o presente estudo busca estabelecer um entendimento básico da operação do equipamento, bem como sua aplicação potencial no beneficiamento de minérios.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar, sob diferentes condições operacionais, a capacidade de realização de testes de pré-concentração em escala laboratorial usando um separador por transmissão de raios-x do modelo COMEX *Lab-Sorter* MSX-400-VL-XR-3D (*Sorter*), visando o uso dos resultados gerados para aplicação industrial.

1.2.2 Objetivos específicos

Dentro do contexto do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar a capacidade do *Sorter* de realizar a separação de minérios de Ferro e Zinco;
- b) Analisar a influência dos parâmetros operacionais do equipamento sobre o teor e a massa de material pré-concentrado;
- c) Analisar a influência da granulometria do material a ser separado sobre os parâmetros operacionais exigidos pelo equipamento para obter o mesmo resultado na pré-concentração;
- d) Verificar a capacidade do equipamento para gerar resultados relevantes, com possível impacto econômico para operações de mineração;
- e) Identificar as principais limitações do equipamento para realizar sua função.

1.3 Estrutura do documento

Esse documento está organizado em capítulos, com o Capítulo 1 apresentando o contexto geral do estudo. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica da área e o estado da arte da tecnologia de separação por sensores. O Capítulo 3 descreve o equipamento em detalhes. O Capítulo 4 apresenta o procedimento adotado ao longo dos testes. No Capítulo 5, os resultados experimentais obtidos são discutidos em detalhes. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico da separação baseada em sensores

Os processos de classificação e beneficiamento de minérios são tão antigos quanto a própria atividade de mineração (SALTER; WYATT, 1991). A cata manual é provavelmente o mais antigo de todos os métodos de separação e foi praticada desde tempos pré-históricos. Conforme descrito por Salter e Wyatt (1991), minérios de composição complexa, tais como minérios de estanho e cobre, foram classificados manualmente em até seis diferentes frações com base em sua mineralogia, enquanto em Clausthal na Alemanha, no final do século XIX, vários tipos de produtos foram ordenados por meio de coleta manual, tais como:

- (A) calcopirita (quase puro),
- (B) calcopirita com predominância de calcopirita,
- (C) calcopirita com predominância de pirita,
- (D) pirita (quase pura),
- (E) rocha de moagem pirítica e ferrosa,
- (F) ganga contendo galena, esfalerita, pirita e calcopirita.

De acordo com HANDY (1918), o fato que a separação manual era de uso tão geral no início do século XX poderia ser derivado de sua elevada eficiência. No entanto, ele observou que as vantagens atribuídas a mesma eram em muitos casos duvidosas. Por exemplo, uma planta operando com separação manual no distrito de Coeur d'Alene (EUA) processava cerca de 800 toneladas de minério por dia, sendo 600 toneladas enviadas diretamente à moagem enquanto as 200 toneladas restantes eram processadas por cata manual. Para tanto, eram necessários 20 operadores para atuar na classificação manual do minério, além de outros 5 empregados atuando na manutenção e gerenciamento do processo. O custo normal da classificação manual era cerca de \$0.16 USD por tonelada de minério processado na usina, ou \$0.65 USD por tonelada de produto. Esses valores de custos, considerando o ajuste da inflação, seriam de \$3.8 USD por tonelada de minério processado na usina e \$15.5 USD por tonelada de produto em 2017.

HANDY (1918) citou esse exemplo para ilustrar que a moagem direta do minério não era apenas mais barata, mas também metalurgicamente mais econômica e eficiente do que a cata manual seguida de moagem do resíduo. A tendência de uso da cata manual diminuiu progressivamente durante o século XX em decorrência dos aumentos na eficiência da moagem. É importante notar que em muitos casos a cata manual não foi substituída por outros métodos de separação, sendo a etapa de pré-concentração do minério previamente à cominuição totalmente eliminada do processo.

As aplicações de sensores na mineração para análise de carvão tiveram início no século XIX (LOUIS, 1928 apud SALTER; WYATT, 1991). Pouco depois da descoberta de raios-X por Roentgen (1895 apud ANCEL, 1927), Couriot (1898 apud ANCEL, 1927) publicou um importante artigo lançando as bases para todos os trabalhos subsequentes sobre análise radioscópica de carvão (ANCEL, 1927). Em 1899, J. Daniel descreveu as tentativas de determinar o teor de cinzas por métodos radioscópicos. Um artigo de Garrett e Burton, de 1912 (apud ANCEL, 1927) mostrou que o espectro de raios-X poderia fornecer informações valiosas sobre a distribuição de cinzas no carvão, bem como sobre a origem e a estrutura do carvão e do coque. Mais tarde, C. Iwasaki (1926 apud ANCEL, 1927) usou métodos radioscópicos na seleção de amostras de carvão utilizou uma série de radiografias de seções finas para complementar a análise microscópica. Em 1923, o professor Henry Briggs

apresentou radiografias da antracite galesa preparadas por Kemp (1924 apud ANCEL, 1927) e descreveu um método para a extração de materiais carboníferos a fim de determinar seus respectivos teores de cinzas. Finalmente, Kemp (1924 apud ANCEL, 1927) e seus associados, em uma série de trabalhos começando em 1924, descreveram processos e equipamentos utilizados para realizar determinações rápidas e confiáveis das distribuições de cinzas na massa de carvão.

Assim o desenvolvimento do primeiro "*Sorter*" automático tem sido atribuído a diversas personalidades e empresas. Madame Curie costumava receber o mérito pelo desenvolvimento de um "classificador" de raios-X usado na separação de batatas e pedras (SALTER; WYATT, 1991). Apesar da titularidade da invenção, este fato revela que o desenvolvimento de classificadores por sensores na indústria mineral tem estado intimamente ligado ao desenvolvimento de sensores para uso em técnicas analíticas de laboratório.

Por exemplo, em 1898, o "Carboscope", um instrumento que forneceu imagens de atenuação de raios-X de produtos de carvão, foi descrito como um auxílio à preparação de carvão (LOUIS, 1928 apud SALTER; WYATT, 1991). O princípio da discriminação de atenuação de raios-X reapareceu em um classificador de batata / pedra totalmente automatizado na década de 1960 (SLIGHT, 1961). Esta máquina foi posteriormente desenvolvida como um classificador de carvão/rejeitos (JENKINSON, 1971 apud SALTER; WYATT, 1991).

O desenvolvimento de classificadores de alimentos e minerais seguiu caminhos semelhantes, embora por diferentes motivos. A indústria americana de alimentos considerou que a separação automatizada era sua única alternativa de processo viável para processos caros, ineficientes e com mão-de-obra intensiva. A empresa, *Electric Sorting Machine Company* (ESM) da Lowell, lançou seu primeiro sistema de classificação eletromecânica, chamada "Michigan Machine", em 1931 (SALTER; WYATT, 1991). Esse classificador, que detectou e classificou ervilhas usando discriminação óptica, provavelmente foi o primeiro classificador a ser usado comercialmente.

A indústria mineral, por outro lado, não compartilhou a mesma opinião quanto à necessidade de classificadores automáticos e, conseqüentemente, os desenvolvimentos de classificação automática na indústria de minerais, em geral, ficaram para trás da indústria de alimentos. Por exemplo, após a introdução pela

ESM de classificadores de alimentos, vários experimentos de classificação tiveram lugar na indústria mineral.

No entanto, foi apenas em 1946 que o Picker Lapointe (LAPOINTE; WILNOT, 1952 apud SALTER; WYATT, 1991, e BETTENS; LAPOINTE, 1955 apud SALTER; WYATT, 1991), provavelmente a primeira máquina automática de classificação de rocha, foi desenvolvido e utilizado comercialmente no Canadá. A unidade foi o primeiro classificador radiométrico, ou seja, que discrimina rochas com base em concentrações radioativas naturais.

Em 1952, um classificador fotométrico monocromático foi desenvolvido no Reino Unido para classificação mediante o "brilho" do carvão "duro". Isso se mostrou um desenvolvimento significativo, embora tenha sido descrito apenas em uma publicação (NEWMAN; WHELAN, 1952).

Esta modesta introdução do primeiro classificador para uso na discriminação de rochas com base na diferença de reflexão da luz estimulou vários pesquisadores no campo. Cerca de sete anos depois, Kelly e Hutter desenvolveram um classificador fotométrico colorido no Canadá (COLBORNE, 1963). Além do uso de discriminação baseada em cores, este foi o primeiro classificador a medir a área projetada de cada rocha para permitir o cálculo de um teste aproximado do conteúdo da rocha. Essas máquinas, denominadas K+H (Kelly e Hutter), foram usadas amplamente quando se tornaram conhecidas comercialmente como classificador Modelo 6 (M6). Esses classificadores foram instalados, por exemplo, na mina de urânio Mary Kathleen na Austrália onde renderam muitos anos de lucrativa operação (SALTER; WYATT, 1991).

O desenvolvimento de novos classificadores foi estimulado pela redução mundial da produção e consumo de urânio na década de 1960, o que levou os fabricantes a procurar novos mercados e a disponibilidade de novas técnicas. Novas tecnologias de sensores foram desenvolvidas e implementadas sequencialmente para mineração de urânio, níquel, carvão e ouro (SALTER; WYATT, 1991). O Apêndice I contém informações dos equipamentos dos três estágios progressivos de desenvolvimento dessas tecnologias e suas aplicações na mineração entre os anos 1955 e 1976, incluindo o período pioneiro, até 1960; a era do desenvolvimento, entre 1960 e 1970 (muitas dessas instalações foram descontinuadas como resultado de

obsolescência técnica e operacional); e por fim, o período que antecede o atual estado da arte, de 1970 até 1976.

A classificação automática atingiu seu auge na década de 1970 com a aplicação do Modelo 16 (M16) e o desenvolvimento na Austrália, pela mesma equipe de engenharia, do classificador radiométrico, Modelo 17 (M17, Figura 1) em 1978 (KIDD; WYATT, 1982; STONE, 1980). Esta máquina representa o estado da arte em grandes sistemas de alimentação por classificador de partículas e tem sido amplamente utilizado na Austrália e na África do Sul (KIDD; WYATT, 1982; BIBBY, 1982). Ainda que os modelos modernos de *Sorter* tenham sido melhorados, quase todos eles operam segundo o esquema original do modelo M 17.

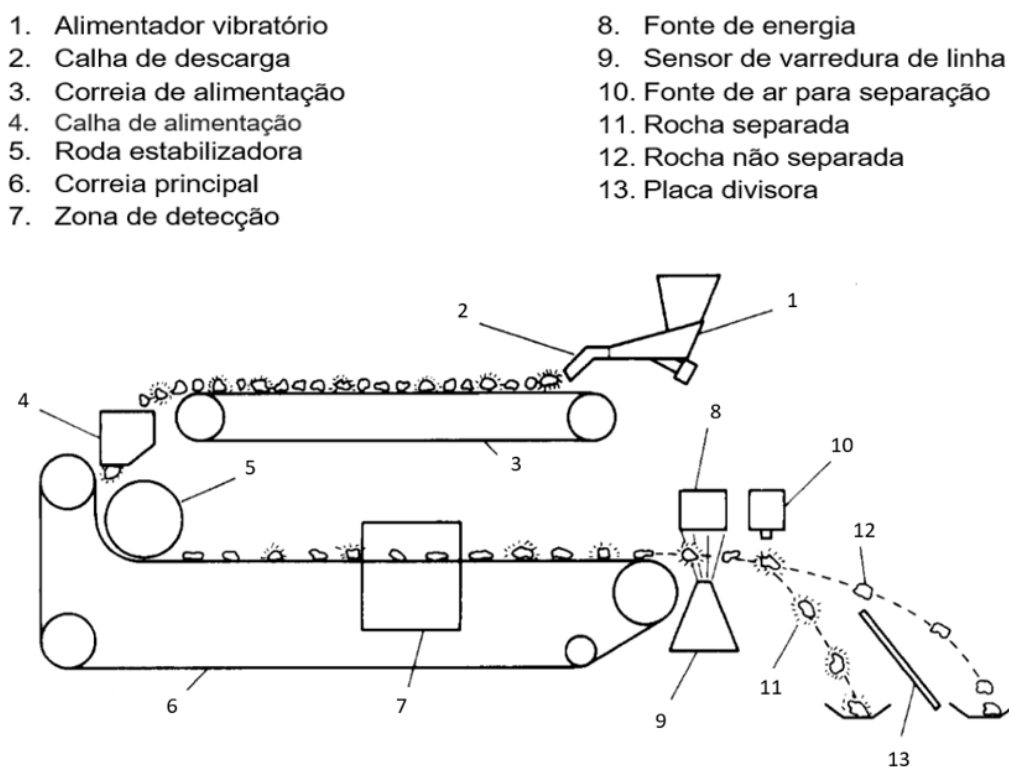


Figura 1. Separador Modelo M17.

Fonte: CUTMORE; EBERHARDT, 2002

Cutmore e Eberhardt (2002) realizaram uma extensa revisão de literatura, encontrando mais de 1300 referências descrevendo vários aspectos da classificação de minerais durante o período de 1960 a 2000. Eles observaram os

desenvolvimentos na classificação automática de minérios foram paralelos aos desenvolvimentos realizados no processamento de alimentos, sendo que as primeiras máquinas de separação de minerais foram usadas na década de 1940. A Tabelas 1 e 2 mostra vários desenvolvimentos nas tecnologias de sensores obtidos nas últimas décadas.

Tabela 1. Processos para Análise de Composição *On-Stream*,

Fonte: Cutmore e Eberhardt (2002)

Processo de Análise	Fonte de raio-X	Procedimento de Medição	Status da aplicação
Fluorescência de raio-X	Tubo Alvo de Alta Voltagem	Detector de cristal de difração e tubo fotomultiplicador	Análise de fluorescência de raio X centralizada convencional centralizada
Fluorescência de raio-X	Raios gama de radioisótopos (pode ser filtrada por absorvedor secundário)	Cristal de cintilação com detector de estado sólido ou tubo de fotomultiplicador, analisador de altura de pulso	Analisador de sonda "on-stream"
Fluorescência de raio-X	Secundário (alvo excitado pela fonte de radioisótopo gama)	Cristal de cintilação com detector de estado sólido ou tubo de fotomultiplicador, analisador de altura de pulso	Analisador de sonda "on-stream"
Ativação de nêutrons	Fonte de neutrons térmicos de radioisótopos	Detector de pulso de cristal de cintilação e fotomultiplicador	Aplicação "on-stream" usada para sílica em pasta de minério de ferro; A análise off-line ou semi-contínua para vários elementos

Tabela 2. Processos para Análise de Composição *On-Stream*,

Fonte: Cutmore e Eberhardt (2002)

Processo de Análise	Fonte de raio-X	Procedimento de Medição	Status da aplicação
Decadência de radioisótopos naturais	Nenhum; Mede a taxa de radiação gama da decomposição do isótopo natural	Detector de pulso de cristal de cintilação e fotomultiplicador	Medição semi-contínua ou contínua de potássio em sólidos de potassa
Absorção	Fonte de radioisótopos gamma	Detector de tubo Geiger-Muller	Determinação da densidade da polpa e ensaio de elementos altamente absorventes, como o chumbo no concentrado de chumbo
Análise mineralográfica quantitativa	Pistola de elétron de raio-X	Contador proporcional de fluxo	Análise por lotes semi-contínua em amostras secas para ensaiar componentes minerais

Pelas tabelas 1 e 2 fica evidente o esforço dos pesquisadores para associar os processos de classificação de materiais as técnicas espectroscópicas. Embora as tecnologias de sensores tenham sido desenvolvidas décadas atrás, a capacidade computacional para acompanhar a grande quantidade de informações necessárias para utilização adequada da tecnologia surgiu só recentemente (LESSARD et. al., 2016). De acordo com De Jong e Harbeck (2005), a velocidade de processamento de dados não é mais uma limitação na produção, sendo progressivamente substituída por limitações na alimentação e de desempenho dos sopradores usados na classificação.

Atualmente, além da melhoria da qualidade do produto, a indústria de processamento mineral também aproveita os benefícios da separação automática por sensores de outras formas, tais como na redução de custos de cominuição e moagem e no emprego de processos de beneficiamento à seco (KROOG, 2005). Os mais modernos sensores produzidos devem ser resistentes ao pó e umidade e devem estar capazes de separar materiais de vários tamanhos e formas, como, por exemplo, sensores eletromagnéticos altamente sensíveis e transmissão de raios-X de energia dupla (DE-XRT), a mesma técnica usado pelo Sorter e será discutido mais adiante (NIENHAUS et al. 2014). A Figura 2, adaptada de Kroog (2005), apresenta a distribuição dos equipamentos de *Sorter* da marca MikroSort® no mundo inteiro.

Distribuição da Tecnologia do MikroSort®

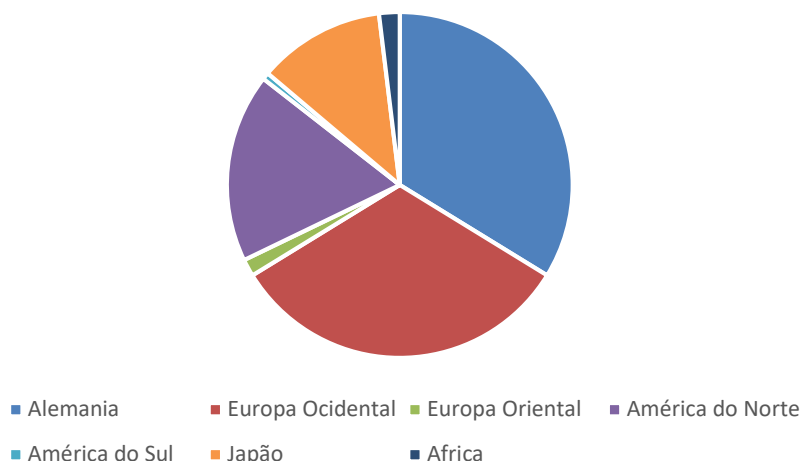


Figura 2. Distribuição da Tecnologia do MikroSort® ao longo do globo.

Fonte: KROOG 2005.

Pela figura 2, observe-se que a distribuição dos equipamentos da tecnologia do MikroSort® estão mais presentes na Europa e América do Norte. Embora esses números representem apenas uma empresa fornecedora dessa tecnologia, o uso dessa tecnologia no mundo está distribuído basicamente da mesma forma, sendo que a Alemanha produz e usa muito dessa tecnologia. Os classificadores de corrente são do tipo correia ou calha, e ambos operam em cinco diferentes etapas:

condicionamento do material, transporte do material, detecção, processamento de dados e separação, como mostrado na Figura 3.

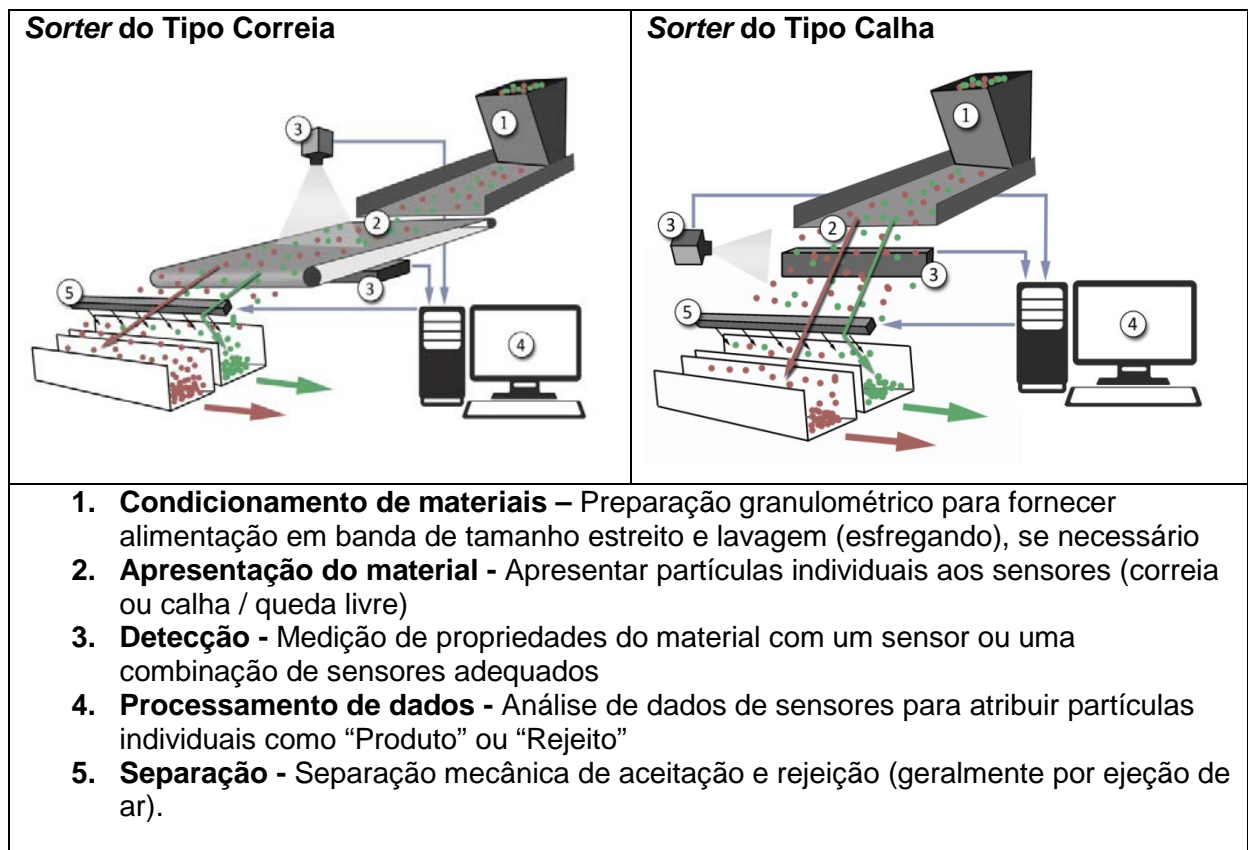


Figura 3. Os dois principais modelos de *Sorter* utilizados atualmente.

Fonte: Duffy et al.(2015)

O tamanho de partícula a ser separada é o fator que mais influencia o tipo de *sorter* (calha ou correia a ser usada). Uma preparação cuidadosa da alimentação deve ser realizada a fim de que partículas individuais possam ser detectadas e medidas. A ejeção de partículas individuais é normalmente realizada por meio de jatos de ar comprimido. Consequentemente, os classificadores atuais têm uma capacidade muito baixa (até 300 tph para partículas maiores e muito menos para

partículas menores) quando comparado com a produção necessária por muitos mineradores e com *sorters* de massa. Deste modo, eles geralmente não são economicamente viáveis na pré-concentração de altas tonelagens. Para tanto, quando a classificação do minério precisa ser aplicada a grandes quantidades de minério, como em uma bandeja de caminhão carregada ou uma correia transportadora totalmente carregada, existem outros sensores que podem ser usados (DUFFY et al. 2015).

2.2 Princípios de funcionamento de sensores

A luz visível é produzida quando um elétron desloca e depois retorna para sua camada original. A luz tem um comportamento de uma onda eletromagnética. Sendo assim ela se propaga no vácuo, com uma variação no tempo (frequência). Estas determinam as cores da luz. Para uma determinada faixa de frequência se absorvem as cores, e essa faixa de cores é o espectro da luz visível (o vermelho ocorre a baixa frequência e baixa energia, e o violeta ocorre a maior frequência e maior energia). Quando o deslocamento de um elétron envolve elétrons de camadas internas de um átomo, têm-se a emissão de raios-X (KNIGHT; KNIGHT, 2007). Isso geralmente é realizado através do impacto de um elétron livre com velocidade suficiente para penetrar no interior do átomo. Nesse impacto, elétrons da órbita eletrônica interna deslocam-se, e o preenchimento da lacuna deixada por um elétron mais externo é o que dá origem à emissão de raio-x. Os raios-X emitidos desta maneira têm comprimentos de onda específicos para cada átomo, sendo assim denominados de raios-X característicos do elemento. Além disso, a paralisação do elétron livre também resulta na emissão de uma série de ondas conhecidas como raios-X gerais ou independentes, com comprimentos de onda que excedem o mínimo determinado pela velocidade dos elétrons impactantes (KEMP, 1924). Os raios-X são transmitidos em diferentes graus para cada material, dependendo da densidade do mesmo. Assim, uma porção da radiação é absorvida por um dado material, resultando em uma redução na intensidade do raio-X. Esse fenômeno, referido como

amortecimento da transmissão, pode ser explicado pela teoria da transmissão de raios-X.

LINDNER (2010) sugere que o uso da tecnologia sensor-based Sorting (SBS) só é possível se existirem interações eletromagnéticas em todos os espectros de onda que interagem com o minério sólido, as quais dependerão diretamente das características do material. Assim, ao irradiar um material por ondas eletromagnéticas com diferentes tipos de radiação, a resposta detectada deve se manifestar na forma de fluorescência, reflexão, remissão, absorção e/ou transmissão.

Conforme mostra a Tabela 3, a faixa de energia de fóton dos tipos de onda varia entre 10^{-9} a mais de 10^6 eV. A diferença entre as variações do espectro eletromagnético só pode ser visível para o olho humano para energias de fótons aproximadamente de 1.24 a 12.4 eV (WOTRUBA *et. al.*, 2014). Como é evidente pela tabela, os equipamentos de classificação que utilizam frequências que vão desde os raios-X até a luz visível podem ser aplicados na maioria dos minerais e metais conhecidos atualmente.

Os raios-X usados para fins técnicos de radiografia de diagnóstico geralmente são produzidos através de aceleradores de elétrons chamados tubos de raios-X (WIKIBOOKS CONTRIBUTORS, 2017). Estes consistem em uma lâmpada de vidro de paredes finas altamente evacuada contendo um filamento espiral de tungstênio chamado de cátodo. O cátodo emite os elétrons ao um bloco de metal pesado, geralmente feito por tungstênio ou molibdênio, chamado de alvo ou ânodo. O fornecimento de elétrons livres é obtido por aquecimento do filamento com uma corrente auxiliar. Aceleração é conferida aos elétrons, imprimindo a tensão de um transformador de alta tensão entre o filamento e o alvo, usando meios adequados, como um interruptor giratório de alta tensão, um tubo retificador ou a ação de retificação do próprio tubo de raios-X. O alvo é mantido frio a fim de garantir o fluxo de elétrons somente do filamento ao alvo (KEMP, 1924). A Figura 4 mostra um diagrama geral de um tubo de raios-X.

Tabela 3. O espectro eletromagnético, os diferentes sensores disponíveis para a classificação baseada em sensores e os minérios que geralmente usam.

Fonte: Adaptado do DE JONG, 2005

Tipo de onda	Energia de fóton (eV)	Tecnologia de Sensor	Propriedade do Material	Aplicação Mineral
Radiação Gamma	$+10^6$	RM (Radio métrico)	Radiação Natural de Gamma	Uranio, Metais Preciosos
Raio-X	10^5	XRT (Transmissão de Raio-X)	Densidade Atômica	Carvão, Diamante, Metais básicos e preciosos
Raio-X	10^4	XRF (Florescência de raio-X)	Florescência visível sob raio-X	Diamantes
Luz ultravioleta	10^2-10^3	Cor (CCD Câmera)	Reflexão, Alvura, Transparência	Metais básicos/preciosos, Minerais Industriais, Diamantes
Luz visível	10^1-10^0	PM (Fotométrico)	Monocromático, reflexão/absorção	Minerais Industriais, Diamantes
Próximo ao infravermelho (NIR)	10^{-1}	NIR (Próximo ao Infravermelho)	Reflexão, Absorção	Metais básicos, Minerais Industriais
Infravermelho (IR)	$10^{-2}-10^{-4}$	IR (Infravermelho)	Condutividade de calor, Dissipação de calor	Metais básicos, Minerais Industriais
Micro-ondas	$10^{-5}-10^{-6}$	MW (Aquecimento em conjunto com IR)	Sulfitas e metais aqueçam mais rápido que outros minerais	Metais básicos/preciosos
Ondas de rádio	$10^{-7}-10^{-9}$			
Corrente Alternada (AC)	-	EM (sensor eletromagnético)	Condutividade	Metais básicos

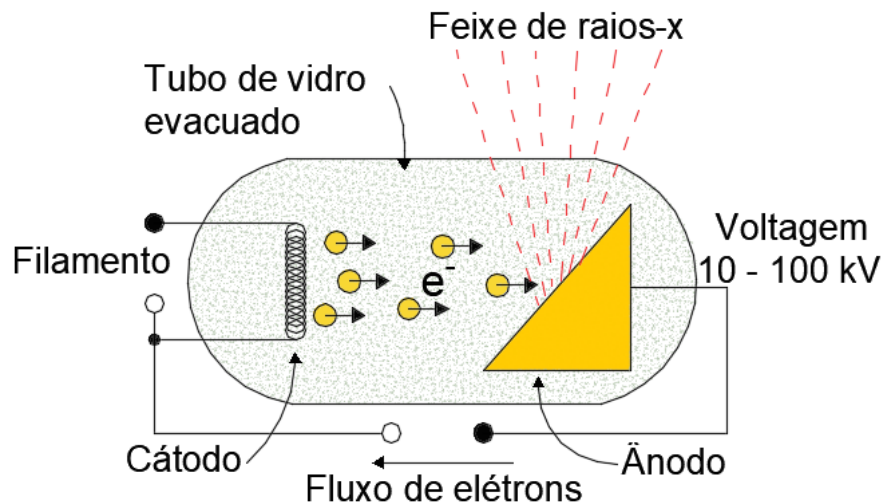


Figura 4. Diagrama de um tubo de raio-X.

Fonte: Adaptado do LINDER 2010.

A maneira que os elétrons interagem com o alvo, o espectro contínuo de raio-X surge, devido à desaceleração dos elétrons atingindo o alvo. Dessa forma, geram-se comprimentos de onda dos raios-X na faixa de $0,5$ a $2,5 \times 10^{-9}$ m. Este tipo de radiação é conhecido como *bremsstrahlung*, alemão para "Radiação de frenagem". Nesse caso, alguns elétrons perdem toda a energia em uma única colisão com um alvo átomo. Esse tipo de radiação pode ser chamado de policromática, radiação contínua ou radiação branca, e demonstra uma característica lisa e monotônica de intensidade em função do comprimento de onda (KNIGHT; KNIGHT, 2007).

Existe outro espectro de raio-X chamado de espectro característico. Esse espectro é usado principalmente com difração de raio-X, onde o pico característico do átomo é criado quando um buraco no invólucro interno, criado por um evento de colisão, é preenchido por um elétron de maior energia originado no invólucro externo. A maneira que a distancia entre os invólucros é característica do átomo, as energias dos raios-X gerados, e então seus comprimentos de onda, dependam diretamente do átomo que os emitir.

Os raios-X são invisíveis para o olho humano e produzem efeitos fisiológicos muito sérios quando incidem em qualquer parte do corpo em tempos prolongados. Assim, algum outro método que não a visão direta deve ser usada para detectá-los.

Quando atravessam uma substância, parte da energia é absorvida, parte é dispersa e o restante é transmitido. Algumas das energias absorvidas podem ser emitidas novamente como raios-X mais longos, conhecidos como raios secundários, ou às vezes como luz visível ou fluorescência. Em alguns casos, parte da energia absorvida pode causar transformações físicas ou químicas no material, como a ionização de um gás ou a ativação de uma emulsão fotográfica. A intensidade de tais efeitos depende da intensidade dos raios que os produzem e podem ser utilizados como meios para detectar ou registrar a radiação (C. KEMP, 1924).

A quantidade de absorção e dispersão depende do comprimento de onda dos raios-X, do número e disposição dos elétrons nos átomos absorventes e do número de átomos de cada tipo que são encontrados, mas é praticamente independente da maneira como os átomos estão arrumado entre si. Exposto de outra forma, depende da densidade atômica do alvo e espessura do material absorvedor. Em geral, para uma determinada voltagem, a absorção aumenta rapidamente com a densidade atômica do absorvedor. Para um determinado absorvente, ela diminui rapidamente com a tensão. Quando é utilizada uma tensão adequada, é possível determinar a distribuição de material com uma densidade atômica diferente do demais material, como sílica no ferro, observando uma tela fluorescente em uma sala escura ou por um registro de imagem. A intensidade dos raios-X gerados depende da corrente e voltagem aplicado ao ânodo. Para apreciar o tanto que a tensão afeta o número de fótons de raios-X gerados, a Figura 5 mostra essa forte dependência.

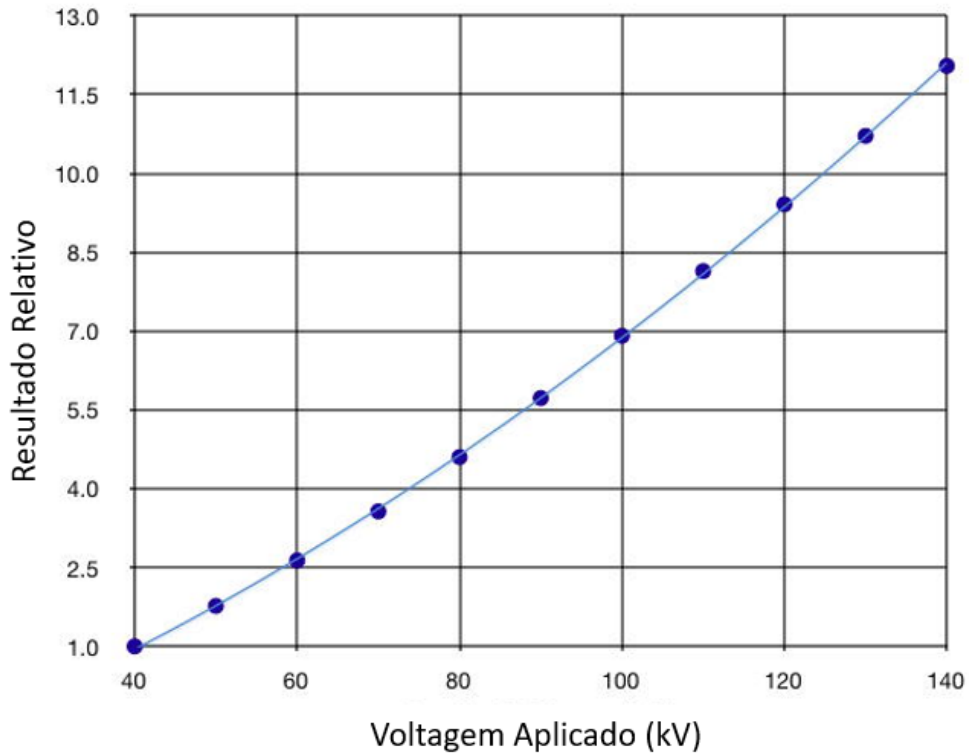


Figura 5. Voltagem aplicada e o resultado relativo na intensidade do raio-X.

Fonte: KIERANMAHER, 2011

Pela Figura 5, o número de fótons produzidos a 100 kV é cerca de 7 vezes o número produzido a 40 kV, mostrando que um aumento de kV de 2.5 vezes resulta em um aumento de mais de 7 vezes no número de fótons gerados.

HUBBELL e SELTZEREM (1996), ao catalogar a atenuação de 92 elementos, descrevem os coeficientes de atenuação de raios-X da seguinte forma: um feixe estreito de fótons mono energéticos com uma intensidade incidente I_0 (W/m^2), penetrando uma camada de material com espessura de massa x (m) e densidade ρ (kg/m^3), emerge com intensidade $I_{det}(W/m^2)$ dada pela lei de atenuação exponencial (Equação (1)):

(1)

$$\frac{I_{det}}{I_0} = e^{(-\mu/\rho)x}$$

Onde μ/ρ é o coeficiente de atenuação do material em unidades de m^2/kg (ou cm^2/g) (μ está em unidades de m^{-1}).

Estritamente falando, μ/ρ é o coeficiente de atenuação por massa específica do material e x é definido como a espessura do material por unidade de área e é obtida pela multiplicação da espessura t (*m ou cm*) pela densidade ρ (kg/m^3 ou g/cm^3), como mostrada pela equação (2).

(2)

$$x = \rho t$$

Assim, a equação (1) pode ser reescrita como:

(3)

$$\frac{\mu}{\rho} = x^{-1} \ln\left(\frac{I_0}{I_{det}}\right)$$

Através da equação (3), μ/ρ pode ser obtido a partir dos valores medidos de I_0 , I_{det} e x . Os valores de μ/ρ dependem fortemente dos valores teóricos da seção transversal total por átomo, σ_{tot} , porém para o escopo desse estudo esses valores, tais como o efeito foto nuclear, a dispersão de ressonância nuclear, as seções transversais coerentes e incoerentes, os efeitos de produção de elétron-pósitron nos campos do núcleo e a dispersão de Delbrück, foram generalizadas já anteriormente pelo fabricante do equipamento. As informações de coeficientes de atenuação dos elementos pertinentes ao esse estudo compõem anexo I desse documento, e foram feitas usando valores que estão publicamente disponíveis pelo Instituto Nacional de padronização e Tecnologia, *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

Dependendo da energia que os fótons possuem, as interações fóton-átomos podem ser aproximadas em função da energia do fóton. A Figura 6 mostra a maneira pelo qual a coeficiente de atenuação de massa do ferro varia e depende da energia do fóton.

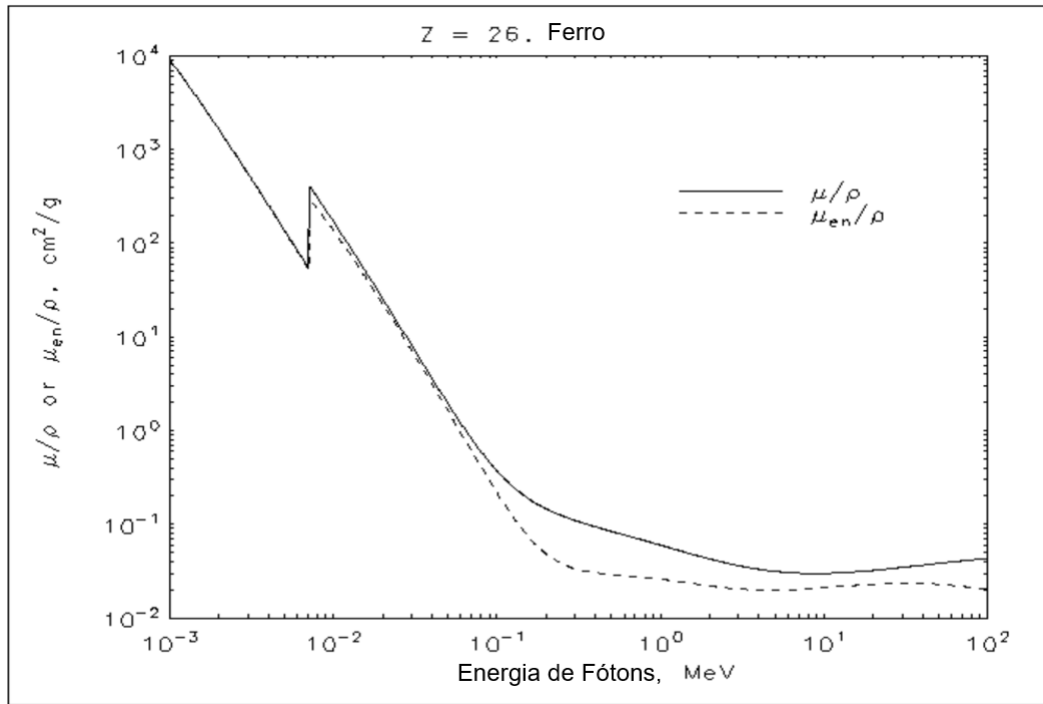


Figura 6. Coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) e o coeficiente de absorção de energia em massa (μ_{en}/ρ) do ferro e a energia do fóton.

Fonte: NIST 2017.

Pela figura, pode ser observada que a relação entre μ/ρ e a energia do fóton tem uma relação logarítmica entre 10^{-3} e 10^{-1} MeV. A descontinuidade na curva resulta quando a energia do fóton atinge o valor da energia de ligação da camada K (+ interna) e descreve a probabilidade de interação em função da energia chamada pico de absorção K. A probabilidade de interação, que decresce com o aumento de energia do fóton, sofre um aumento repentino e característico do átomo para depois cair novamente. O coeficiente de atenuação por massa específica varia conforme o comprimento de onda do raio-X varia. A extensão da mudança depende do número atômico efetivo (Z_{eff}) do material no qual os raios-X são absorvidos.

A energia do fóton está diretamente relacionada com seu comprimento de onda, conforme a equação (6):

(4)

$$E = hc/\lambda$$

Onde E é a energia do fóton (em eV), h é a constante de Planck (6,62607004 $\times 10^{-34}$ m² kg / s), c é a velocidade da luz no vácuo (299.792.458 m/s) e λ é o comprimento de onda do fóton (em nm).

Como as variações significativas na espessura das partículas são antecipadas para a classificação de minerais, o uso de uma única onda de energia para identificar minerais seria impreciso. Observar os efeitos de dois ou mais comprimentos de onda diferentes descarta os efeitos da espessura das partículas. Considerando esses obstáculos, a transmissão de raios-X por energia dupla envolve o uso de um feixe de raios-X e detectores de alta e baixa energia. Isto é um feixe de raio-X do espectro contínuo que passa a ser filtrado por um material conhecido (no caso do *Sorter* 0.6mm Cobre (Cu)). Assim, as ondas que passam pelo filtro são de uma energia maior as que não passam. Um detector mede as energias dos fótons que passa pelo material e registra no detector, e outro mede as energias dos fótons que passam pelo material, pelo detector anterior, e pelo filtro do material conhecido. O processo de transmissão de raio-X implica em que deve haver absorção de raio-X pelo próprio elemento e também pelos átomos de algum elemento vizinho. O processo de absorção é aleatório, a feixe é atenuada exponencialmente em função da espessura do absorvedor.

Resumindo a relação entre o comprimento de onda, as intensidades dos feixes estreito de fótons inicial (sem nenhuma amostra) e final (com a amostra presente), e a espessura do material, a aplicação da Lei de Lambert pode ser usada (DE JONG; HARBECK, 2005). Por essa lei, a dupla transmissão de energia pode ser representada conforme mostrado na equação (5):

(5)

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{(-\mu/\rho)_2 x} - e^{(-\mu/\rho)_1 x} = e^{(-\Delta\mu/\rho)x} = C_m^x$$

Onde $I_1/I_2 = I_{det1;2} / I_{o1;2}$ são as intensidades adimensionais detectadas em dois comprimentos de onda diferentes; $\mu/\rho_{1;2}$ são os coeficientes de atenuação em dois comprimentos de onda diferentes e C_m é uma constante dependente apenas das propriedades do material e do comprimento de onda escolhido.

Como resultado, se o C_m de dois materiais forem diferentes, esses materiais podem ser distinguidos uns dos outros. A medição de I_1 e I_2 pode ser utilizada para

avaliar C_m e, portanto, aproximar o número atômico efetivo do material. Tendo o número atômico efetivo do material, um valor de μ/ρ a espessura da partícula pode ser determinada depois pela resolução da equação (3) para a variável x .

C_m representa uma constante que só depende dos comprimentos de onda escolhidos e das propriedades do material. Se o C_m de dois materiais forem diferentes, eles podem ser distinguidos uns dos outros. Em uma medição de raios-X de energia dupla, a magnitude relativa de I_1 em relação a I_2 determina C_m e, o valor absoluto de I_1 (ou equivalentemente I_2) determina x .

De acordo com DE JONG e HARBECK (2005), a determinação da precisão que pode ser alcançada com os dispositivos atualmente disponíveis é um assunto importante das investigações atuais. A precisão depende do desempenho da máquina, da espessura da amostra (em relação a distância da amostra da fonte de raio-X e o tamanho operacional) e especialmente da quantidade e a variação de elementos de contaminantes. Por exemplo, as variações não relacionadas com as cinzas no conteúdo de metal reduzem a precisão da determinação de cinzas. Deve-se notar que, para aplicações on-line, o conhecimento instantâneo de flutuações e tendências de nível é muitas vezes mais importante do que alcançar uma precisão igual em uma extensa análise laboratorial. Em segundo lugar, inspecionando quantidades maiores, ou mesmo todas as transmissões, os erros de amostragem serão menos em comparação com a análise laboratorial.

2.3 As técnicas de separação

Basilar para o entendimento e uso correto do *Sorter* (COMEX Lab-*Sorter* modelo MSX-400-VL-XR-3D) é a compreensão que o equipamento usa a técnica de transmissão dos raios-X por energia dupla (DE-XRT), e que nessa técnica a atenuação dos raios-X está correlacionada com a densidade atômica. Durante a classificação, as partículas são penetradas por raios-X que são emitidos de uma fonte em comprimentos do espectro contínuo. Os raios-X emitidos interagem com as partículas que passam na zona de detecção e a radiação transmitida (atenuada) é detectada por dois detectores de cintilador de *Scan* por linha no lado oposto do fluxo de material. As intensidades dos raios-X transmitidos dependem do número atômica dos materiais, assim os elementos com um elevado número atômico absorvem mais

raios-X do que aqueles com menor número atômico. Os raios-x transmitidos são detectados pixel a pixel e são posteriormente convertidos em sinais elétricos, com base nestes sinais duas imagens em tons de cinza são criadas; os pixels escuros correspondem a uma absorção relativamente forte enquanto os pixels mais claros correspondem a uma absorção de raios-x relativamente baixa (NEUBERT; WOTRUBA, 2016).

É fundamental salientar o fato que o equipamento não mede a densidade atômica diretamente e sim a queda de energia da onda dos raios-X correlaciona esta energia a densidade atômica da partícula analisada, lembrando que as densidades atômicas dos produtos e dos rejeitos são características intrínsecas dos materiais submetidos a teste no equipamento. A propriedade intrínseca de um material ou de um sistema independe da quantidade nele contido e da forma do material, depende principalmente da composição química ou estrutural do material. Neste estudo, as propriedades intrínsecas dependem exclusivamente da estrutura do material em escala atômica, apesar de o sensor não ser capaz de capturar as imagens a níveis atômicos. No foco deste estudo, os sensores capturam os raios-x já atenuados e os correlaciona à densidade atômica média do material dentro de todo o volume representado por cada pixel e formam uma imagem numa escala de cinza baseando-se nos valores de intensidade dos pixels capturados.

A imagem gerada pela emissão de dupla energia promove sinais simultâneos de energia transmitida com diferentes características através do detector que possui dois captadores dispostos em série. O primeiro absorve preferencialmente a menor energia de radiação e o segundo absorve a maior energia. Estes captadores/detectores podem ser idênticos, sendo que a característica preferencial de cada um é desenvolvida em função da posição em que se encontra. Alternativamente, as características dos detectores podem ser selecionadas para produzir o efeito desejado, além de ser possível o uso de um detector gasoso pressurizado utilizando uma tela cintilante que pode ser inclinada ou o seu comprimento selecionado para produzir a característica de absorção desejada (BJORKHOLM, 1985).

Devido ao fato de que a intensidade medida de cada pixel em um espectrômetro de raios-x ser um resultado médio para a atenuação destes raios em função da espessura da partícula examinada, o sensor de raios-x gera resultados

que exibem a homogeneidade do material. Diferenças entre a posição de uma medição relativa ao objeto entre a fonte de emissão de raios-x e o detector podem existir em cada exibição. Portanto, dependendo da orientação relativa do material, todos os objetos não uniformes apresentam resultados diferentes de medidas, como ilustrado na Figura 7 abaixo. Além disso, a análise de certos materiais pode causar interferência e gerar dados imprecisos induzindo a separação indesejada. (KLEINE, 2010).

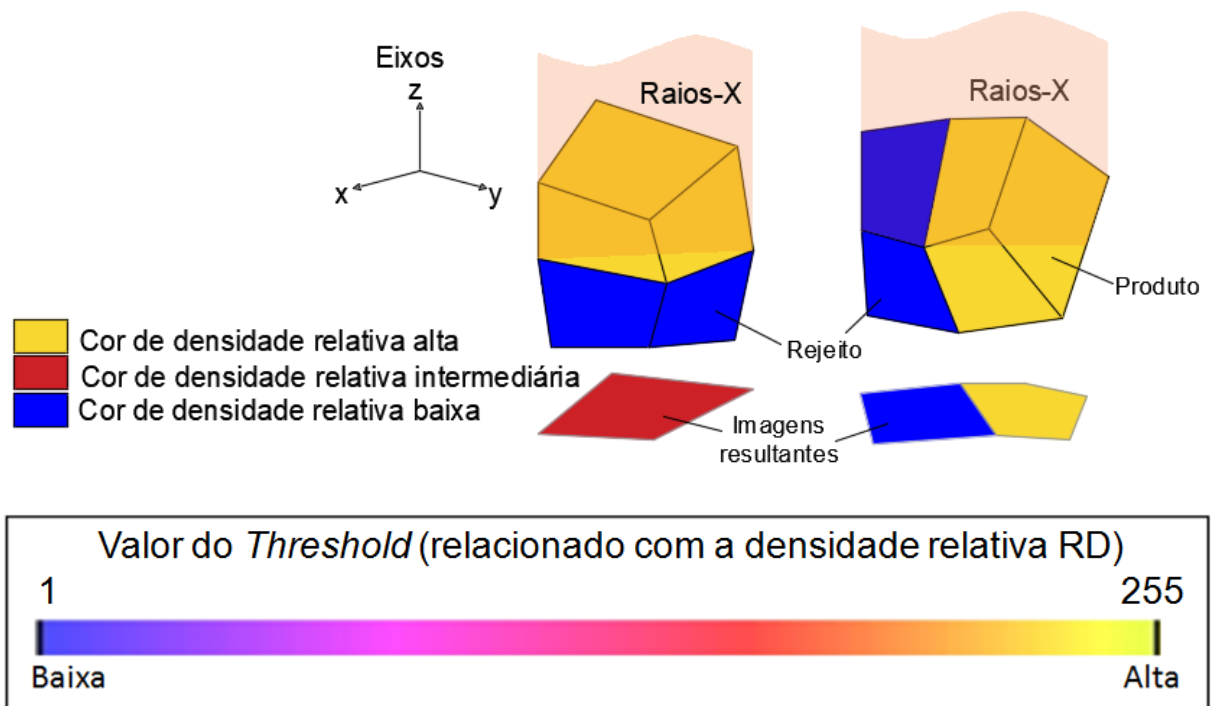


Figura 7. Exemplo teórico da influência da posição do material durante a verificação e os dados compilados resultantes.

Fonte: Adaptado de Wotruba et al 2014.

Pela Figura 7, as cores nas imagens resultantes representam a densidade do material representado na partícula mostrada. Na esquerda, conforme a posição da partícula, a imagem resultante é definida por uma partícula de densidade intermediária cujo área compõem a área total da partícula. No lado direito a imagem resultante é definida por duas áreas, uma de densidade baixa, e outra de densidade alta. Embora que as imagens são diferentes, ambos representam a mesma densidade media da partícula.

A partir das dificuldades apresentadas por diferenças de imagens, DE JONG e HARBECK (2005) sugeriram que se comparar e planejar o grau de transmissão de raios-X através de partículas em dois níveis de energia diferentes, uma curva de transmissão específica para esse tipo de material poderia ser gerada, e de acordo com o tipo de material teria umas curvas de transmissão separadas. Esta teoria foi examinada utilizando misturas de zinco e sulfeto de chumbo, como demonstrado na Figura 8 e Figura 9 abaixo, respectivamente. Essas curvas poderiam ser derivadas para vários graus de um elemento particular.

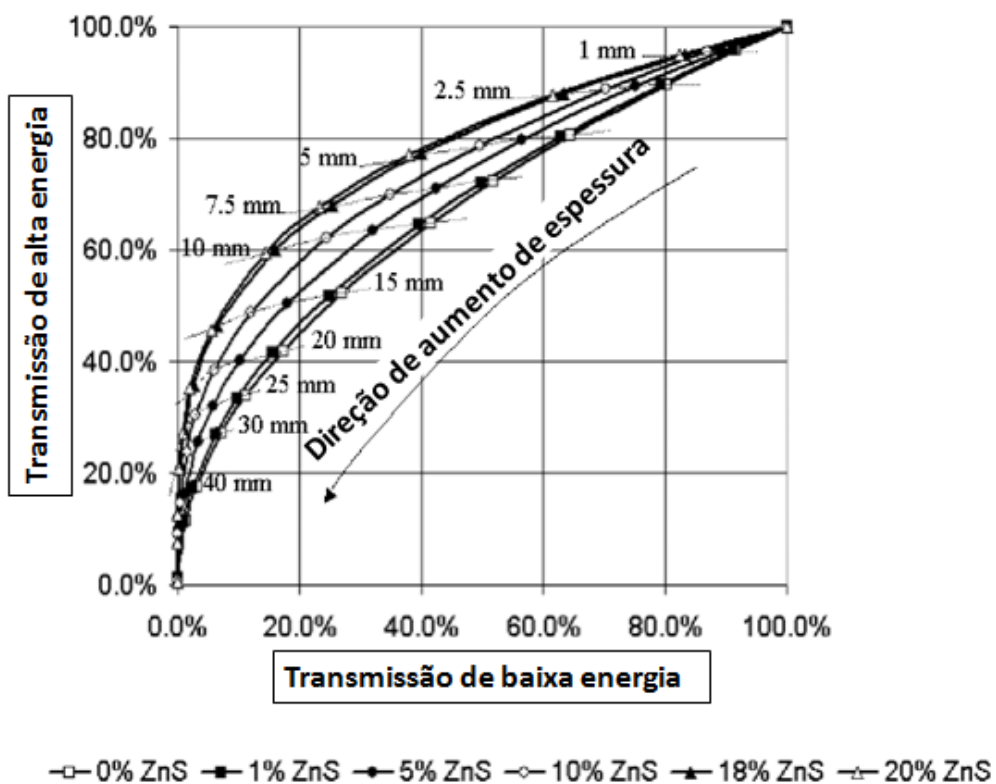


Figura 8. Curva de transmissão teórica DE-XRT para 124 / 62kV para variação no conteúdo de ZnS.

Fonte: DE JONG; HARBECK, 2005

Pela Figura 8, um valor de 100% de energia transmitida corresponde a uma espessura mínima de material, e um valor de 0% de energia transmitida corresponde a uma espessura máxima de material. A curva resultante de transmissão de energia varia conforme a quantidade de ZnS misturada na amostra. A razão entre a

transmissão de baixa e alta energia por cada mistura de ZnS está mostrado no gráfico como a curva resultante.

Ainda, DE JONG e HARBECK (2005) demonstraram que os materiais podem de fato ser distinguidos entre si se as curvas nos gráficos de transmissão não forem coincidentes, fundamentando o conceito de que a curva de transmissão única por tipo de minério constitui como base da classificação de DE-XRT.

As imagens produzidas pela transmissão de raios X através de objetos podem fornecer uma grande quantidade de informações em relação à sua densidade, ou seja, um objeto de baixa densidade parece mais brilhante do que um objeto mais denso na imagem gerada de raios-X. É uma técnica amplamente utilizada nas indústrias de segurança médica e aeroportuária. Ao examinar o brilho produzido por materiais em duas intensidades diferentes de raios X, pode-se derivar uma interpretação visual da Figura 8 e Figura 9.

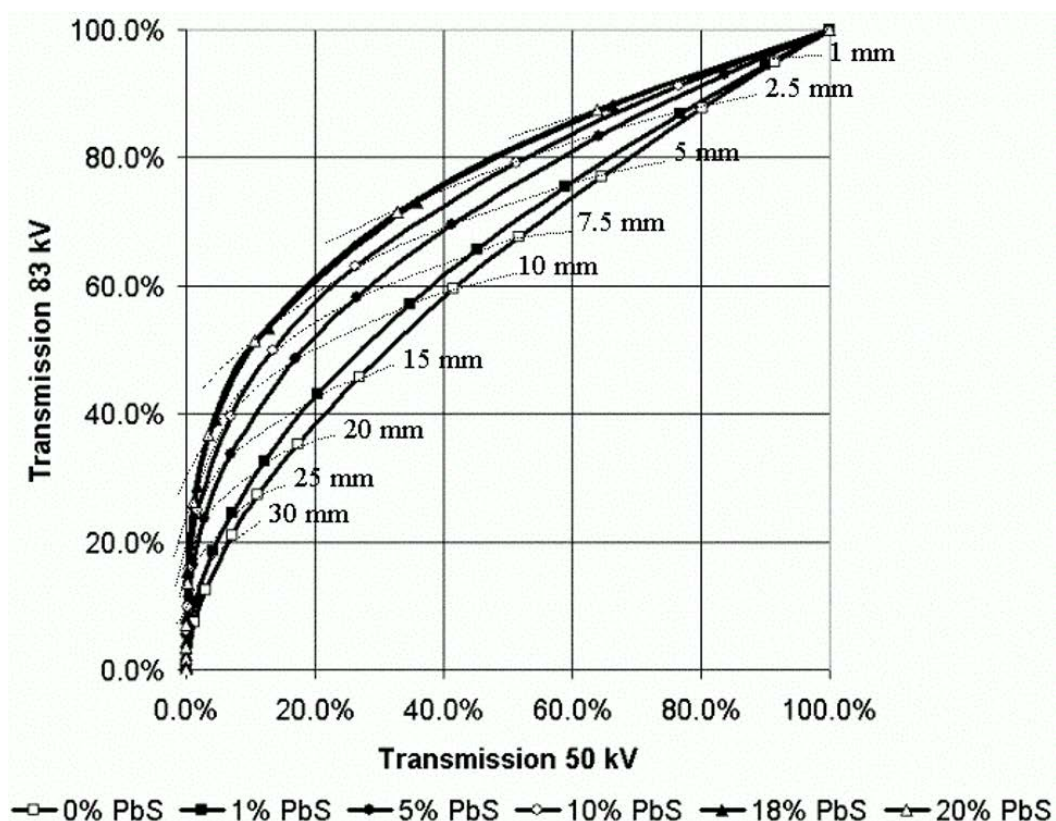


Figura 9. Cálculo do modelo de misturas de PbS a 110kV / 62kV e a 83kV / 50kV.

Fonte: DE JONG; HARBECK, 2005

Pela Figura 9, um valor de 100% de energia transmitida corresponde a uma espessura mínima de material, e um valor de 0% de energia transmitida corresponde a uma espessura máxima de material. A curva resultante de transmissão de energia varia conforme a quantidade de PbS misturada na amostra. A razão entre a transmissão de baixa e alta energia por cada mistura de PbS está mostrado no gráfico como a curva resultante.

Cada minério representa desafios diferentes para os sensores de raios-X, mas eles são semelhantes pelo lado densimétrico, sendo que todos os elementos dos produtos desejados encontrados nos minérios têm densidade atômica e coeficientes de atenuação muito maior do que o rejeito que se encontra misturada junto com o minério (normalmente na ordem de duas vezes ou mais). A Tabela 4 mostra os elementos desejados dos produtos estudados, e as densidades atômicas dos elementos de rejeitos comuns que se encontram com os minérios estão manifestados na Tabela 5.

Tabela 4. As densidades atômicas dos elementos dos produtos nos testes.

Elementos Indicadores dos Produtos	
Elemento	Densidade Atômica (g/cm³)
Zinco (Zn)	7.13
Manganês (Mn)	7.43
Ferro (Fe)	7.87
Chumbo (Pb)	11.35

Tabela 5. As densidades atômicas dos elementos associados com rejeito.

Elementos Indicadores dos Rejeitos	
Elemento	Densidade Atômica (g/cm³)
Sódio (Na)	0.97
Oxigênio (O)	1.43 *
Calcio (Ca)	1.55
Magnésio (Mg)	1.74
Potássio (K)	1.78

Sílica (Si)	2.33
Alumino (Al)	2.7
Cloro (Cl)	3.21
Titânio (Ti)	4.54

*A unidade está em kg/m³, por elementos de gás

Sendo que o *Sorter* não mede densidade atômica diretamente, mas mede atenuação do raio-X, Figura 10 demonstra as curvas de coeficiente de atenuação μ/ρ (cm²/g) por energia de fóton para diferentes elementos. Os valores de μ/ρ dos produtos comparado com os dos demais elementos que se encontram normalmente nos minérios da mina, têm valores de μ/ρ maior do que os demais elementos para a faixa de energia de fóton do equipamento quando são colocadas na escala logarítmica.

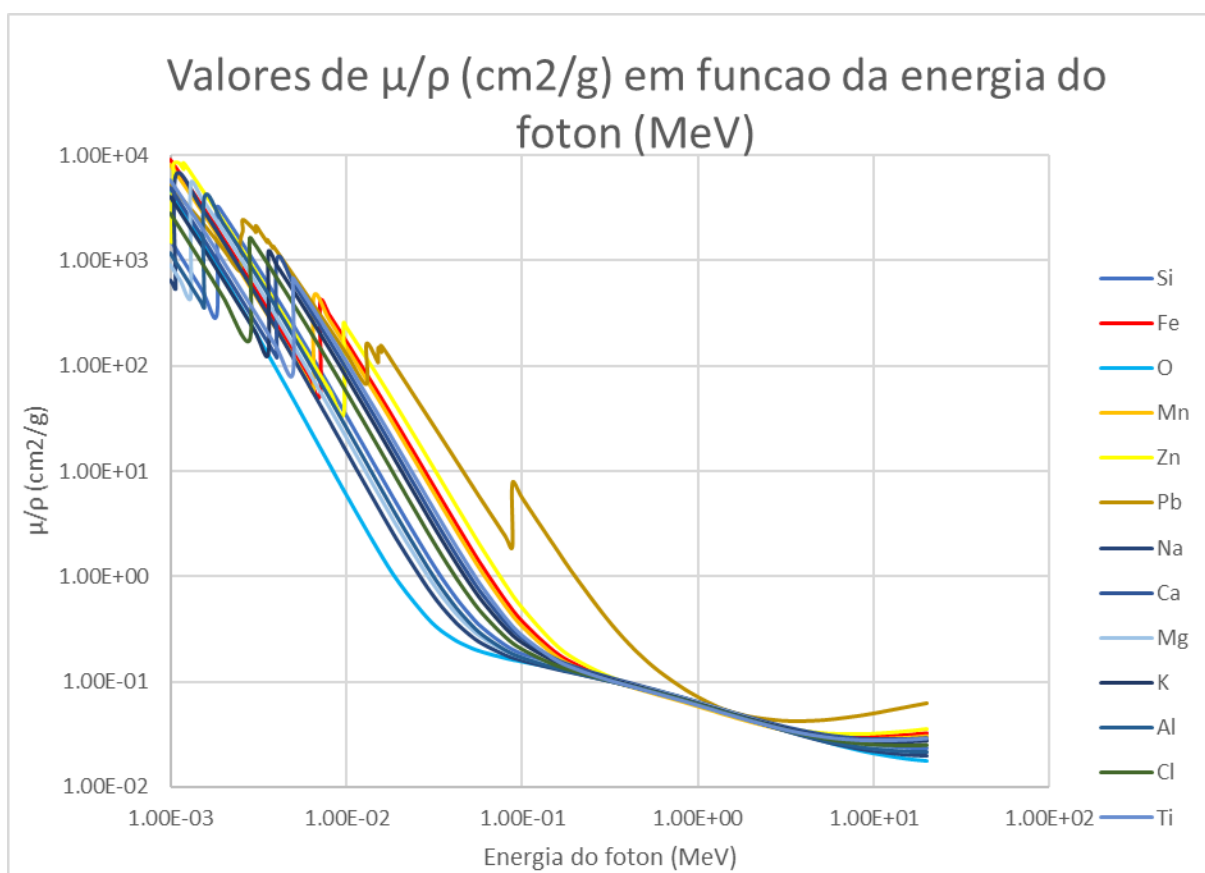


Figura 10. μ/ρ de Ferro por energia de fóton dos elementos comuns examinados.

Fonte: Adaptado dos valores disponíveis no NIST

Na seção 3.3.1 *Escaneamento* e calibração do equipamento, adiante, descrevem as curvas de classificação pré-programadas no *Sorter* modelo MSX, e a Figura 18 na página 49 mostra as curvas de classificação teórica do *Sorter*.

O processo de classificação por raios-X ocorre quando as amostras passam entre um emissor de raios-X em direção a um detector e o detector lê o nível de radiação transmitida e o converte em dados usáveis. As imagens geradas são atribuídas à imagem numa escala de cinza de acordo com um esquema de cores definido em que os pixels que representam áreas de alto valores equivalentes de densidade atômica dentro da amostra recebem certas cores (amarelo). Por outro lado, os pixels que representam áreas da imagem de baixo valores equivalentes de densidade atômica são coloridos de cores contrastantes (azul).

A Figura 11 demonstra como as imagens de altas e baixas energias estão superpostas e os pixels estão coloridos por cores falsas, por exemplo, amarelo ou laranja, enquanto que os pixels correspondentes a áreas de baixo equivalente em densidade atômica são atribuídos cores contrastantes, por exemplo, azul ou roxo (KLEINE, 2010).

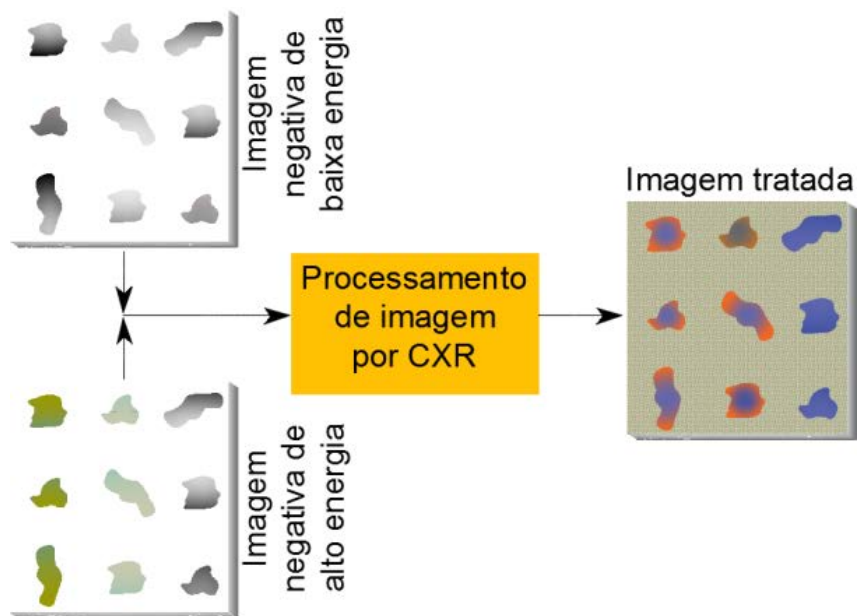


Figura 11. Conversão de imagens de raios X em uma figura tratada.

Fonte: Adaptado de WOTRUBA et al 2014.

Cada pixel nas imagens criadas representa um valor para um determinado volume da amostra, porém, cada pixel é uma representação em 2-D de uma media do material em 3-D. Depois de atribuir os valores e cores (correspondentes as densidades atômicas pela escala determinada) a cada área do material em questão, o equipamento então analisa o material como uma partícula total e determina a qual categoria (produto ou rejeito) a amostra pertence. Depois, o material é separado por meios mecânicos simples (calha) (WOTRUBA et al., 2014).

No caso dos classificadores DE-XRT, o emissor utilizado é um tubo de raios-X. O DE-XRT implementa um sistema de detecção que é mostrado na Figura 12 e compreende duas camadas de cintiladores e fotodiodos separados por um filtro, com a primeira camada detectando longos comprimentos de onda de baixa energia e a segunda camada detectando comprimentos de onda menores de alta energia (KIEHLMANN, 2011). Os cintiladores absorvem a energia transmitida pelo raio-X e, através de luminescência, reemitem a energia absorvida na forma de luz. Os fotodiodos são dispositivos semicondutores que convertem a luz recebido do cintilador em uma corrente elétrica. Essa corrente por sua vez transforma de um sinal elétrica para informação digital. Dessa forma medida da radiação incidente é feita.

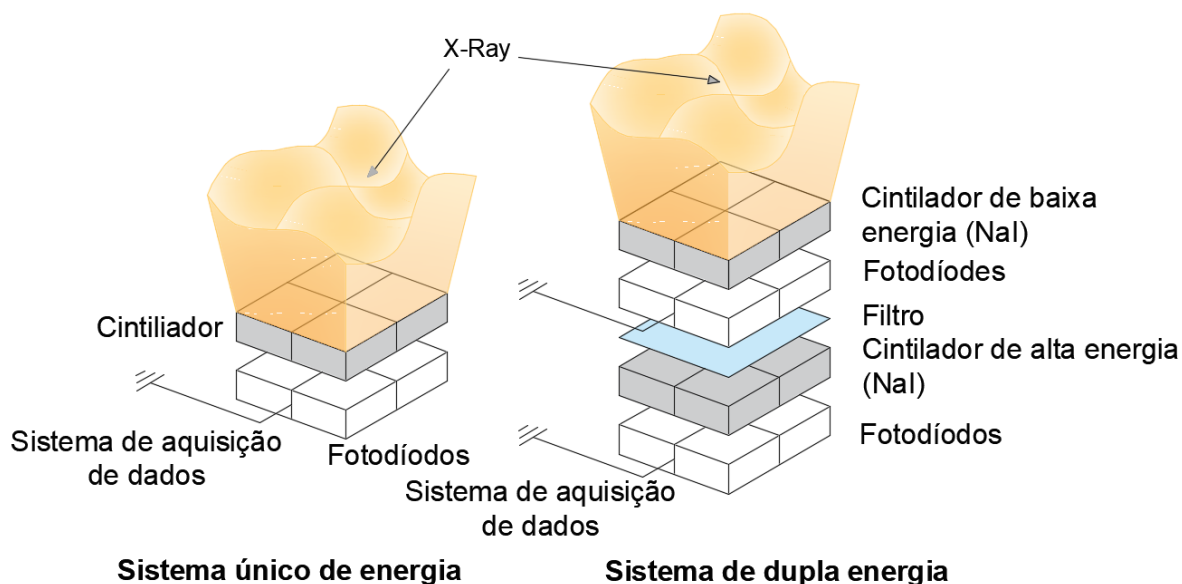


Figura 12. Layout de configuração de um sensor de energia e energia dupla simples.

Fonte: Adaptado de WOTRUBA et al 2014

Uma das principais vantagens da classificação por transmissão de raios-X quando comparada a outros tipos de sensores encontra-se na sua capacidade de mapeamento interior das partículas. Dessa maneira, as partículas não são apenas caracterizadas com base nas propriedades de superfície, mas numa interpretação das partículas como um todo (WOTRUBA; RIEDEL, 2006). Esta é uma das principais vantagens da DE-XRT comparado com outros tipos de sensores exclusivos para este método. O método de separação por sensor de transmissão de raios-x é geralmente aplicável para minérios, devido ao fato das partículas poderem ser diferenciadas com base no seu número atômico e atenuação de raios-x.

Os sensores DE-XRT utilizados na separação são capazes de dinamizar as densidades atômicas dos componentes e materiais dentro das amostras, combinando simultaneamente medidas de níveis de alta e baixa energia (RIEDEL; DEHLER, 2010), ainda, é válido ressaltar que as análises com DE-XRT não são apenas intrusivas e não destrutivas, elas são também resistentes aos efeitos da contaminação da amostra através da sujeira ou corrosão, podendo criar uma leitura completa da composição do material (WOTRUBA et al., 2014).

A análise de imagens de transmissão de raios-X de energia dupla fornece dados instantâneos sobre as dimensões das partículas e a distribuição do número atômico, enquanto o sistema fornece espessura de partículas e número atômico médio em um nível de pixel a velocidades de varredura entre 250 e 500 linhas/segundo, os componentes de raios-x existentes funcionam a velocidades de inspeção entre 0,5 e 2 m/s com aproximadamente 1 metro de largura de inspeção e entre 1,5 x 1,5 e 5 x 5 mm² de resolução alcançadas (KATTENTIDT; JONG; DALMIJN, 2003).

2.4 Aplicações de sensores na mineração

A automação dentro da mineração é um dos objetivos atuais da indústria. Sensores de vários tipos têm sido utilizados para a automação dos empreendimentos mineiros nos últimos anos, buscando desde a melhoria da segurança e produtividade de caminhões de transporte através do uso de câmeras e GPS, até a estimativa de falhas em trechos de declive. Assim como em outras áreas

da mineração, a classificação para seletividade do minério melhorou drasticamente, graças a automação desenvolvida e implantada nos últimos anos em mineradoras (WOTRUBA *et al.*, 2014).

Ao implementar separação baseada em sensores durante o início da etapa de beneficiamento, percebe-se que partículas de baixa qualidade podem ser removidas do sistema, permitindo a redução da massa de rejeitos a serem processados e possibilitando economias de energia, uso de água e manutenção de equipamentos, culminando no aumento da eficiência de todo o processo de beneficiamento (WOTRUBA *et al.*, 2014). O objetivo da pré-concentração é remover material estéril com tamanho de partícula grosso o mais cedo possível, pois em materiais de ganga com alta concentração de silicatos, por exemplo, é tipicamente mais difícil o tratamento. A remoção deste material rígido e estéril antes dos estágios de processos mais intensivos reduz significativamente o consumo de energia, os custos de processamento e de transporte do minério. Ainda, a pré-concentração melhoraria significativamente a eficiência dos recursos ao excluir material economicamente não viável ou de teor marginal o que aumentaria as taxas de produção, além ser possível a redução do teor de corte dependendo do saldo líquido dos custos de processamento (devido descarte do rejeito), dos novos custos associados à pré-concentração e da extração de material adicional. O metal mais valioso pode ser extraído com maior eficiência enquanto a planta de beneficiamento trata menos toneladas, porém, com maior teor de alimentação.

A economia da pré-concentração por separação automática usando sensores é atraente, pois a eliminação de rejeitos a qualquer custo menor do que o custo de moagem total resultará em lucro. O tamanho em que a classificação deve ser executada é determinado pelo grau de liberação que assegura a produção de minério e resíduos, este fator influencia consideravelmente o custo e o ponto no fluxograma onde a classificação pode ser realizada. Em alguns casos, os custos de mineração podem ser reduzidos quando um sistema de classificação mais barato para eliminar o rejeito é combinado com um método de mineração menos seletivo e menos oneroso. Casos assim são muito comuns em minas subterrâneas, onde a capacidade de içamento do material explorado determina a taxa de extração, com triagem realizada no subsolo, e o rejeito utilizado para preenchimento (JEAN; BUCHOT; COHEN; 1974).

As tecnologias de classificação oferecem uma série de vantagens no processamento de minerais sustentáveis, além de apresentarem potencial para reduzir significativamente a perda de finos, o consumo de energia e o impacto ambiental causado pela mineração. Todos os benefícios acima são importantes em qualquer avaliação da classificação de minério, mas o benefício final do aumento de lucros é claramente o fator decisivo. Alguns outros casos de aplicações deste sistema de separação são, por exemplo, a classificação de diamantes, onde os benefícios são suficientemente grandes para que as tecnologias de classificação sejam aceitas; envolvem ainda materiais de menor valor (por exemplo, magnesita, talco, pedra calcária, minério de urânio) que são claramente adequadas para tecnologias de triagem, onde são amplamente testadas variáveis como: cor, refletância ou radioatividade natural (KIDD; WYATT, 1982; KING, 1978).

Há uma grande área aberta para pesquisa nas aplicações de classificação de muitos minérios de metais comuns que exigem técnicas de detecção menos comprovadas ou completamente novas para separação. Os benefícios percebidos pela indústria não foram suficientes para suportar desenvolvimentos bem testados nessa área. Há um grande número de artigos publicados sobre o desenvolvimento de técnicas de detecção para classificação de metais básicos (ONISHCHENKO; BELONozhko, 1982), um número menor de demonstrações industriais de tecnologias desenvolvidas, e muito poucas em operações comerciais usando essas tecnologias. Uma explicação para este índice fraco ao longo de um período de pelo menos 20 anos é que existem equívocos enraizados em relação à viabilidade econômica deste método de classificação. Uma retomada recente do interesse em novos pedidos de classificação de minerais parece indicar que essa visão pode estar mudando com base na experiência operacional demonstrada com classificações modernas (CUTMORE; EBERHARDT, 2002).

Devido ao esgotamento dos depósitos de alto teor, os depósitos remanescentes são geralmente mais “pobres” e mais difíceis de serem explorados, exigindo do corpo técnico habilidades para movimentar e o processar grandes volumes de material com objetivo de obter minério com maior teor. O transporte, a britagem e o processamento desses grandes volumes são caros e necessitam de considerável gasto de energia (POKRAJCIC; LEWIS-GRAY, 2010).

Para uma pré-concentração efetiva, é necessário apenas liberar a ganga que pode ser removida, não necessitando que os minerais valiosos estejam liberados. Existem várias tecnologias que podem ser aplicáveis à pré-concentração, incluindo: processos de gravidade, separação magnética, triagem manual e triagem de minério com base em sensores. A adequação em cada caso depende das propriedades do minério. Este estudo especificamente a classificação de minério baseada em sensores; no entanto, deve-se considerar que alternativas podem ser mais baratas e/ou mais simples, como por exemplo, a concentração por gravidade e a pré-seleção que devem ser previamente avaliadas. A pré-concentração por classificadores tem a vantagem adicional de complementar a lavra seletiva do minério melhorando o teor através do auxílio às operações da mina de maneira a atingir o teor de corte planejado e a aperfeiçoar a extração do recurso, é uma maneira eficiente de lidar com incertezas sobre teores, principalmente quando a complexidade da geologia da mina dificulta deste parâmetro (DUFFY et al., 2015).

Existem vários usos de sensores na mineração atualmente. A Tabela 6 abaixo mostra apenas algumas dos sensores e seus usos hoje dia.

Tabela 6. Sumário dos sensores atualmente usado para tratamento de partículas.

Fonte: Adaptado de DUFFY et. Al 2015

Tipo de Sensor	Propriedades usadas	Minério	Aplicação	Velocidade	Penetração
Ressonância magnética (MR)	Radiofrequência	Calcopirita	Desenvolvimento para classificação em massa	Segundos	Penetrante
Radiométrico (RM)	Radiação de gama	Urânio, metais preciosos	Tratamento de partículas	Tempo real	Penetrante
Transmissão de Raio-X (DE-XRT)	Transmissão de Raio-X	Metais preciosos e preciosos, minerais industriais, combustíveis, diamantes	Tratamento de partículas	Tempo real	Parcialment e penetrante
Fluorescência de raios-X (XRF)	Fluorescência de Raios-X	Diamantes	Tratamento de partículas	Tempo real	Superfície
*Cor (CCD Color Camera)	Reflexão, absorção, transmissão	Metais básicos e preciosos, minerais industriais, diamantes	Tratamento de partículas	Tempo real	Superfície
Fotométrico (PM)	Reflexão monocromática/ Absorção	Minerais industriais, diamantes	Tratamento de partículas	Tempo real	Superfície
Eletromagnético (EM)	Condutividade, permeabilidade	Metais basicos	Tratamento de partículas	Tempo real	Penetrante

Pela Tabela 6, os sensores com a maior utilidade em termos de tipo de minério que podem ser aplicados são de DE-XRT e Cor.

2.5 Elaboraões de outros testes

Trabalhos dos mais variados já foram realizados utilizando como tema a separação baseada em sensores, Strydom, por exemplo, usou DE-XRT para separar amostras selecionadas de torbanite e carvão a partir de um depósito localizado perto

de Kinross usando equipamento da empresa CommoDas GmbH. Mesmo com a obtenção de resultados preliminares de sucesso, concluiu-se que um exame mais detalhado (em forma de campanha em escala piloto) seria necessária para determinar o desempenho desta tecnologia no material *Run of Mine* (ROM). Isso não só demonstraria os impactos da má liberação do mineral de interesse quando da separação, mas também permitiria examinar a qualidade dos produtos obtidos em uma massa amostrada de material.

Naquela época, a tecnologia só estava disponível na Alemanha, onde a logística não permitia testes em massa, então uma unidade de classificação em escala de produção foi comprada pelo *Central Energy Fund* (CEF) e instalada na Mintek na África do Sul, durante programas de testes; sendo este o primeiro classificador de transmissão de raios-x em escala industrial a ser instalado, para realização dos teste, uma amostra de 150 toneladas de material ROM típico foi extraída de uma mina adjacente (STRYDOM, 2010).

No final do teste Strydom concluiu-se que os resultados obtidos a partir do processamento em escala piloto foram condizentes com resultados obtidos a partir de testes de otimização, nas mesmas condições e em escala de laboratório, indicando que o processo de separação por sensores de raios-x é robusto.

Kuerten (2017) usou o *Sorter* modelo MSX da UFRGS para realizar testes em Carvão da mina de Moatize do Moçambique. Em seus estudos as técnicas de SBS foram aplicadas a 4 camadas diferentes e demonstraram ser possível reduzir o teor de cinzas da alimentação de 10 a 20% no minério ROM, removendo entre 10 a 14% da massa de alimentação para a planta.

Kuerten também estudou a eficiência do sensor dos raios-x por posição da partícula na esteira e concluiu que há uma variabilidade significativa na leitura das amostras, principalmente no lado esquerdo da esteira. É importante salientar que existem poucos estudos, sendo que alguns exploram a eficiência dos sensores em detalhe, feitos sobre a própria eficiência de sensores com relação a posição da partícula relativa ao sensor (MESINA; JONG; DALMIJN, 2007; KATTENTIDT; JONG; DALMIJN, 2003; JONG; HARBECK, 2005) que exploram a eficiência dos sensores em detalhe.

Estudos feitos pelo COMEX em 2016 para minério de ferro apresentam informações obtidas pela mesma na Figura 13:

- 1) Assumindo que a planta de beneficiamento tem capacidade de processar 500t/h de ROM com contendo 30% de rejeito.
- 2) O fluxo de material entra no OSX, que neste caso tem a eficiência de separação de 90%.
- 3) Uma planta típica de processamento de minério de ferro usou cerca de 315 kWh / t de minério de ferro.

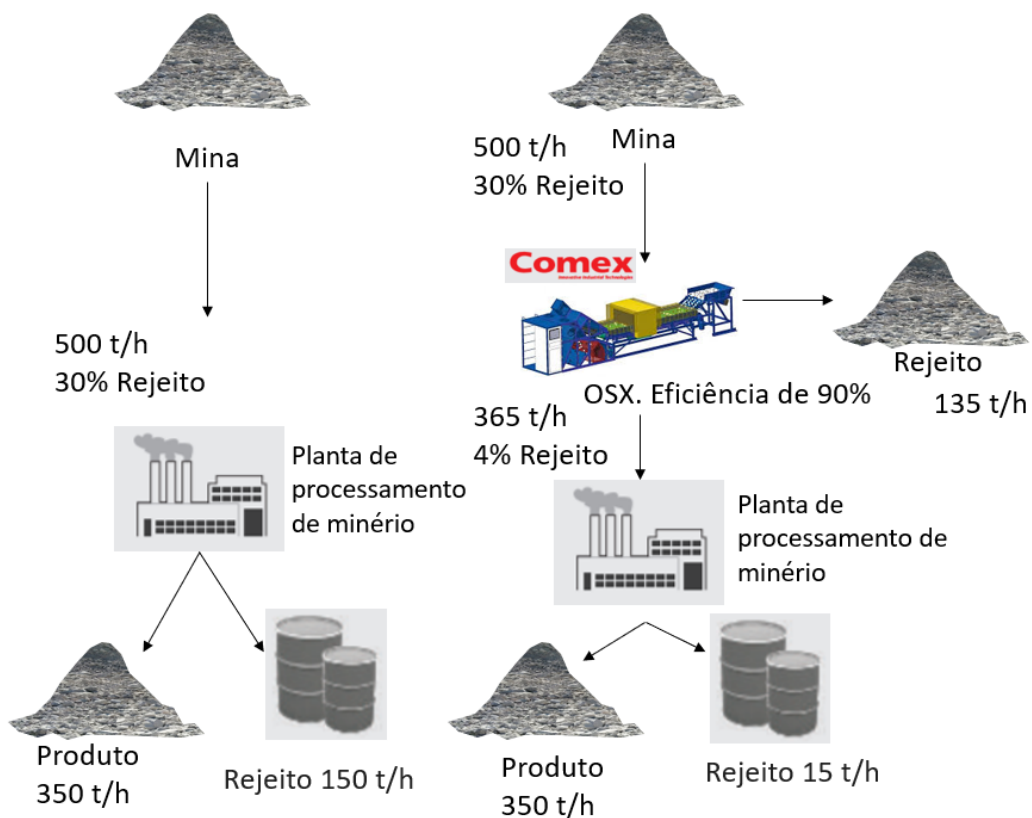


Figura 13. Estudo de caso de minério ferro do COMEX (redução de material de rejeito).

Fonte: adaptado do COMEX, 2016

Ao implementar o OSX nas instalações existentes da planta de minério de ferro, as economias de custos ficariam como os seguintes resultados:

- a) Consumo de energia: -26%
- b) Redução da eliminação de resíduos após o processamento: -90%
- c) Necessidade de transporte reduzido da mina para a planta: -27%

Assumindo o mesmo consumo de energia e a mesma quantidade de alimentação na planta de processamento de minério (500 t/h). No entanto, usando o OSX a concentração de resíduos materiais na alimentação está reduzida. A Figura 14 mostra essa situação.

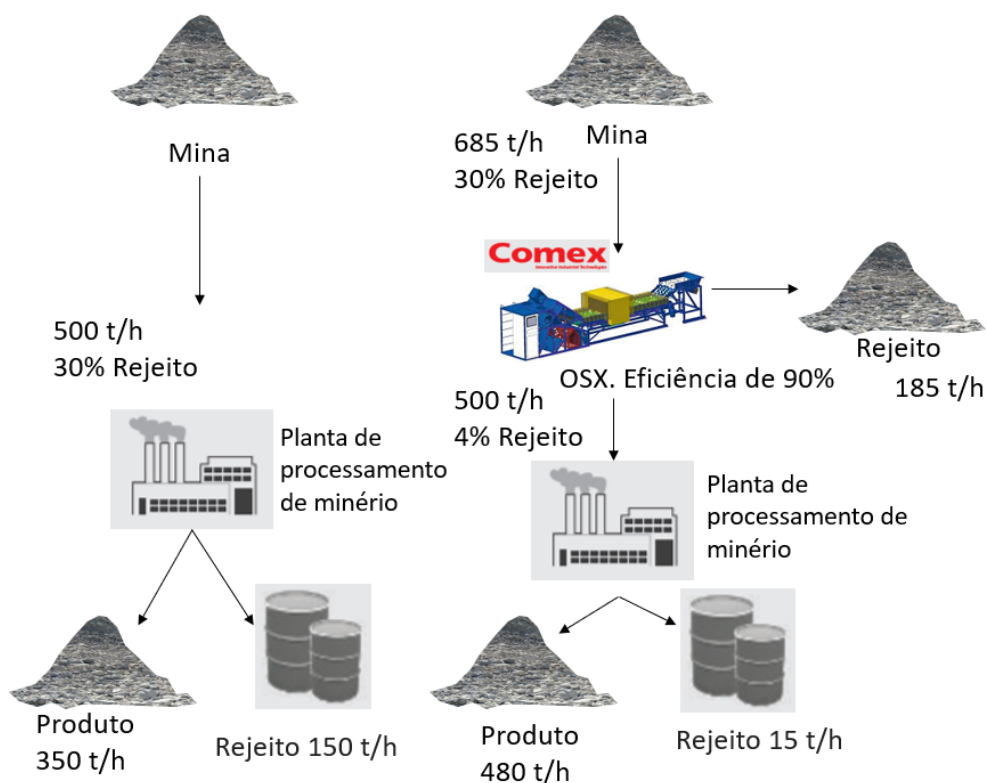


Figura 14. Estudo de caso de minério ferro do COMEX (aumento de produto).

Fonte: adaptado do COMEX, 2016

Pela Figura 14, ao aumentar o fluxo de material fora da mina (com o mesmo Fração de 30% de resíduos), a capacidade de produção pode ser aumentada em 37%. Além disso, a eliminação de resíduos após processando está reduzido por 87%.

3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Esta seção serve como referência geral do equipamento COMEX *Lab Sorter* MSX-400-VL-XR-3D, mas não como manual técnico. O equipamento tem muitos

sensores (Laser e Cor), porém nesse documento será apresentado apenas o sensor de raios-X e seu funcionamento. A maneira que os métodos usados nos testes dos minerais foram definidos as descrições dos minerais também são aqui colocadas. As informações apresentadas nesta seção incluem:

- a) Apresentação do equipamento
- b) Funcionamento geral do equipamento
- c) Operação do equipamento

3.1 Apresentação do equipamento

O *layout* do equipamento COMEX *Lab Sorter* MSX-400-VL-XR-3D está estruturado com os periféricos listados na Tabela 7 cuja identificação está enumerada na Figura 15 abaixo.

Tabela 7 lista os componentes do equipamento COMEX *Lab-Sorter* MSX-400-VL-XR-3D.

Tabela 7. Componentes do equipamento COMEX *Lab-Sorter* MSX-400-VL-XR-3D.

Componentes do equipamento COMEX <i>Lab-Sorter</i> MSX-400-VL-XR-3D	
1. Porta de Alimentação;	12. Detectores de varredura dos raios-x;
2. Correia transportadora;	13. Câmera 3D - 1024x1024 pxl com lentes AF 8 mm;
3. Mesa de operação;	14. Laser 8 mW/90°;
4. Central eletrônica e computacional;	15. Sistema pneumático;
5. Partícula de produto	16. Sistema de rejeição (flap).
6. Partícula de rejeito	17. Capa de borracha
7. Câmera de cor para <i>scan</i> de imagem em linha (2098 pxl/RGB);	18. Placa divisora
8. Lâmpadas de LED (120W/8600Lm);	19. Caixa receptora de produto;
9. Central elétrica;	20. Caixa receptora de rejeito;
10. Ar-condicionador;	21. Balanças;
11. Fonte de raios-x 500W/160kV;	

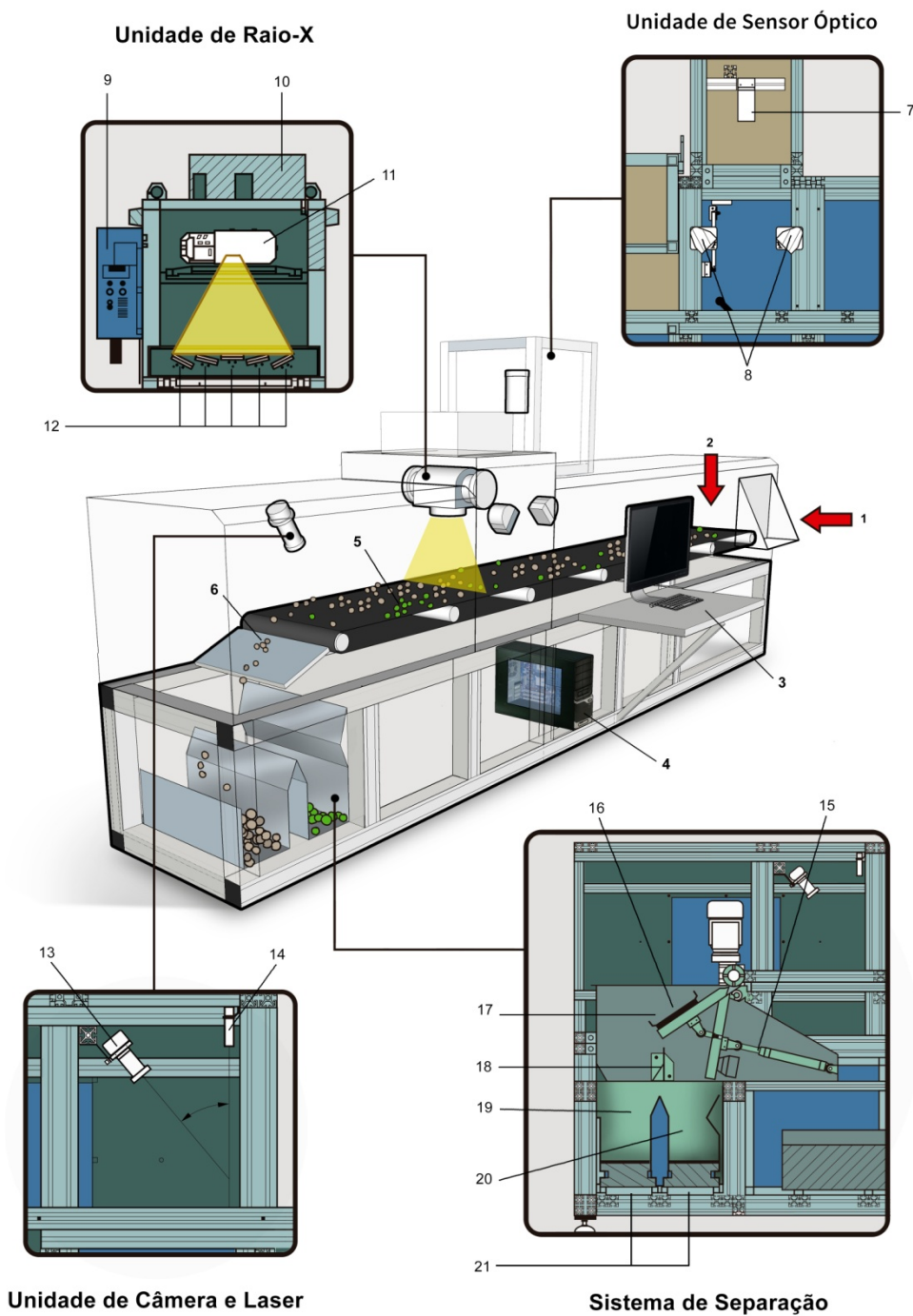


Figura 15. Esquemática do equipamento COMEX *Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D*.

Todo o equipamento está revestido com manta de chumbo para segurança radiológica. Em atendimento aos direitos de propriedades intelectuais da tecnologia do equipamento, os modelos exatos dos sensores, bem como a maneira como estão programados, não estão incluídos em este documento.

3.2 Funcionamento do equipamento

O equipamento funciona através dos princípios e técnicas descritos na secção 2.3 e 2.4. O processo geral do uso do equipamento está escrito conforme as sugestões de SALTER e WYATT (1991) e WOTRUBA e HARBECK (2010), onde ambos abordam detalhes sobre os processos de classificação com base em sensores onde deve-se atender as seguintes etapas:

- a) Apresentação do material ou das partículas;
- b) Exame ou detecção do material ou das partículas;
- c) Processamento ou análise dos dados gerados;
- d) Separação física do material ou partículas por meio físico.

3.2.1 Apresentação do material ou das partículas

A Figura 16 mostra a entrada do material do *Lab-Sorter*, onde as partículas são colocadas na esteira para sua apresentação.



Figura 16. A entrada (500 mm de largura) do equipamento para alimentação de material.

A apresentação efetiva de um material ou partícula é conseguida quando o sensor é capaz de identificar cada uma das partículas individualmente. Este passo

exige que cada seção do material esteja isolada (que tem espaço entre cada partícula, e não tem nenhuma partícula em cima da outra), e no caso do *Lab-Sorter* requer que as partículas sejam passadas uma por cada vez na correia transportadora. No interior da entrada do *Lab-Sorter* está uma cortina protetora de borracha/chumbo. Durante a operação o(a) operador(a) deve estar atento e verificar que cada partícula seja alimentada no equipamento uma após outra. Com uma velocidade de 1,5 m/s a correia transportadora conduz o material aos sensores em um tempo relativamente lento para um sistema de *Sorting* (sistemas industriais são 2 vezes ou mais rápido). Após ser conduzido ao sensor, as informações de propriedades ou características das partículas são capturadas pelos sensores. Para o estudo em tela, as ondas de irradiação eletromagnéticas de raios-X transmitem sinais das propriedades associadas à densidade relativa do material exposto.

Dependendo da natureza do material usado, a esteira pode acumular impurezas e induzir uma manutenção preventiva de limpeza, pois a ausência desta manutenção pode gerar ruídos na detecção mínima do sensor para calibração.

3.2.2 Detecção do material

Durante a fase de detecção do material, a partícula é submetida à irradiação de raios-X que a atravessa, resultando em uma energia atenuada/transmitida e detectada pelo sensor. As informações correspondentes da energia do material são interpretadas como dados de energia do raios-X. Em resumo pode-se afirmar que o *Lab-Sorter* quantifica a atenuação dos raios-X e os compilam em dados interpretados como a energia bloqueada pelo material em vez de energia passado pelo material.

Neste entendimento a análise do material gera dados que completam imagens em escala cinza que posteriormente passam a serem tratadas. Exemplos dessas imagens estão ilustradas nas Figura 24 e Figura 32 .

O tubo de raio-X usado pelo equipamento para o gerenciamento e a detecção do material tem um ângulo de ataque de 25° e é feito de Tungstênio. Uma Janela de vidro de Be⁺, com espessura de 0,8 mm, é usada devido sua capacidade em ser bastante permeável aos raios-X, ter boa transparência, ser resistente a altas temperaturas e resistente a 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), esta por sua vez, tem características para suportar altas temperaturas, ser amorfo e transparente na cor âmbar. O modelo esquemático da fonte de raios-X se apresenta na ilustração da Figura 17.

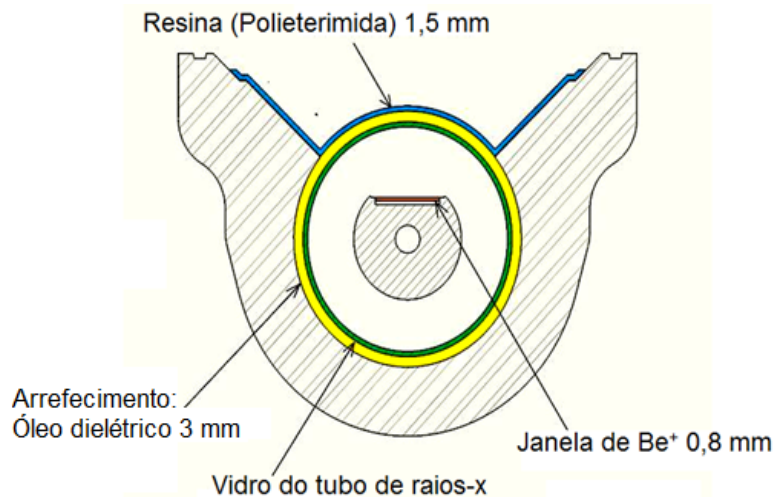


Figura 17. Diagrama da janela de Be⁺ do tubo de raio-X usado no *Sorter*

Fonte: adaptado de BAJAJ T, 2017

3.2.3 Processamento ou análise dos dados gerados

O processamento dos dados registrados pelos detectores (alta e baixa) é analisado pelo *software* CXR do computador para selecionar a qual fluxo de produto o material pertence. As Figura 24 e Figura 32 mostram capturas de tela do *software* CXR usado para analisar o material mostrado as imagens correspondentes em escala de cinza (ou radiográficas). O *software* usa a escala predeterminada para criar uma cor falsa da imagem gerada da representação da faixa de intensidade de energia capturado pelo detector. As escalas usadas pelo *software* são dinâmicas, significando que os valores de intensidade dos pixels não são representações absolutas, mas dependem da escala em que estão visíveis. A calibração será discutida mais na seção 3.3.1. O resultado final dessa etapa indica em qual categoria a partícula será destinada (produto ou rejeito).

A ferramenta principal de decisão é o *software* MSX-400 instalado em computador industrial, modelo *Advantech* 510. Segundo o manual do *Advantech* 510, o nível de umidade tolerável para operação do equipamento não deve ser

superior a 85%. Essas exigências operacionais, assim como outras, são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Especificações ambientais para operação do computador industrial.

Fonte: adaptado do Advantech, 2003.

Variável	Em operação	Fora de operação
Temperatura	0 ~ 40 °C	-20 ~ 60 °C
Umidade	10 ~ 85 %	10 ~ 95 %
Vibração (5 ~ 500 Hz)	1 Grms	2 Grms
Força G	10 G	30 G
Altitude	10,000 ft	40,000 ft
Vibração sonora	- 60 dB com 5 ~ 28°C	

3.2.4 Sistema físico de Separação

Após a decisão feita pelo processamento de dados através do *software* CXR, as partículas são separadas pelo sistema de atuador pneumático denominado de *flap*. No caso do *Sorter*, as partículas do produto normalmente caem no primeiro recipiente localizado imediatamente após a correia transportadora, e o rejeito será removido pelo atuador pneumático no recipiente ao final do equipamento. Mas o equipamento também pode ser configurado para fazer pré-concentração reversa. Esta, entretanto, será admitida quando a quantidade da massa do produto for menor que a massa do rejeito. O atuador pneumático é acionado por ar comprimido através de um compressor operacionalizando com 4 bar de pressão.

Após a separação física, os recipientes podem ser removidos e o material pode ser analisado e caracterizado conforme desejado.

3.3 Operação do Equipamento

3.3.1 Escaneamento e calibração do equipamento

No contexto do laboratório uma calibração significa escolher a curva de calibração pré-programada estabelecendo valores dos limites de intensidade de

energia relativa toleráveis para um possível produto e/ou rejeito (*threshold*), e de porcentagem tolerável da quantidade dos limites de intensidade de energia relativa para ser usado nos testes de separação por raios-X.

O termo *threshold* está nomeado pela rotulagem do equipamento, mas significa nada mais do que o range de valores de energia de raio-X usado para uma seleção otimizada do material. Ele refere à faixa pela qual os valores de intensidade de energia registrado como cores em cada pixel de área da imagem serão contados pelo processamento de imagens. Se, por exemplo, os pixels vermelhos tiveram valões de 50 a 100, e foram considerados de produto, o *threshold* escolhido seria de 50 a 100.

O *software* mostra que valores possíveis de *threshold* estão entre 0 e 255. Um valor de 0 no pixel significa que o material apresenta a densidade relativa igual ou inferior aos valores que se comportam dentro da curva de menor densidade relativa, enquanto que valores a 200 a 255, no pixel apresentam densidade relativa maior, gerando assim uma cor para cada pixel da área do material na escala determinada pela curva da calibração usada (Fe-C, Qtz-C, Fe-Qtz, ou Qtz-REE). Valores de 1 a 200 variam muito de cor (do azul até amarelo) e geralmente são analisados para determinar a calibração mais apropriado.

Após as decisões serem feitas para uma calibração, o(a) operador(a) pode gerar um relatório com as informações da calibração. Como o propósito da calibração é de otimizar as decisões automáticas do equipamento, é crucial que o arquivo usado com a calibração do material seja compilado antes do teste de separação do material.

Uma vez que o processo de calibração do equipamento pode ser iterativo, o estágio de calibração é o mais demorado e complexo dentre todas as etapas do ensaio. O processo de calibração ocorre após um número de amostras de o material passar pelo detector de raios-X e as imagens do material forem interpretados pelo detector usando o *software* CXR dos raios-X do equipamento. No processo, o operador(a) pode editar a imagem para reduzir seu tamanho, através de uma corte das áreas vazias na imagem. O(a) operador(a) pode modificar configurações avançados do raios-X, mas isso normalmente não é necessário, exceto em alguns casos quando as partículas analisadas sejam muito grandes ou muito pequenas, e passam do limite de proporção de tamanho tolerável do equipamento (maior que 100

mm, ou menor que 2mm) desde que seja respeitado a proporção da razão de tamanho não superior a 1:3 do material no momento dos testes.

Como o *Sorter* foi fabricado para avaliar muitos materiais, já existem várias curvas de calibração programadas no equipamento, incluindo:

a) Fe-C (curva de calibração para materiais densidade relativa entre os elementos de Ferro e Carbono, massa específica entre 7,90 a 2,27)

b) Qtz-C (curva de calibração para materiais densidade relativa entre Quartzo e o elemento de Carbono, massa específica entre 2,67 a 2,27)

c) Fe-Qtz (curva de calibração para materiais densidade relativa entre Quartzo e o elemento de Ferro, massa específica entre 7,90 a 2,67)

d) Qtz-REE (curva de calibração por materiais densidade relativa entre Quartzo e uma curva representando a densidade média das Terras Raras, massa específica entre 2,67 a 11,52)

Essas curvas são calculadas utilizando as equações matemáticas descritas na seção 2.3 e podem ser interpretadas como a quantidade de energia que não atravessou o material, da mesma forma que DE JONG e HARBECK (2005) demonstrarem, na seção 2.3, que essa energia também poder ser calculada diretamente, ou seja, pela quantidade de energia que atravessa o material. Em resumo essas curvas interpretam a atenuação ou a energia bloqueada pelo material enquanto do DE JONG e HARBECK (2005) medem energia transmitida.

As curvas de calibração determinam a escala dinâmica usada para visualização das partículas. Uma partícula pode parecer de maior densidade em uma escala, e de menor densidade em outra. Isso é devido ao fato que os valores absolutos dos pixels na imagem não mudam, mas os valores dos pixels e suas cores falsas mudam conforme a escala usada para visualizar essas características do material. O modo que essas escalas foram criadas pela COMEX, seus valores absolutos não serão discutidos neste trabalho e/ou os valores plotados nas curvas para o material usado nos testes, porém serão representados teoricamente em uma curva de atenuação mostrada na Figura 18. Mais detalhes sobre as características de atenuação de vários elementos junto com as informações suficientes para construir uma curva de calibração podem ser obtidos através do Instituto Nacional de

padronização e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology* - NIST). Todas as informações fornecidas pelo NIST que são pertinentes aos materiais estudados nesse trabalho estão disponíveis no Apêndice II.

O processamento de imagem das partículas usa conceitos de estatística para determinar a classificação da partícula. Nesse processo, os valores de intensidade de cada pixel medido pelo detector do raios-X estão colocados em uma seção estatística conforme a escala dinâmica (conforme a curva selecionada Fe-C, Qtz-C, Fe-Qtz, ou Qtz-REE, e a calibração feita) usada para visualizar os valores gerado pelo material. O operador(a) então vê as imagens e pode fazer uma calibração preliminar do equipamento através do analisador. As decisões de calibração do equipamento exigem uma perícia de sensibilidade do operador(a) para escolher os limites de intensidade relativa de interesse (*threshold*) e a porcentagem de concentração que promove a melhor separação das partículas analisadas. Normalmente, se o material reproduzir o mesmo comportamento de detectabilidade de separação semelhante ao comportamento sugerido na configuração da escala de calibração programada, uma separação ideal pertence a um *threshold* dentro do *range* (ex. 1-120) e uma porcentagem de aproximadamente 70% (mas pode variar com a natureza do material).

A determinação dos valores de *threshold* são calculados através de uma simples adaptação da equação 3, apresentado aqui como equação (6). Os fenômenos físicos de atenuação são fortemente não-lineares, então a operação torna mais linear para simplificar a análise através da equação 6.

(6)

$$m = -\ln(N_o/N) * k$$

Onde:

m = o valor de atenuação da energia associado ao pixel

N = número de fótons contados pelo detector com a matéria

N_o = número de fótons contados pelo detector em condições iniciais (sem amostra)

k = constante

Uma vez que cada energia (alta ou baixa) gera um valor m , cada pixel tem dois valores absolutos de energia medida, e por isso, cada pixel tem uma razão LE/HE onde LE significa o valor de atenuação do pixel para fótons de menor energia, e HE significa o valor de atenuação do pixel para fótons de maior energia. De outra maneira, m (em prática existem m_{LE} e m_{HE}) é uma versão linearizada da atenuação real de cada energia, e LE/HE é uma razão linearizada dessa atenuação.

Tendo a razão LE/HE , e os valores absolutos de m_{LE} e m_{HE} , o *Sorter* calcula o valor do C_m (eq. (5)) de cada pixel, e a espessura x (eq. (5)).

A imagem feita está composta de pixels, e a porcentagens dos pixels que possuem valores de intensidade dentro do *threshold* e calculado usando a equação(7):

(7)

$$P = N_p / N_t$$

Onde:

P = a razão em porcentagem;

N_p = o número de pixels que possuem valores de intensidade dentro do *threshold*;

N_t = o número de pixels total da partícula.

As imagens produzidas pela transmitância de raios-X através do material (Figura 8 e Figura 9) podem fornecer uma grande quantidade de informações em relação à sua densidade, ou seja, um objeto de baixa densidade parece mais brilhante do que um objeto mais denso no filme de raios-X. Ao examinar o brilho produzido por materiais em duas intensidades diferentes de raios-X pode-se derivar uma interpretação visual do material. Isso é referido como uma curva de atenuação, e a Figura 18 apresenta, da forma teórica, uma curva de atenuação da maneira que o *Sorter* apresenta. Observa que nos exemplos na Figura 8 e Figura 9, a transmissão do raios-X foi medido, mas na Figura 18 (e no caso do *Sorter*), a atenuação do raios-X está medida.

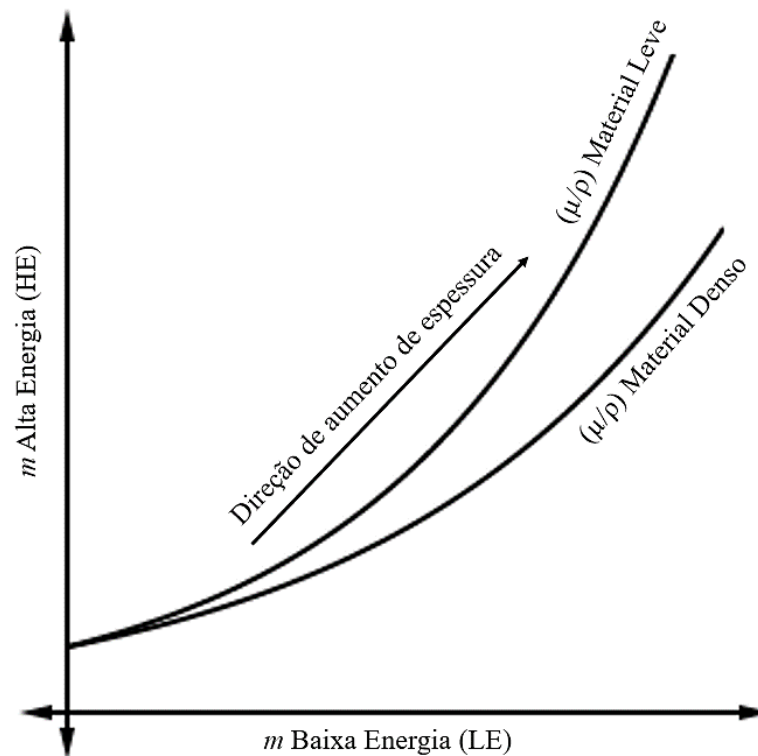


Figura 18. Exemplo teórico de curvas da classificação de atenuação de Raios-X por Dupla Energia usado no *Sorter*.

Desde que uma partícula possui valores de intensidade acima do limite mínimo do equipamento, estes irão estar contados e calculados no número total de pixels da partícula para o cálculo de porcentagem. Durante a operação o limite mínimo de intensidade por estar maior do que o limite mínimo de intensidade no *software* de análise, isso pode fazer com que imagens da análise pareçam com maior variação de leitura, mais área, e mais efeitos de sombra, do que as imagens que podem ser vistos pelo monitor no funcionamento do equipamento durante uma separação real. Mesmo que a escala usada para visualizar as partículas seja dinâmica e relativa, o valor mínimo da leitura dos raios-X é absoluto. Por esse motivo, testes de materiais de menor densidade, como carvão ou gesso, tendem ser mais sensíveis a leituras de intensidade baixa dos raios-X, do que testes de materiais de maior densidade.

3.3.2 Testes de verificação da calibração

Existe uma possibilidade que mais de um valor de *threshold* e/ou porcentagem pareça ideal para a calibração principalmente se a quantidade de

partículas for pequena ou não representativa. Por isso rotineiramente tem-se a prática de verificar se a calibração do equipamento está otimizada para o material a ser examinado. Isso pode ser feito de várias maneiras, mas a prática mais comum reflete em posicionar as amostras na esteira numa maneira organizada, apresentá-los ao detector de raios-X, e em seguida capturar as imagens das partículas pelo monitor.

Se as amostras foram organizadas em grupos de produto ou rejeito antes de ser colocado na esteira, é mais fácil confirmar que a calibração está funcionando. Se as amostras são diferentes do que as amostras usadas nas imagens da calibração, eles servirão como testemunhos adicionais da qualidade da calibração. As mesmas amostras usadas na calibração podem ser usadas para verificar as diferenças entre a leitura capturada do material, e a leitura capturada em tempo real de operação do equipamento.

Uma vez que as partículas não podem ser identificadas claramente como produto ou rejeito antes de ser colocada na esteira, eles podem ser organizados aleatoriamente, e depois que a imagem capturada for examinada, o operador(a) pode verificar se a decisão feita pelo *software* foi aceitável para cada partícula na esteira. O equipamento tem demonstrado a capacidade de ser melhor do que a visão humana determinando a classificação correto de partículas durante várias etapas dos testes realizado neste trabalho. O resultado final dos testes de verificação do material é ter a certeza de que o equipamento esteja otimizado para realizar um teste de separação e que nenhuma outra calibração ou configuração do equipamento pode melhorar os resultados dos testes.

3.3.3 Testes de *Sorting* completo

Após certificar que a calibração esta otimizada para o material a ser testado por separação, o material pode ser examinado usando o equipamento em suas capacidades plenas. Esse teste segue o fluxo conforme detalhado em seção 3.2 acima, e é o propósito último do equipamento. Antes de realizar os testes de separação, deve-se certificar que o material esteja preparado, através de homogeneização e quarteamento. Foi determinado que a separação mais efetiva ocorresse entre partículas que não tenham mais de 3 vezes de diferença entre o menor e maior diâmetro. Por exemplo, se o tamanho da partícula mínima a ser

examinada for 20 mm, o tamanho da maior partícula que pode ser examinado é de 60 mm.

A medida que mais de uma separação será necessária para conseguir os resultados desejados de uma separação, o rejeito formado pela primeira separação pode ser alimentado como alimento secundário, gerando uma nova concentração e rejeito que pode ser passado de novo, formando um processo iterativo. Como esse processo pode ser complexo para seguir, um fluxograma pode ser criado para ajudar organizar os resultados e rastrear o processo. Exemplos de fluxogramas desenvolvidos para rastrear os testes estão na Figura 21 e Figura 23.

4. MATERIAIS E METODOS

4.1 Os testes do minério de ferro

Uma pilha de rejeito de uma mina de ferro que participou no estudo foi amostrada em cinco lugares diferentes e recebidas no LAPROM/UFRGS. As amostras foram nomeadas de Lote 1, Lote 2, Lote 3, Lote 4, e Lote 5. Um total de vinte testes de separação foi realizado com as amostras do minério de ferro (quatro testes por cada um dos 5 lotes). No total, aproximadamente 29,0 kg de ferro foram usados nos testes do minério de ferro. Os resultados dos testes foram publicados na reunião anual do SME, em Denver, CO, USA, em fevereiro de 2017 (YOUNG *et al.* 2017).

4.1.1 Descrição do minério de Ferro

O minério de ferro estava na faixa granulométrica de -31 mm, sendo que já havia sido classificado como produto *Lump*, e assim tinha passado pela primeira britagem da mina. O teor de ferro desse produto *Lump* era muito inferior ao teor exigido pelo mercado (<60% Fe) e por isso, o minério era considerado rejeito e foi estocado na mina como tal. Com tempo o material se degradou e o tamanho da pilha cresceu. A Figura 19 mostra os lotes do minério de ferro antes de qualquer preparação feito.



Figura 19. Lotes de ferro usado nos testes de separação por DE-XRT.

Esse rejeito foi classificado pela empresa como itabirito possuindo alta sílica disseminada. A rota de processo recomendada para este tipo de minério é moagem, que visa liberar as partículas mistas de sílica e hematita, e posterior processo de concentração na produção exclusiva de alimentação de *pellet feed*. Porém, se um processo pode aproveitar o material sem moagem, poderia existir cenários que viabilizem a comercialização direta desse material como *Lump ore*.

4.1.3 Preparação do minério de ferro

As amostras não foram lavadas, nem secadas, para assim simular as condições reais da mina. Antes de realizar os testes de separação, todo o material de cada lote foi peneirado usando uma peneira vibratória e peneira do tamanho 12,7 mm para remover os finos e contaminantes. Depois disso, eles foram preparados

através de homogeneização e quartejamento por um quarteador modelo Jones no Laprom.

4.1.4 Escaneamento e calibração do minério de ferro

Após a preparação, uma pequena porção de material do Lote 1 foi colocado na esteira aleatoriamente e escaneado pelo DE-XRT *sensor* conforme explicado na secção 3.2. A Figura 20 mostra o lote 1 do ferro na esteira logo antes de realizar o escaneamento.



Figura 20. O minério de ferro na esteira antes de realizar o *escaneamento*.

Uma curva de calibração para o minério de ferro foi feita através da metodologia descrita na secção 3.3. Essa mesma curva, e todas as configurações estabelecidas para o primeiro lote, foram usadas para todos os outros lotes.

4.1.5 Testes completos do minério de ferro

Os testes completos do minério de ferro foram realizados conforme a metodologia descrita em secção 3.3.3, e especificamente pelo fluxograma encontrado na Figura 21. Para os testes, as configurações de *threshold* variam de

180-220 até 150-220, com o número menor diminuindo em incrementos de 10 por cada teste, definindo assim um teste como uma (1) separação de material, onde havia material que entrou, e dois fracções do mesmo material que saiam do equipamento. Por essa definição, por cada lote do minério de ferro, foram realizadas quatro (4) testes em sequência.

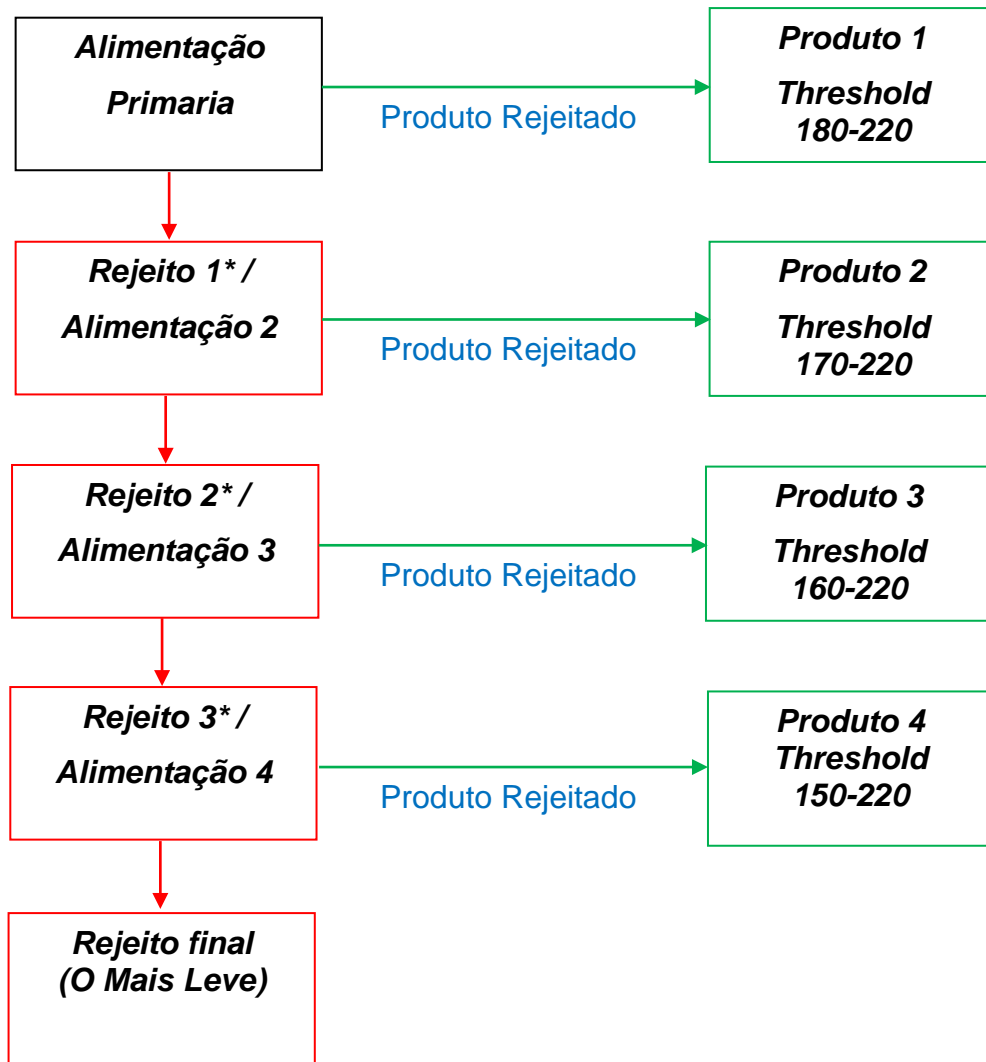


Figura 21. Fluxograma dos testes de ferro

A calibração de porcentagem de pixels por área de partícula foi estabelecida como 75%. Ou seja, para a primeira separação, se o sensor de raio-X detectou uma partícula com 75% ou mais de pixels com valores entre 180 e 220, o equipamento efetuava uma separação (batida por flap) daquela partícula. Para as subsequentes separações partículas com 75% de pixels com valores de entre 170 e 220 seriam

separado e assim nessa ordem seguiram as 3ª e 4ª separações com valores de 160 a 220 e 150 a 220, respectivamente.

Usando a lógica de o que passou na primeira separação passaria nas separações subsequentes, esta combinação dos resultados dos testes permite a simulação de qualquer configuração dos parâmetros de teste após a análise química ser realizada. Por exemplo, se os produtos 1, 2 e 3 forem considerados materiais de qualidade superior, o Rejeito 3 representa a porcentagem final de massa e seu teor para o rejeito do lote.

4.1.6 Análise de densidade do minério de ferro

Para confirmar os resultados dos testes de separação do *Sorter* da forma rápida e não destrutiva, as medições de densidade foram feitas em um equipamento que aplica o princípio de Arquimedes. O equipamento usado para esse método está mostrado como Figura 22. O princípio de Arquimedes afirma que um corpo imerso em um fluido é movimentado por uma força igual ao peso do fluido deslocado.



Figura 22. Balanço seguindo o Princípio Arquimedes

O procedimento de teste consistiu em medidas de peso do material fora e imersa na água. Ambas as medidas permitem calcular a densidade da amostra através da equação 8, abaixo:

(8)

$$\rho = m / (m - m_{sub})$$

Onde:

ρ = Densidade (g/cm³)

m = massa

m_{sub} = massa submersa na água

4.1.6 Análise química do minério de ferro

Todo o material que foi concentrado foi enviado para a mina e a análise química do minério de ferro foi feita pelo laboratório da própria mina. A análise dos dados foi depois realizada usando o software Excel.

A análise química foi realizada através de Fluorescência de Raios-X por pastilha fundida, utilizando Tetraborato de lítio/ Metaborato de lítio/ Brometo de Lítio como fundente. As amostras foram analisadas para leitura dos elementos: Fe, SiO₂, Al₂O₃, P, Mn, Cao, MgO, TiO₂. Ensaio de PPC (Perda Por Calcinação) foi analisada pelo método de gravimetria em forno mufla à temperatura de 1000°C +/- 10°C. O equipamento usado foi um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X da marca Rigaku, modelo ZSX PRIMUS II, analisador sequencial. Para seu funcionamento é necessário o uso do gás P-10 Argo-metano ou Argo-meta. Para fusão das amostras é usado a máquina de fusão NIEKA modelo G-4 A com gás P-45 GLP Gás Liquefeito do Petróleo.

Para o fechamento estequiométrico foram usados os seguintes fatores de correção dos elementos para os óxidos:

$FFe = 1,429729$ (Conversão de Ferro para Fe₂O₃);

$FP = 2,291366$ (Conversão de P para P₂O₅);

$FMn = 1,291226$ (Conversão de Mn para MnO) para Mn abaixo de 2,5%;

$FMn = 1,436840$ (Conversão de Mn para Mn₂O₃) para Mn acima de 2,5%

4.2 Os testes do minério de zinco

Dois lotes de ROM. de zinco contendo minerais de zinco denso diluído por material não mineralizado foram selecionados por tamanhos de -50 + 12,7mm e - 25 + 8mm, em parte para ver se a faixa de tamanho teve efeito no resultado geral. Quatro testes foram realizados para as amostras de zinco (dois testes por lote) com uma massa total de aproximadamente 44,3 kg.

4.2.1 Descrição do Zinco

Foram estudadas três amostras representativas de minério Zn das operações de uma empresa que explora o minério de zinco. O minério do Zinco foi estudado em parceria com o Laboratório de Processamento de Mineração da Universidade de São Paulo (USP). Os resultados foram apresentados subsequentemente no congresso do *Physical Separation '17* em Londres Inglaterra por Dimas Neto *et. al.* (2017).

4.2.2 Preparação do minério de zinco

A amostragem do zinco foi descrita por Dimas Neto (2017) como sendo feito através de três amostras representativas de minério de zinco do mesmo depósito, mas de blocos geológicos distintos que foram selecionados para os estudos. Alguns fragmentos de rock hospedeiro (dolomita) e alguns fragmentos de minério de zinco chamado willemita foram selecionados para calibrar a máquina de classificação de minério, permitindo que ele obtenha uma escala relativa de atenuação de raios-X dinâmica para willemita e seu rejeito. Os minérios de zinco junto com os minérios de encaixante foram britados pela própria mina, e lavado antes de ser enviada para o Laprom/UFRGS.

4.2.3 Escaneamento e calibração do minério de zinco

Para efetuar o escaneamento do minério de zinco, o minério foi colocado na esteira com material identificada como minério de alto teor de zinco primeiro, seguido por um espaço e depois material de rejeito (minério encaixante do zinco). Depois do escaneamento as configurações ideais para efetuar a separação do minério conforme explicado na secção 3.3.2 foram obtidas. Todas as configurações pertinentes se encontram em anexo desse documento.

4.2.4 Testes completo do minério de zinco

Depois da calibração, o minério de zinco foi testado no *Sorter* conforme a metodologia de testes de *Sorting* completo descrito em seção 0e conforme a fluxograma mostrado em Figura 23.

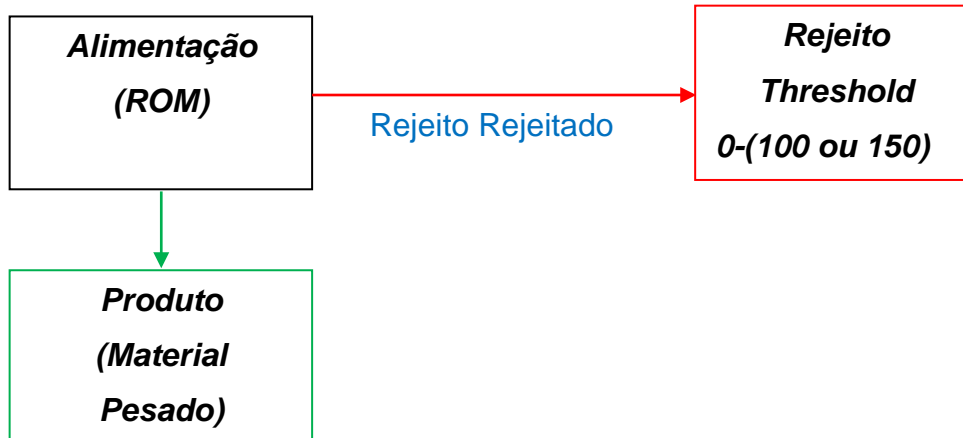


Figura 23. Fluxograma dos testes de zinco, para os dois granulometrias.

Para a granulometria maior (-50 +19mm), os valores do *threshold* foram de 0 a 100. Ou seja, para a primeira separação, se o sensor de raio-X detectou uma partícula com 75% ou mais de pixels com valores entre 0 e 100, o equipamento efetuava uma separação (batida por flap) daquela partícula. Para a granulometria menor (-25 +8mm), os valores do *threshold* foram de 0 a 150, e o valor de porcentagem manteve como 75%. Duas testes foram feitos por cada granulometria.

4.2.5 Análise química do minério de ferro

Após dos testes de *Sorting* completo, o material foi pesado na balança e enviado para o laboratório da mina de onde foram coletadas. Ali o material foi analisado através do método de análise química por absorção atômica (AAS) conforme um procedimento inteiro empresarial. Os cálculos dos dados foram feitos através de *software* Excel.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Organização dos resultados dos testes

Nesta seção estão apresentados os resultados de todos os testes com as discussões gerais. A ordem da apresentação dos testes segue o mesmo ritmo da apresentação do material, sendo:

- a) Resultados e discussão do Ferro;
- b) Resultados e discussão do Zinco; e,
- d) Discussões gerais

5.2 Resultados e discussão do ferro

As informações a seguir nesta seção apresentam os ganhos de enriquecimento dos teores de ferro para cada lote investigado. Também estão apresentados os resultados dos testes de *escaneamento* e calibração do material, os resultados da balança de massa do peneiramento do minério de ferro, e uma discussão dos resultados.

5.2.1 Resultados do *Escaneamento* do minério de ferro

A Figura 24 apresenta as imagens do ferro capturadas pelo DE-XRT (imagens de preta e cinza) e a imagem processado pelo *software* CXR correlatada. Para referência, essas imagens foram feitas do mesmo material que está apresentada na Figura 20, sendo que o lado direito da Figura 20 representa o lado de cima das imagens na Figura 24.

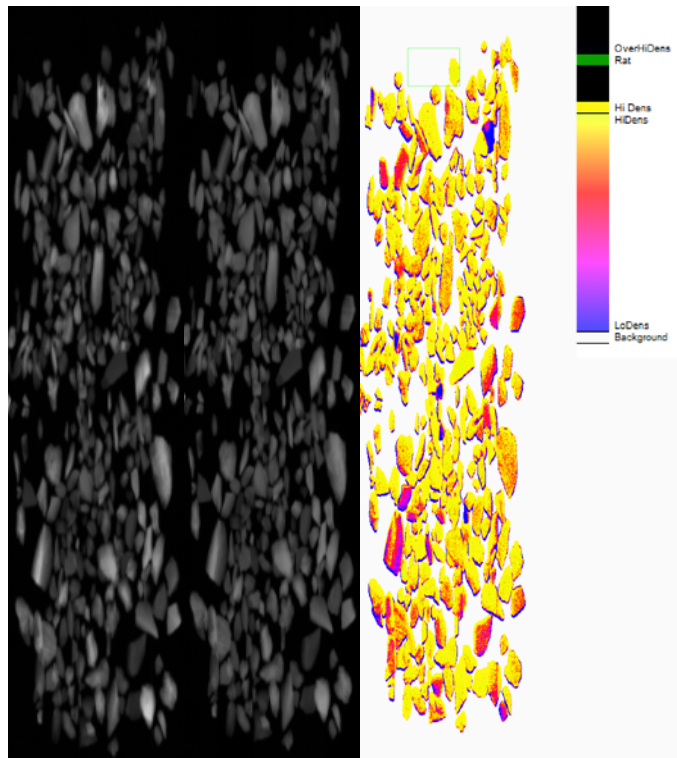


Figura 24. Imagens do raios-X (alto esquerda, baixo meio) e imagem feito pelo CXR (direta)

Na imagem tratada da Figura 24 (o lado direito), os pixels com cores amarelo representam densidades iguais ou maior a densidade da curva de Fe configurada no equipamento, e os pixels azuis representam densidade igual ou menor a densidade da curva Qtz do *software* CXR. Os pixels com outras cores têm densidades relativamente no meio dos dois (entre Qtz e Fe), e provavelmente contém uma mistura de minério de ferro (representada pela curva de Fe) e minério de quartzo (representado pela curva Qtz).

Todos os detalhes da calibração dos testes do minério de ferro estão no anexo II, portanto, as variáveis de calibração mais usadas se encontram na Tabela 9. Observe que as mesmas configurações foram usadas por todos os lotes do minério de ferro, e cada lote começou com as configurações do produto 1 e foram alterados em sequência até as configurações do produto 4 em ordem. O processo começou completamente de novo depois da compleição de um lote, e os lotes foram testados em ordem numérico de 1 a 5.

Tabela 9. Resultados dos testes de calibração do equipamento para os testes do minério de ferro.

Curva de Calibração	Teste	Threshold (RD)	Porcentagem
Qtz-Fe	Produto 1 (teste 1)	180-220	75%
Qtz-Fe	Produto 2 (teste 2)	170-220	75%
Qtz-Fe	Produto 3 (teste 3)	160-220	75%
Qtz-Fe	Produto 4 (teste 4)	150-220	75%

5.2.2 Resultados do peneiramento dos lotes de ferro

A Tabela 10 mostra a granulometria média do material do ferro para todos os lotes. A média de massa dos cinco lotes foi de 7.0019 kg antes de peneiramento, e caiu para 5.8004 kg depois do peneiramento em peneira vibratória. Lotes 3, 4, e 5, tiveram pouco material fino (-12,7mm), 8, 6 e 4% respectivamente, enquanto Lotes 1 e 2 tiveram 31 e 29 % de finos (-12.7mm) respectivamente.

Tabela 10. Granulometria dos lotes de ferro.

Lote	Massa [kg]		Massa (retida) [%]
	+12,7mm	-12,7mm	+12,7mm
1	4.039	1.789	69%
2	7.539	3.052	71%
3	5.913	0.5372	92%
4	6.036	0.3963	94%
5	5.475	0.233	96%
Média	5.8004	1.2015	83%

O lote da maior massa foi o lote 2 com 10,591 kg de material antes de peneiramento e 7,539 kg de material depois de peneiramento. O menor lote antes de peneiramento foi o Lote 5, que teve uma massa de 5.708 kg. Entretanto, do Lote 5 pouco material (0.233 kg) foi separado na peneira e por esse motivo, o Lote 1 teve menos material a ser testado, sendo que Lote 1 teve 5.828 kg antes do

peneiramento e 4.039 kg depois do peneiramento. Os lotes 3 e 4 foram muito parecidos, sendo que tiveram 6.4502 e 6.4323 kg antes do peneiramento e 5.913 e 6.036kg depois do peneiramento, respectivamente.

É notável na Tabela 10 a diferença entre as porcentagens de material com diâmetro médio acima de 12,7 mm para os lotes 1 e 2 (aproximadamente 70%) comparado com as porcentagens de material com diâmetro médio acima de 12,7 mm para os lotes 3, 4, e 5 (aproximadamente 94%). Esses valores podem significar que os lotes 1 e 2 são mais desagregados dos outros lotes.

5.2.3 Resultados por cada lote do minério de ferro

5.2.3.1 Resultados do Lote 1

A Tabela 11 mostra a massa de alimentação do lote 1, cujo teor foi aproximadamente 56,3% de ferro (Fe). Depois do primeiro teste (que gerou produto 1) esse teor de elemento se elevou para 62,91% Fe. Os testes subsequentes geraram produtos de 60,99, 59,34 e 57,78% Fe na segunda, terça e quarta testes, respectivamente identificados como produto 2, produto 3, e produto 4. Assim o restante do material que não foi selecionado como produto em nenhum teste anterior ficou como rejeito, possuindo um teor de 50,3% Fe.

Tabela 11. Resultados do lote 1 do minério de ferro.

Amostra	Densidade	Massa	Fe	SiO₂	Al₂O₃
Nome	[g/cm³]	[%]	[%]	[%]	[%]
Alimentação*	-	100%	56,3	12,53	2,73
Teste 1 (Produto1)	3.71	22	62,91	5,26	1,89
Rejeito 1*	-	78	54,44	-	-
Teste 2 (Produto2)	3.17	13	60,99	3,34	3,44
Rejeito 2*	-	65	53,14	-	-
Teste 3 (Produto3)	3.36	9	59,34	8,86	2,31
Rejeito 3*	-	56	52,9	-	-
Teste 4 (Produto4)	3.3	13	57,78	9,26	3,03
Rejeito 4 (Rejeito)	2.72	42	50.3	20,95	2,96

* Valor calculado

Os teores de Fe, pela ordem descrita no fluxograma geral dos testes (Figura 21), tiveram um aumento de Fe em relação a alimentação de 6,61, 4,69, 3,04 e 1,48% Fe, para os produtos 1, 2, 3, e 4, respectivamente. A redução das densidades nas concentrações comprova que a tecnologia de *Sorting* separou seletivamente entre a maior para a menor densidade pois estes se relacionam com a densidade de ferro (Fe_2O_3). Notável dos valores de massa específica do lote 1 é o valor para o rejeito de 2.72, que é o único valor de massa específica abaixo de 3, portanto o teor do rejeito (50.3% Fe) é o maior de todos os rejeitos. Desde que o material é heterogêneo, existe a possibilidade de que durante a introdução de raio-X na amostra, um elemento (por exemplo, Fe) pode ser consumido por outro elemento que se encontra na amostra e absorver alguns dos fótons do outro elemento, causando a intensidade produzida não seja a mesma quantidade registrada.

Por outro lado, a recuperação de massa do lote 1 foi de 22, 13, 9 e 13% para os produtos 1, 2, 3 e 4, significando que os teores em cima de 60%, estavam nas porções menores, e aproximadamente 41,9% da massa foi rejeitado como produto até completar teste 4. O produto 2 do Lote 1 teve o menor teor de SiO_2 (3,34 % SiO_2) de todos os produtos de qualquer lote.

Com respeito dos teores de SiO_2 , os produtos demonstraram quedas comparado com o teor da alimentação de 7,27, 9,19, 3,67, e 3,27% SiO_2 para produtos 1, 2, 3, e 4, respectivamente, em relação ao teor da alimentação. No rejeito houve concentração do SiO_2 representado por um aumento em teor de 8,42% de SiO_2 comparado com a alimentação. Embora que os produtos contem valores reduzido de SiO_2 , e os alto teores de Fe tendem correlatar com menor teores de SiO_2 , o produto com o maior teor de Fe não tem o menor teor de SiO_2 (produto 1).

Para os teores de Al_2O_3 , dois dos produtos demonstraram quedas do teor de Al_2O_3 comparada com a alimentação de 0,84% Al_2O_3 para produto 1, e 0,42 % Al_2O_3 para produto 3. Produto 2 teve ganho de 0,71% Al_2O_3 , e produto 4 e o rejeito tiveram ganhos de 0,29 e 0,23 % Al_2O_3 , respectivamente, em relação ao teor da alimentação. Além do fato que dois dos produtos tiveram redução nos teores de Al_2O_3 e os dois outros produtos tiveram ganhos, nenhum ganho ou perda passou a ser mais de 1% em valor absoluto.

5.2.3.2 Resultados do Lote 2

Os resultados do lote 2 mostram que o comportamento do minério na tecnologia do *Sorter* foi semelhante ao do lote 1. Uma vez que o aumento do teor de ferro, do teste 1 ao teste 4, foi de 54,76% na alimentação para 59,58%, 60,17%, 58,57% e 58,54% gerando ganhos de aproximadamente 4,82%, 5,41%, 3,81% e 3,78% por produtos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Neste lote tanto os valores de massa específica, quanto os teores de ferro mostram que o produto 1 teve menos concentração de minério de ferro do que produto 2, isso significa que qualquer imperfeição que teve com a separação do minério de ferro que deixou produto 1 com mais teor de ferro, esta correlacionada com valores menor de massa específica. A diferença, porém, do teor e massa específica do produto 1 para produto 2 não é motivo suficiente para desconfiar do equipamento e será discutido mais na discussão dos resultados. A recuperação mássica, assim como ocorreu no lote 1, mostra que os teores mais elevados estão presentes nas menores frações de massas como apresentado na Tabela 12 cuja massa de produto separada foi na ordem de 64%, deixando uma massa de rejeito final de 36% com teor de 46.5% Fe.

Tabela 12. Resultados do lote 2 do minério de ferro.

Amostra	Densidade	Massa	Fe	SiO₂	Al₂O₃
Nome	[g/cm³]	[%]	[%]	[%]	[%]
Alimentação*	-	100%	54,76	14,24	3,18
Teste 1 (Produto1)	3,34	22	59,58	10,31	1,62
Rejeito 1*	-	78	53,43	-	-
Teste 2 (Produto2)	3,39	17	60,17	8,06	2,68
Rejeito 2*	-	62	51,62	-	-
Teste 3 (Produto3)	3,27	16	58,57	6,85	4,92
Rejeito 3*	-	46	49,28	-	-
Teste 4 (Produto4)	3,18	11	58,54	5,23	3,17
Rejeito 4 (Rejeito)	3,24	36	46,5	25,46	3,6

* Valor calculado

Com respeito dos teores de SiO_2 , os produtos demonstraram quedas do teor da alimentação de 3,93, 6,18, 7,39, e 9,01% para produtos 1, 2, 3, e 4, respectivamente. No rejeito houve concentração do SiO_2 representado por um aumento em teor de 11,22% de SiO_2 comparado com a alimentação. Embora que os produtos contem valores reduzido de SiO_2 , e os alto teores de Fe tendem correlatar com menor teores de SiO_2 , o produto com o maior teor de Fe não tem o menor teor de SiO_2 (produto 2). Conspícuo nos resultados do Lote 2, é o fato que produto 1 tem quase duas vezes o teor de SiO_2 do produto 4, mas possui um teor de Fe maior.

Para os teores de Al_2O_3 , os produtos 1 e 2 demonstraram quedas do teor de Al_2O_3 comparada com a alimentação de 1,56, e 0,50 % Al_2O_3 , respectivamente. Produto 3, teve ganho de 1,74 % Al_2O_3 e o rejeito teve ganho de 0,42 % Al_2O_3 . Produto 4 teve um teor de Al_2O_3 quase igual o teor do material de alimentação. Tanto a redução de Al_2O_3 presente no produto 1, quanto o ganho de Al_2O_3 no produto 3 foram mais de 1% em valor absoluto, significando uma mudança de mais de 50% do valor do teor de Al_2O_3 presente no material.

5.2.3.3 Resultados do Lote 3

Os resultados apresentados na Tabela 13 mostram que Produtos 1, 2, 3 e 4, com teores de 61,29, 61,83, 59,9 e 60,06%, tiveram aumento dos teores de ferro comparados com o teor de alimentação (51,5%), significando em ganhos da ordem de 9,79, 10,33, 8,4 e 8,56% desde o primeiro ao último teste do lote. Os valores de massa específica também como no lote anterior comprovem pequenas variações de teores de ferro maior em produtos de qualidade menor. Entretanto o valor de massa específica e dos teores de ferro tendem diminuir do maior para menor. Os valores de recuperação mássica são expressivamente da ordem de 10% a 13% das massas de produto e que aproximadamente 86% da massa rejeitada apresenta teor de ferro inferior a 44%.

Tabela 13. Resultados do lote 3 do minério de ferro.

Amostra	Density	Mass	Fe	SiO₂	Al₂O₃
Nome	[g/cm³]	[%]	[%]	[%]	[%]
Alimentação*	-	100%	51,5	20,79	2,13
Teste 1 (Produto1)	3,51	10	61,29	6,13	2,01
Rejeito 1*	-	90	50,36	-	-
Teste 2 (Produto2)	3,57	12	61,83	7,36	1,52
Rejeito 2*	-	78	48,65	-	-
Teste 3 (Produto3)	3,19	10	59,9	5,41	3,11
Rejeito 3*	-	68	46,96	-	-
Teste 4 (Produto4)	3,22	9	60,06	6,36	2,68
Rejeito 4 (Rejeito)	3,22	58	44,85	31,07	2,02

* *Valor calculado*

Com respeito dos teores de SiO₂, os produtos demonstraram quedas comparados com o teor da alimentação de 14,66, 13,43, 15,38, e 14,43% SiO₂ para produtos 1, 2, 3, e 4, respectivamente. No rejeito houve concentração do SiO₂ representado por um aumento em teor de 10,28% de SiO₂ comparado com a alimentação. No Lote 3, como nos lotes anteriores, o produto com o maior teor de Fe (produto 2), não teve o menor teor de SiO₂.

Para os teores de Al₂O₃, os produtos 1 e 2 demonstraram quedas do teor de Al₂O₃ comparada com a alimentação de 0,12, e 0,61 % Al₂O₃, respectivamente. Produtos 3 e 4, tiveram ganhos de 0,98, e 0,55 % Al₂O₃ respectivamente. Ímpar do lote 3 e o fato que o rejeito teve redução de 0,11 % Al₂O₃. Produto 4 teve um teor de Al₂O₃ quase igual o teor do material de alimentação. Nenhum aumento ou redução passou de um valor absoluto de 1% para os teores de Al₂O₃ do Lote 3.

5.2.3.4 Resultados do Lote 4

Os resultados apresentados na Tabela 14 mostram que os valores de 62,2, 59,62, 55,88 e 57,05% Fe para produtos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, foram aumentos dos teores de ferro comparado com o teor da alimentação de 50,64% Fe, significando ganhos comparado com a alimentação da ordem de 11,56, 8,98, 5,17 e

6,41%, respectivamente, desde o primeiro teste ao quarto teste. Os valores de massa específica também mostraram que a separação ocorre da maior para menor densidade do material, e correlacionem bem com as variações de teores. Os valores de recuperação mássica são expressivamente da ordem de 5% a mais de 17% das massas de produto, sendo que aproximadamente 66% da massa apresenta teor de ferro inferior a 47%.

Tabela 14. Resultados do lote 4 do minério de Ferro.

Amostra	Density	Mass	Fe	SiO₂	Al₂O₃
Nome	[g/cm³]	[%]	[%]	[%]	[%]
Alimentação*	-	100%	50,64	23,44	0,98
Teste 1 (Produto1)	3,61	5	62,2	8,32	1,12
Rejeito 1*	-	95	49,99	-	-
Teste 2 (Produto2)	3,18	11	59,62	8,38	1,51
Rejeito 2*	-	84	48,74	-	-
Teste 3 (Produto3)	3,05	4	55,81	9,08	3,00
Rejeito 3*	-	80	48,42	-	-
Teste 4 (Produto4)	3,35	14	57,05	11,54	0,21
Rejeito 4 (Rejeito)	3,26	66	46,58	30,46	0,94

* Valor calculado

Com respeito dos teores de SiO₂, os produtos demonstraram quedas comparados com o teor da alimentação de 15,12, 15,06, 14,36, e 11,9% SiO₂ para produtos 1, 2, 3, e 4, respectivamente. No rejeito houve concentração do SiO₂ representado por um aumento em teor de 7,02% de SiO₂ comparado com a alimentação. Nesse lote, e sem exceção como houve nos lotes anteriores, quanto mais elevado o teor de Fe no produto menos o teor de SiO₂ também presente no produto. Ou seja, o produto que teve o valor mais reduzido de SiO₂ (produto 1), também teve o maior teor de Fe, enquanto o produto com o valor menos reduzido de SiO₂ teve o valor menos aumentado de Fe (produto 4).

Para os teores de Al₂O₃, os produtos 1, 2 e 3 demonstraram quedas do teor de Al₂O₃ comparada com a alimentação de 0,14, 0,53 e 2,02 % Al₂O₃, respectivamente. Produto 4, teve ganho de 0,78 % Al₂O₃ e o rejeito teve ganho de

0,04 % Al₂O₃. Dessa maneira, com a exceção do produto 4, aumento no teor de Al₂O₃ ocorreu em conjunto com a diminuição no teor de Fe. Notável do Lote 4 foi o aumento no teor de Al₂O₃ (2,02%) que ocorreu no produto 3. Esse aumento foi o maior aumento no teor de Al₂O₃ de qualquer produto de qualquer lote estudado.

5.2.3.5 Resultados do Lote 5

Neste último teste, os resultados mostrados na Tabela 15 de 63,73, 62,05, 61,97 e 59,23% foram os teores de ferro nos testes de 1 a 4 comparados do teor da alimentação de 52,07% Fe, expressando ganhos da ordem de 11,66, 9,98, 9,9 e 7,16% desde o primeiro teste ao quarto teste. Os valores de massa específica também mostraram o mesmo comportamento dos testes com os lotes anteriores a este. Tanto os teores de ferro, quanto os valores de massa específica seguiram uma linha de queda do maior para menor sem nenhum ponto fora do padrão. Os resultados de recuperação mássica são expressivamente da ordem de 5 a 10% da massa total do lote para os produtos, sendo que aproximadamente 70% da massa apresenta teor de ferro inferior a 49%.

Tabela 15. Resultados do lote 5 para o minério de Ferro.

Amostra	Density	Mass	Fe	SiO₂	Al₂O₃
Nome	[g/cm³]	[%]	[%]	[%]	[%]
Alimentação*	-	100%	52.07	18.43	1.91
Teste 1 (Produto1)	3.55	6	63.73	6.28	0.94
Rejeito 1*	-	94	51.33	-	-
Teste 2 (Produto2)	3.41	5	62.05	4.91	2.60
Rejeito 2*	-	89	50.75	-	-
Teste 3 (Produto3)	3.35	9	61.97	4.99	1.59
Rejeito 3*	-	80	49.51	-	-
Teste 4 (Produto4)	3.16	10	59.23	7.53	1.99
Rejeito 4 (Rejeito)	3.29	70	48.06	23.74	1.97

* Valor calculado

Com respeito dos teores de SiO₂, os produtos demonstraram quedas comparados com o teor da alimentação de 12,15, 13,52, 13,44, e 10,9% SiO₂ para

produtos 1, 2, 3, e 4, respectivamente. No rejeito houve concentração do SiO_2 representado por um aumento em teor de 5,31% de SiO_2 comparado com a alimentação. No Lote 5, como nos outros lotes (com a exceção do Lote 4), o produto com o maior teor de Fe (produto 1), não teve o menor teor de SiO_2 (produto 2).

Para os teores de Al_2O_3 , os produtos 1, e 3 demonstraram quedas do teor de Al_2O_3 comparada com a alimentação de 0,97, e 0,32 % Al_2O_3 , respectivamente. Produto 2, teve ganho de 0,69 % Al_2O_3 . O produto 4 e o rejeito tiveram valores quase igual ao teor da alimentação, com ganhos de 0,08 e 0,06 % Al_2O_3 , respectivamente. Notável do Lote 4 foi o aumento no teor de Al_2O_3 (2,02%) que ocorreu no produto 3. Esse aumento foi o maior aumento no teor de Al_2O_3 de qualquer produto de qualquer lote estudado.

5.2.4 Resultados totais do minério de ferro

A combinação dos resultados dos testes (Tabela 11 a Tabela 15) permite produzir resultados para diferentes concentrações. Constando que cada somatório de produto pode formar um número de concentração, onde a concentração 1 reflete no resultado do produto 1, concentração 2 reflete o resultado cumulativo dos produtos 1 e 2. Na concentração 3 reflete nos resultados dos valores cumulativos dos produtos 1, 2 e 3, e assim sucessivamente seria tomado como parâmetro para a concentração 4 a combinação de todos os produtos por aquele lote. A Tabela 16 abaixo, apresenta os valores de massa acumulada e seus respectivos teores e recuperações.

A Tabela 16 mostra as predições calculadas das composições de todas as concentrações de produtos por cada lote. Pelos cálculos todos os teores de concentração 4 para Lote 1, Lote 3 e Lote 5 geram produto com teor em cima de 60% Fe, enquanto os lotes 2 e 4 geram teores em cima de 59 e 58% Fe, respectivamente. Dessa mesma forma, a recuperação metalúrgica pode ser calculada por todas as concentrações 4 por cada lote, e varia de 69,80, e 62,16% Fe recuperada nos lotes 2 e 1 respectivamente, até 39,2 e 35,48% Fe recuperado nos lotes 4 e 5. O Lote 3 teve uma recuperação metalúrgica quase meia-meia (49.13%).

Com esses números de recuperação uma curva de teor (Fe %) por massa recuperada (massa %) foi montado, como mostrado na Figura 25 Abaixo. O gráfico ilustra claramente que quanto menor a quantidade de massa recuperada maiores são os teores de ferro contido no minério.

Tabela 16. Valores das concentrações possíveis pelo *Sorter* por lote para o minério de ferro estudado.

Lote	Conc.	Threshold (RD)	M. *Ac. [%]	Fe *Ac. [%]	Fe ϕ Rec. *Ac. [%]	SiO2 *Ac. [%]	Al2O3 *Ac. [%]
1	Conc. 1	180-220	21,95	62,91	24,53	5,26	1,89
1	Conc. 2	170-220	34,87	62,20	38,52	4,55	2,46
1	Conc. 3	160-220	44,37	61,59	48,53	5,47	2,43
1	Conc. 4	150-220	57,65	60,71	62,16	6,34	2,57
1	Rejeito	-	42,35	100	100	20,95	2,96
1	Total	-	100,00	56,30	100	12,53	2,73
2	Conc. 1	180-220	21,62	59,58	23,52	10,31	1,62
2	Conc. 2	170-220	38,20	59,84	41,75	9,33	2,08
2	Conc. 3	160-220	53,76	59,47	58,39	8,61	2,90
2	Conc. 4	150-220	64,44	59,32	69,80	8,05	2,95
2	Rejeito	-	35,56	100	100	25,46	3,60
2	Total	-	100,00	54,76	100	14,24	3,18
3	Conc. 1	180-220	10,38	61,29	12,35	6,13	2,01
3	Conc. 2	170-220	22,03	61,58	26,34	6,78	1,75
3	Conc. 3	160-220	32,22	61,05	38,19	6,35	2,18
3	Conc. 4	150-220	41,60	60,82	49,13	6,35	2,29
3	Rejeito	-	58,40	100	100	31,07	2,02
3	Total	-	100,00	51,50	100	20,79	2,13
4	Conc. 1	180-220	5,32	62,20	6,53	8,32	1,12
4	Conc. 2	170-220	16,13	60,47	19,26	8,36	1,38
4	Conc. 3	160-220	19,82	59,60	23,33	8,49	1,68
4	Conc. 4	150-220	33,91	58,54	39,20	9,76	1,07
4	Rejeito	-	66,09	100	100	30,46	0,94
4	Total	-	100,00	50,64	100	23,44	0,98
5	Conc. 1	180-220	5,97	63,73	7,31	6,28	0,94
5	Conc. 2	170-220	10,79	62,98	13,05	5,67	1,68
5	Conc. 3	160-220	19,68	62,52	23,63	5,36	1,64
5	Conc. 4	150-220	30,10	61,38	35,48	6,11	1,76
5	Rejeito	-	69,90	100	100	23,74	1,97
5	Total	-	100,00	52,07	100	18,43	1,91

^oConcentração, conforme a descrição em cima

*Valor calculado

^φRecuperação metalúrgica acumulada de todo o ferro dentro do lote

A média de todos os lotes também está plotada na Figura 25, junto com a linha de tendência linear feito no *software* Excel da média. A equação dessa linha, e seu valor de R^2 estão visíveis no gráfico. O valor do R^2 da linha de tendência linear é da 0.9461, significando uma correlação forte entre a massa recuperada e o teor calculado do minério resultante pela média dos resultados.

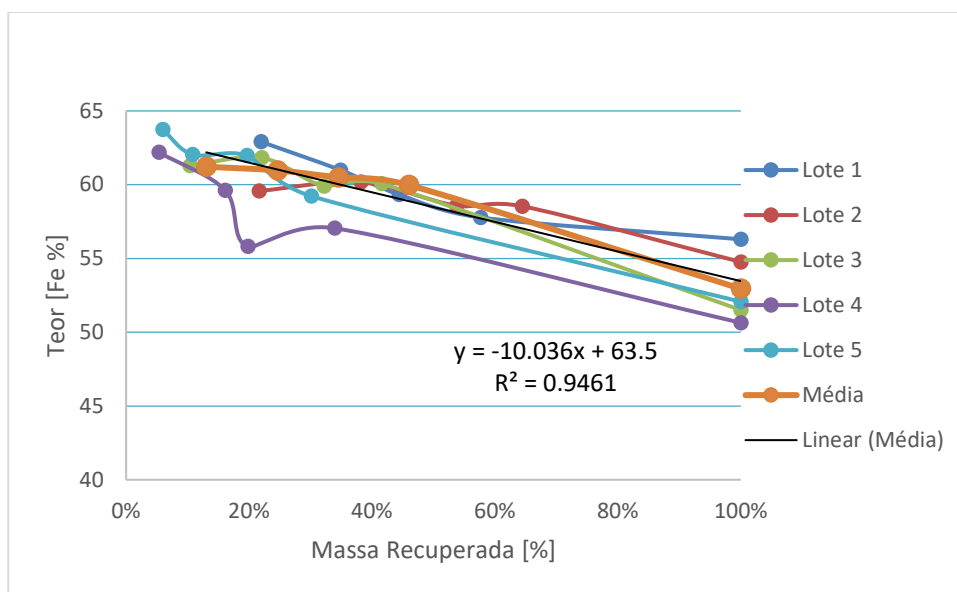


Figura 25. Recuperação e teor de ferro por massa recuperada.

Tanto a Figura 25 acima quanto a Tabela 16 confirmam a ponderação do parágrafo anterior como um comportamento geral para cada lote do minério de ferro. Existe uma variabilidade dos resultados, mas existe uma variabilidade ainda maior no material de alimentação, sendo que os lotes com o maior teor de ferro gerarem produtos com teores elevados com a exceção do Lote 3, cujo teor total (51.5 % Fe) era menor do que o teor do lote 5 (52.7 % Fe), mas gerou produtos com teores acima dos produtos do lote 5. O lote que gerou o melhor produto foi lote 5 (produto 1 com teor de 63.73 % Fe, apesar do fato que o produto teve uma quantidade pequena de massa recuperada).

Os resultados podem ser visualizados pela Figura 26 abaixo que apresenta os teores de cada concentração, prestando conta do fato que cada concentração representa uma composição do produto equivalente de seu número em conjunto com todos os produtos anteriores, e.g. concentração 3 significa os produtos 1, 2 e 3 em conjunto.

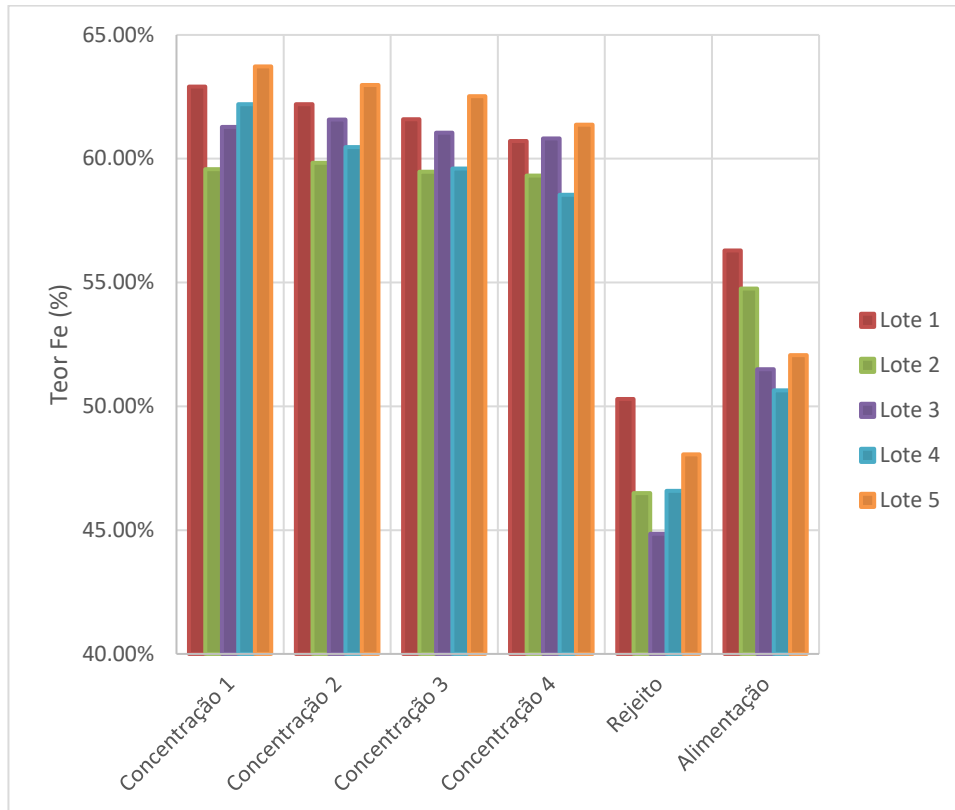


Figura 26. Teores de Fe por concentração (produtos acumulados), rejeito e alimentação

Pela Figura 26 a diferença entre os teores de cada concentração e os teores do rejeito se torna aparente. Por cada lote, os teores de rejeito apresentam valores reduzidos de Fe aos teores de alimentação e cada concentração demonstrou ganhos de teor de Fe comparado com os teores de alimentação. Mesmo que todos os teores de Fe no rejeito foram menores do que todos teores de Fe na alimentação, o teor do rejeito do Lote 1 (50,3 % Fe), e a alimentação do Lote 4 (50,64%) quase empatarem com seus valores.

Com respeito aos teores de SiO_2 , os valores dos teores de cada concentração encontram no gráfico da Figura 27 abaixo.

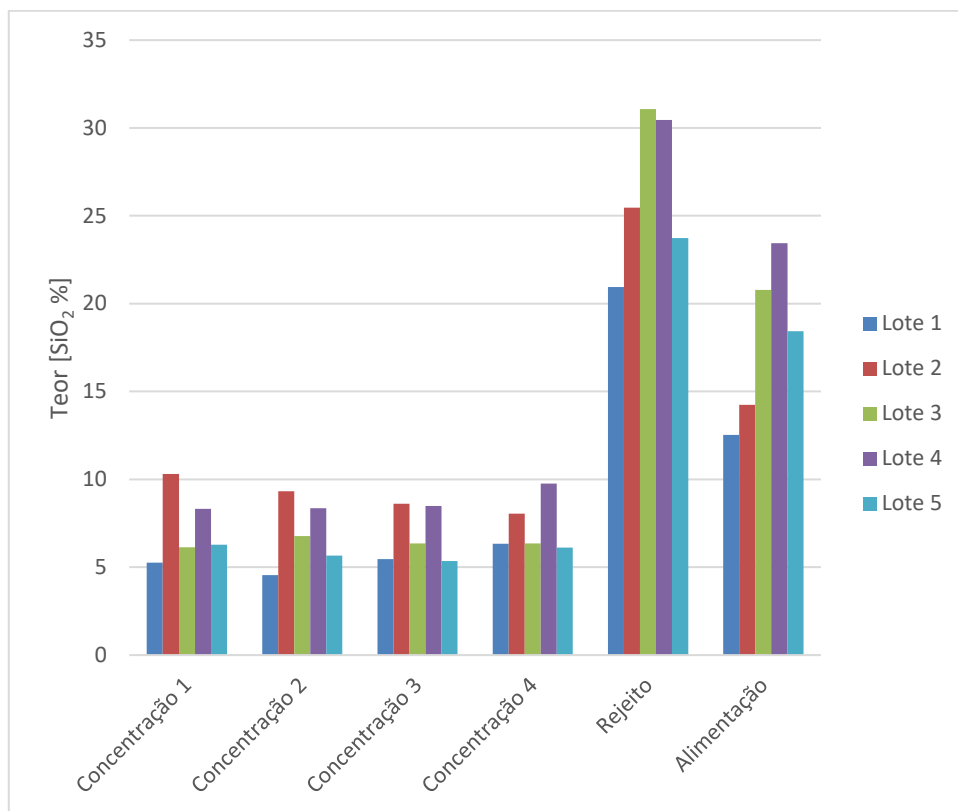


Figura 27. Teores de SiO₂ por concentração (produtos acumulados), rejeito e alimentação

A Figura 27 mostra a diferença entre os teores de SiO₂ cada concentração, os teores de alimentação e os teores dos rejeitos. Por cada lote, os teores de rejeito apresentaram valores elevados em SiO₂ aos teores de alimentação e cada concentração demonstrou perdas de teor de SiO₂ comparado com os teores de alimentação de seu próprio lote. Porém, o rejeito do Lote 1 teve um teor de SiO₂ menor que o teor de SiO₂ na alimentação dos lotes 3 e 4, e o valor do teor de SiO₂ do rejeito do Lote 5 ficou quase igual ao valor do teor rejeito do Lote 4.

Com respeito aos teores de Al₂O₃, os valores dos teores de cada concentração encontram no gráfico da Figura 28 abaixo.

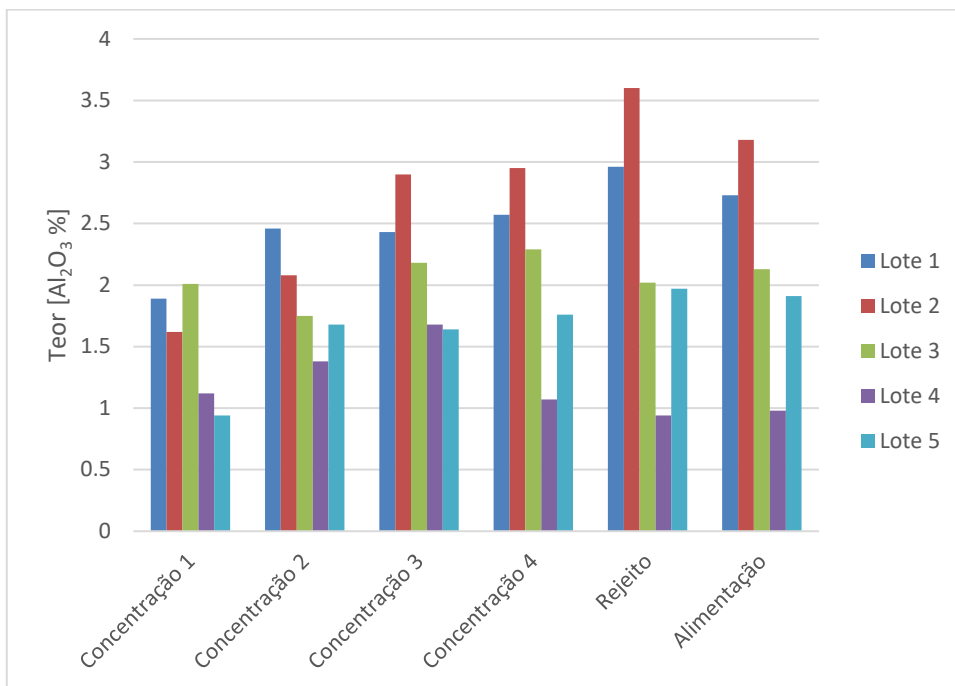


Figura 28. Teores de Al_2O_3 por concentração (produtos acumulados), rejeito e alimentação

A Figura 28 mostra a diferença entre os teores de Al_2O_3 cada concentração, alimentação e rejeito. Com a exceção do Lote 3 e Lote 4, os teores de rejeito apresentaram valores elevados em Al_2O_3 aos teores de alimentação e cada concentração demonstrou perdas de teor de Al_2O_3 comparado com os teores de alimentação de seu próprio lote. Nos casos de Lote 3 e Lote 4, houveram aumento nos teores de Al_2O_3 nos produtos. Notável é o baixo teor de Al_2O_3 presente na alimentação do Lote 4 que teve um valor de aproximadamente a metade do teor de qualquer outro lote. Com exceção exclusiva do Lote 4, os produtos 1 de cada lote tiveram teores reduzidos de Al_2O_3 comparado com a alimentação.

Para considerar todos os lotes em conjunto, a Tabela 17 apresenta os valores médios de recuperação metalúrgica de ferro (Fe), teores de ferro (Fe) e massas (kg) de todos os lotes em combinação. Esses valores confirmam que o teor do conjunto do material (todas as amostras do *Lump* rejeito) pode ser enriquecido de 52.94% para 59.97% de Fe (basicamente o teor de 60% Fe, que está exigido pelo mercado) usando a tecnologia do *Sorter* sem nenhuma outra operação de recuperação ou beneficiamento. Essa operação usa 46% da massa (após peneiramento) de alimentação para recuperar 52.1% do Fe.

Tabela 17. Recuperação do ferro no *Sorter* por concentração cumulativa dos lotes.

Concentração	Massa [Kg]	Fe [Kg]	Fe [%]	Mass [%]	Rec. [Fe %]
Conc. 1	3.78	2.31	61.11	13.03	15.04
Conc. 2 ₍₁₊₂₎	7.16	4.36	60.89	24.69	28.4
Conc. 3 ₍₂₊₃₎	10.02	6.06	60.48	34.55	39.47
Conc. 4 ₍₃₊₄₎	13.34	8	59.97	46	52.1
Rejeito	15.66	7.35	46.93	53.99	47.9
Alimentação	29.003	15.354	52.94	100	100

Como visto na Tabela 17, 13% da massa da alimentação pode ser separado como concentração 1 (produto 1) de todos os lotes, assim possuindo um teor de 61.11% Fe. Juntando todo o material de produto 2 de todos os lotes com o material da concentração 1 gera concentração 2, com teor de 60.89% Fe e massa de 24.69% da alimentação. Dessa forma a concentração 3 está composto por todo o produto 1, 2, e 3 do material e a concentração está composto por todos os produtos 1, 2, 3, e 4 do material. Nenhuma concentração causou uma recuperação metalúrgica de ferro (Fe) muito maior do que outra, sendo que os aumentos nas recuperações eram de 15,04, 13,36, 11,07, e 12,63 % para as concentrações 1 a 4, respectivamente.

5.2.5 Discussão dos resultados do minério de ferro

Geralmente falando, o equipamento aumenta os teores de ferro e a recuperação metalúrgica para cada concentração feita. Através do estudo, a configuração de *threshold* e da porcentagem que foram selecionadas, sendo que o *threshold* teve valores de 150-220 e a porcentagem de 75%. Essa configuração gerou os melhores valores de recuperação enquanto atingiu um teor de 60% Fe no conjunto dos produtos. Aumento no teor de Fe esta geralmente correlacionado com uma redução nos teores de SiO₂ e Al₂O₃. Ainda mais, em geral, os teores de SiO₂ foram reduzidos ao mesmo tempo que os valores de ferro foram elevados (para menor que 10% SiO₂ em todos os lotes), comprovando uma melhoria na qualidade do minério do produto comparado com o minério de alimentação. Entretanto, mesmo que os teores de Al₂O₃ aumentaram na maioria das concentrações, houve casos em que esses teores também diminuíram. A heterogeneidade do material pode ser a causa dessas diferenças.

Através dos testes, o equipamento atingiu as exigências desejadas pela empresa de um fornecimento de um produto *Lump*, com teor de 60% Fe. Considerando o teor da concentração 4 (a aglomeração de todos os produtos separados), houveram lotes com maior quantidade de massa do que outros (o Lote 2 teve mais de 7 kg enquanto o Lote 1 teve 4 kg), e na realidade a pilha de rejeito provavelmente tem uma distribuição mais uniforme de massa em relação as amostras. Essa grande diferença nas massas de cada lote permitiu examinar a quantidade máximo possível de material. A maneira que mais partículas examinadas ajudam compreender o material melhor, não existe um limite máximo para realizar testes futuros. Sendo que os lotes com menos massa podem influenciar os teores finais mais que influenciariam na realidade, a influência da massa de cada lote no teor medio gerado deve ser considerado como melhor simulação a uma aplicação real.

Um gráfico de radar é um método gráfico de apresentar dados multivariáveis. Para visualizar a distribuição e contribuição de cada lote na quantidade total, um gráfico de radar foi feita e está mostrado como Figura 29. Nesse gráfico, se os lotes foram homogêneos, cada lote deve aparecer como um hexágono equilátero, sendo que na situação ideal, cada lote participe igualmente em todos os produtos e o rejeito e alimentação. No mínimo, deve esperar que todos os lotes tomam a mesma forma dentro do gráfico, sendo que todos vem da mesma origem.

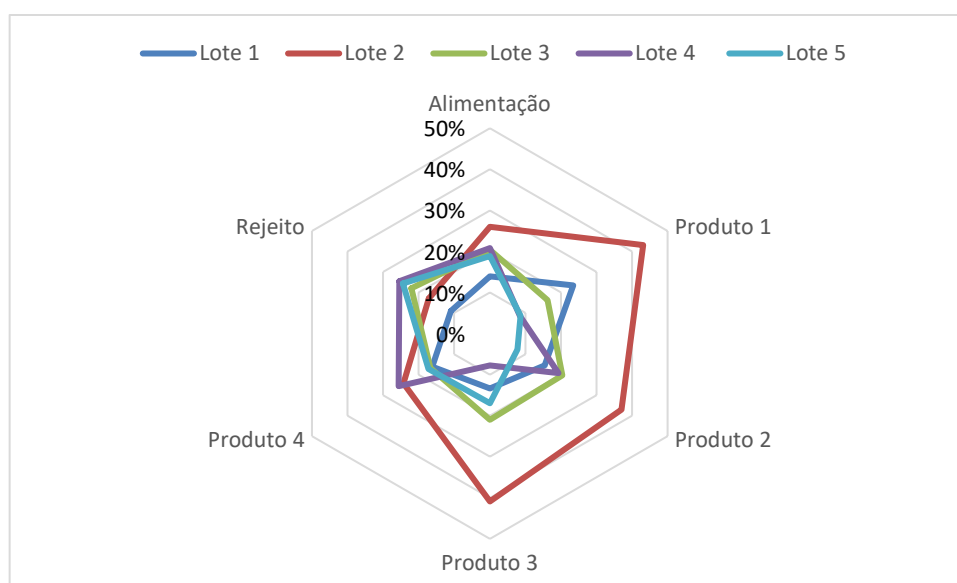


Figura 29. Gráfico de Radar dos produtos, rejeito e alimentação

Conforme mostra a Figura 29, o Lote 2 representa aproximadamente 40% da composição mássica dos produtos 1, 2, e 3, mesmo que ele apenas representa 26% da alimentação total. Pelo gráfico, quanto mais hexagonal e regular a forma, melhor distribuído a participação do lote representado pela forma entre os vários produtos. Lotes 4 e 5, por exemplo, constituem 21 e 19 % da massa da alimentação, mas 25 e 24 % do rejeito, respectivamente.

Usando essas composições, como indicação da afinidade de cada lote para separar em cada produto, a Tabela 18 mostra a composição mássica de cada lote em cada produto no caso de alimentação uniforme do material. Neste cenário, o Lote 1, que teve menor peso, passa ter mais influência na composição da massa dos produtos (34% na composição do produto 1 comparado com 23% sem esse ajuste).

Tabela 18. Composição mássica por alimentação uniforme

Composição Massica (% massa)					
Teste	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5
Alimentação (uniforme)	20%	20%	20%	20%	20%
Produto 1	34%	33%	16%	8%	9%
Produto 2	23%	29%	21%	19%	8%
Produto 3	20%	33%	21%	8%	19%
Produto 4	23%	18%	16%	24%	18%
Rejeito	16%	13%	21%	24%	26%

No caso dessa estimativa do material de alimentação uniforme, a média dos produtos somados aumenta tanto o teor (60,1% Fe na concentração 4 de todos os lotes em conjunto), quanto a linha de tendência e o valor de R^2 (0.9575) da correlação entre teor Fe e massa % recuperada (Figura 25). A Figura 30 mostra a curva de teor (Fe %) e massa recuperada (massa %).

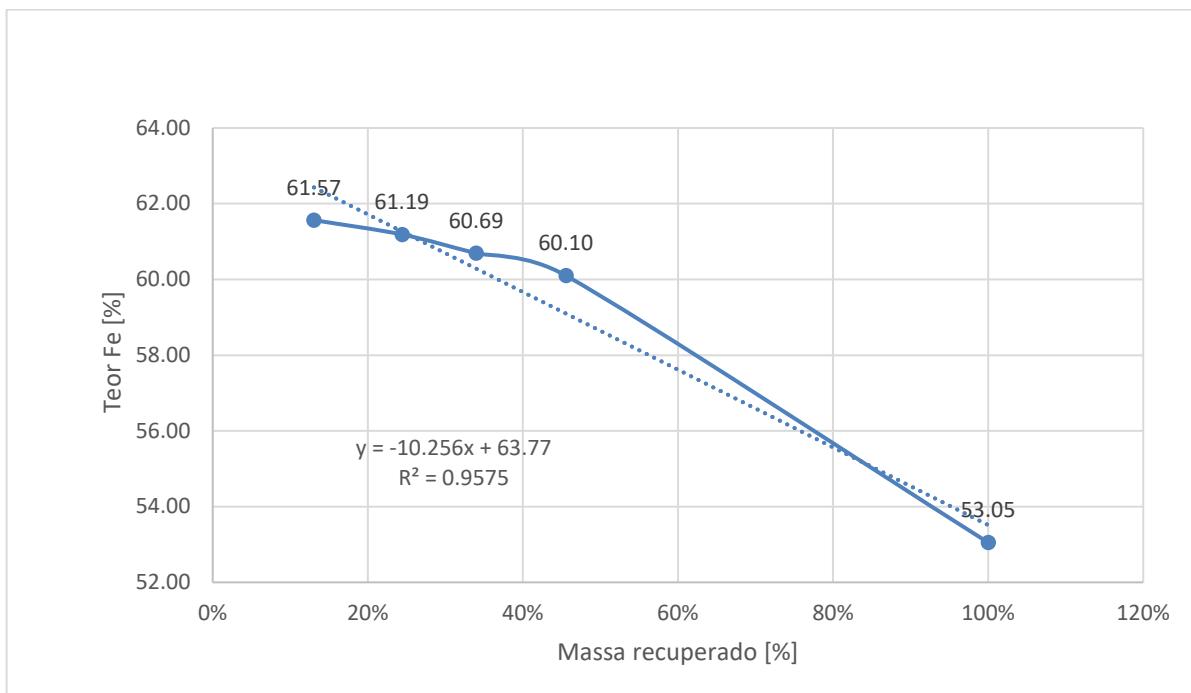


Figura 30. Teores (Fe%) e massa recuperado (%) por alimentação uniforme.

5.2.6 Análise estatística dos resultados do minério de ferro

A maneira que os lotes 2, 3 e 4 tiveram valores maiores de teor em um ou mais de seus produtos inferiores, uma análise de variação dos dados está aqui apresentada na Tabela 19. Como esta mostrado na Tabela 19, a alimentação tem maior variância (5.733) do que qualquer outra concentração que foi feita, ou seja, mesmo que o equipamento ofereça resultados que variam de teores, não houve nenhuma concentração no qual a variação passou mais da variação do material na alimentação. O Produto 3 teve a maior variação (5.057) de todos os produtos e Produto 2 teve a menor variação (1.107).

A variância de todos os produtos (1 a 4) é de 4.072, com um desvio padrão de 2.017, mostrando assim que o material separado pelo equipamento está mais homogêneo do que o material que entrou, mostrando assim que o equipamento tem uma afinidade para identificar partículas de alto teor de ferro com consistência.

Tabela 19. Relações estatísticas para os teores de produto e Lote

Concentração	Teor Fe [%]					Propriedade estatística		
	Lote1	Lote2	Lote3	Lote4	Lote5	Médio	Variância	Des. Padrão
Produto 1	62.9	59.6	61.3	62.2	63.7	61.942	2.493	1.578
Produto 2	60.9	60.2	61.8	59.6	62.1	60.932	1.107	1.052
Produto 3	59.3	58.6	59.9	55.8	62	59.118	5.057	2.248
Produto 4	57.8	58.5	60.1	57.1	59.2	58.532	1.373	1.171
Rejeito	50.3	46.5	44.9	46.6	48.1	47.258	4.132	2.032
Alimentação	56.3	54.8	51.5	50.6	52.1	53.054	5.733	2.394

A Figura 31 mostra todos os produtos, seu teor e massa e a linha de tendência para todos os pontos de dados analisados. Ao princípio, o valor de R^2 de 0.7822, que significa que a correlação direta entre a massa recuperada (%) e o teor (Fe%) somente pode descrever um pouco mais que a metade dos dados, porem como já foi explicado, a variância intrínseca do material afeta muito essa correlação.

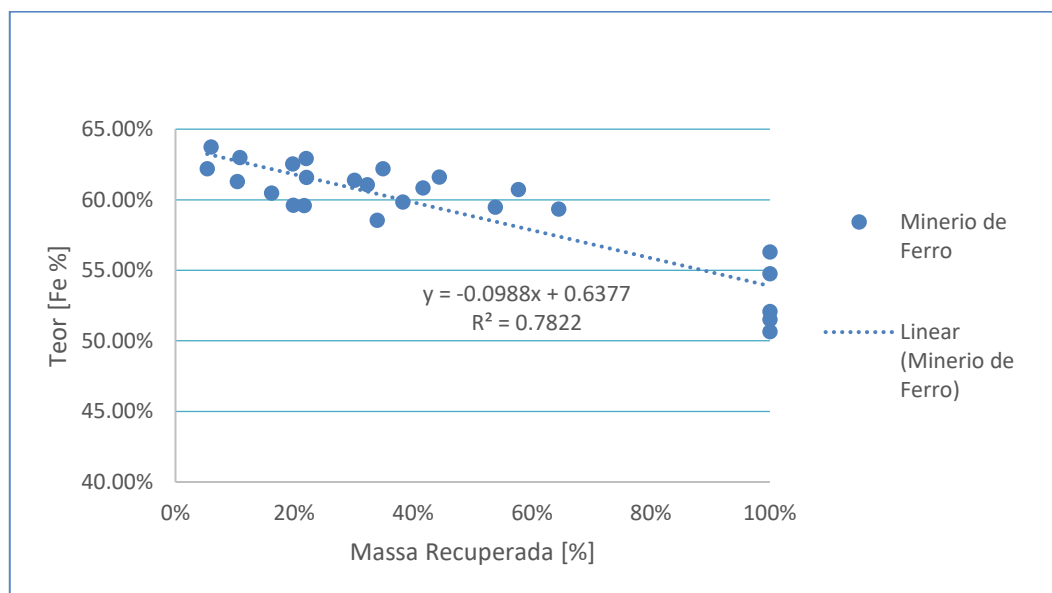


Figura 31. Linha de tendência e correlação dos resultados do minério de ferro

Os pontos em azul no lado direito da Figura 31 com valores de 100% no eixo x, tem valores no eixo y dos teores das alimentações do minério estudado, sendo que 100% da massa significa o teor de alimentação. Ou seja, os valores de teores dos pontos com massa recuperada de 100%, são os teores naturais do mineiro sem nenhuma influência do *Sorter*. Os pontos na extrema esquerda representam

produtos que passaram pelas exigências mais altas do *Sorter*, e os pontos do meio passaram pelo *Sorter*, porém com condições menos exigentes. Isso reafirma que a variância do material se reduziu por causa do *Sorter*, e que nas condições mais rígidas do *Sorter*, o material não é apenas de melhor qualidade, mas também, mais homogêneo.

5.3 Resultados e discussão do Zinco

Neste tópico é importante ressaltar os resultados de caracterização com o mesmo minério de Zn realizados por Dimas Neto (2017) cuja conclusão mostrou que o ROM., coletado em três pontos distintos no depósito objeto do estudo, mostrou que ambas amostras tiveram a mesma característica no que tange aos teores de Zn. Estes dados comprovaram, por teste de afunda/flutua e recuperação metalúrgica, que os melhores teores de Zn estão presentes no minério com densidade maior que $2,8 \text{ g/cm}^3$ e que por sua vez tende a reduzir os teores de MgO, sendo o inverso também verdadeiro, pois na massa flutuada os teores de MgO tendem a aumentar e de Zn tendem a diminuir. A maior relevância desta informação está concatenada com os dados obtidos no *Sorting*.

5.3.1 Resultados do *Escaneamento* do minério de zinco

A Figura 32 apresenta as imagens do minério de zinco (as partículas na parte superior da imagem) e os minérios de rejeito ou encaixante (as partículas na parte inferior da imagem) capturadas pelo DE-XRT (imagens de preta e cinza) e a imagem processada pelo *software* CXR correlatada (amarelo para zinco, azul para rejeito).

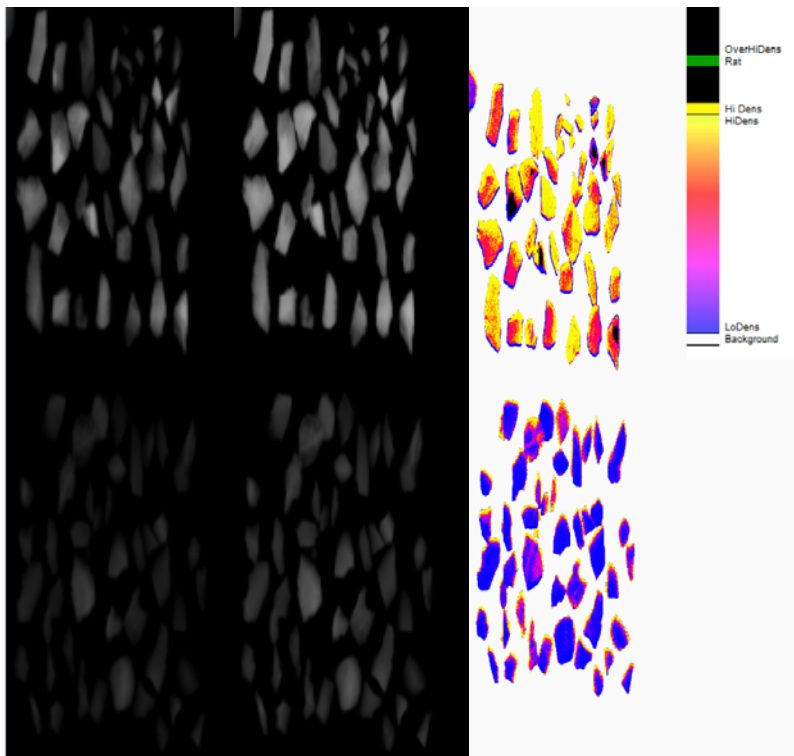


Figura 32. Imagens de raios-X (alto na esquerda, baixo no meio) e a imagem feito pelo CXR (a direita).

Se observa da Figura 32 que a grande maioria do material pré-classificado como rejeito teve características bem aparentes pelo sensor, como a característica de densidade relativa menor a densidade da grande maioria do minério. Um pixel com cores amarela representa densidades igual ou maior a densidade da curva de uma curva para zinco, especialmente configurada na máquina para os testes, e os pixels azuis representam densidade igual ou menor a densidade de Qtz (quartzo) do *software* CXR. Os pixels com outras cores têm densidades relativamente intermediário dos dois (entre Qtz (2,67) e a curva do ajustado do Fe (7,90) para zinco), e provavelmente contém uma mistura de minério de zinco e minério de quartzo (representado pela curva Qtz).

Todos os detalhes da calibração dos testes do minério de zinco estão no Apêndice III, portanto, as variáveis de calibração mais relevantes para a operação do equipamento se encontram na Tabela 20.

Tabela 20. Resultados dos testes de calibração do equipamento para os testes do minério de zinco.

Curva de Calibração	Granulometria	Teste	Threshold	Porcentagem
Qtz(2,67) - Fe(7,90) (Fe ajustada para Zn)	-50 + 19 mm	Teste 1 Teste 2 (Replica)	0-100	75%
Qtz(2,67) - Fe(7,90) (Fe ajustada para Zn)	-25 + 8 mm	Teste 1 Teste 2 (Replica)	0-150	75%

As mesmas configurações foram modificadas para o minério de menor tamanho granulométrico. Ademais, esses valores de *threshold* são calibrados para identificar e rejeitar partículas de rejeito com mais de 75% em área da partícula por pixels identificado pelo tratamento de imagem do *Sorter* como sendo de entre 0 a 100 no valor de *threshold*.

5.3.2 Resultados por cada granulometria do minério de zinco

5.3.2.1 Resultados da granulometria maior (-50 +19mm)

A Tabela 21 apresenta os resultados dos testes do minério de zinco que foram divididos em dois lotes por faixas granulométricas para a faixa granulométrica de -50 +19mm. Nestes testes, considerando que foram obtidas 2 massas para avaliar a reprodutibilidade dos resultados, pode-se notar que os teores de zinco foram de 28,37% e corresponderam a uma elevação de 6,2% do teor no concentrado com uma recuperação mássica de aproximadamente 75% e metalúrgica de 96,8%. Durante o teste de reprodutibilidade, usando as mesmas configurações dos primeiros testes, os resultados de análise química mostraram que houve similaridade nos valores de teores de zinco que forem de 28,74%, elevando o teor de Zn também em 6,6%. Se considerando os dois resultados para os testes em tela, pode-se notar que a recuperação metalúrgica do Zn foi de 93,72% com recuperação mássica de 72% de uma massa inicial de aproximadamente 11 kg.

Tabela 21. Resultados dos testes para o minério de zinco na fração -50 +19 mm.

SORTING – XRT sensor (-50 +19 mm)													
	Produto	Massa (kg)	Massa (%)	Teor (%)					Recuperação metalúrgica (%)				
				Zn	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Zn	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
Teste 1	Concentrado	11.3	76	28.4	11.7	9.07	0.5	6.5	96.9	87.7	51	60.9	53.4
	Rejeito	3.6	24	2.9	5.1	27.2	1.0	17.8	3.1	12.3	49.0	39.1	46.6
	Alimentação Calculado	15	100	22.2	10.1	13.5	0.7	9.3	100	100	100	100	100
Teste 2 (Replica)	Concentrado	11.8	70	28.7	12	8.5	0.3	5.9	90.6	81.8	45.5	45.0	46.9
	Rejeito	5.1	30	6.9	6.1	23.3	0.8	15.3	9.4	18.2	54.5	55.0	53.1
	Alimentação Calculado	17	100	22.1	10.2	13	0.4	8.7	100	100	100	100	100
Média	Concentrado	11.6	73	28.6	11.8	8.8	0.4	6.2	93.7	84.8	48.2	52.9	50.2
	Rejeito	4.4	27	4.9	5.6	25.3	0.9	16.5	6.3	15.2	51.8	47.1	49.9
	Alimentação Calculado	16	100	22.1	10.1	13.3	0.5	9.0	100	100	100	100	100

Pela Tabela 21 observe se que os resultados são bem parecidos, tanto pelos ganhos em teor de Zn nos produtos, quanto pela massa recuperado por cada repetição. Outro fator importante mostrado pela tabela, é que o teor de MgO diminui por quase 50% do valor anterior, enquanto o teor de Zn aumenta por quase 27%. Esses valores são comparados com os teores anteriores e são de proporção de ganhos, enquanto os ganhos no stricto sensu são de 6% no teor de Zn e uma redução de 3 % no MgO. Ao mesmo tempo que os valores de Zn concentram no produto, os valores de CaO concentram no rejeito, assim aumentando de aproximadamente 13% de CaO na alimentação para aproximadamente 23% de CaO no rejeito, ou seja, o teor de CaO no rejeito se tornou duas vezes mais concentrado do que na alimentação.

5.3.2.2 Resultados da granulometria menor (-25 +8mm)

Em outra perspectiva os testes de pré-concentração do minério de zinco apresentados da Tabela 16, também tendo como resultado o teste 1 e outra réplica, mostraram que no teste 1, com recuperação mássica de 75,5%, teve seu teor de Zn no concentrado em 27% representando uma elevação de 5,13%, recuperando ~92% do metal de Zn após *Sorting*. Notável dos valores de pré-concentrado da réplica é o

grau pelo qual os valores se aproximam dos valores do teste 1. Considerando uma média desses valores é possível notar que com recuperação mássica de 72% a tecnologia possibilita elevar o teor para aproximadamente 6%, recuperando ~92% do metal de Zn.

Tabela 22. Resultados dos testes para o minério de zinco na fração -25 +8 mm.

SORTING – XRT sensor (-25 +8 mm)													
	Produto	Massa (kg)	Massa (%)	Teor (%)					Recuperação metalúrgica (%)				
				Zn	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Zn	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
Teste 1	Concentrado	4.3	75.5	28	11.5	8.4	0.4	6.1	92.5	82.8	56.6	57.3	58.3
	Rejeito	1.4	24.5	7	7.4	20	0.9	13.4	7.5	17.2	43.4	42.7	41.8
	Alimentação Calculado	5.7	100	22.8	10.5	11.3	0.4	7.8	100	100	100	100	100
Teste 2 (Replica)	Concentrado	4.7	70.4	26.3	13.4	10.1	0.4	7.3	93.0	81.7	49.1	50.9	51.6
	Rejeito	2	29.6	4.7	7.1	24.8	0.9	16.3	7.0	18.3	50.9	49.1	48.4
	Alimentação Calculado	6.7	100	19.9	11.7	14.4	0.6	10	100	100	100	100	100
Média	Concentrado	4.5	72.9	27.1	12.5	9.3	0.4	6.7	92.8	82.3	52.8	54.1	54.9
	Rejeito	1.7	27.1	5.9	7.3	22.4	0.9	14.8	7.3	17.8	47.2	45.9	45.1
	Alimentação Calculado	6.2	100	21.4	11.0	12.8	0.5	8.9	100	100	100	100	10

Pela Tabela 22 observe se que os resultados são bem parecidos, tanto pelos ganhos em teor de Zn nos produtos, quanto pela massa recuperado por cada repetição. Outro fator importante mostrado pela tabela é que o teor de MgO diminuiu por quase 50% do valor anterior, enquanto o teor de Zn aumenta por quase 27%. Esses valores são comparados com os teores anteriores e são de proporção de ganhos, enquanto os ganhos no stricto senso são de 6% no teor de Zn e uma redução de aproximadamente 2.5 % no MgO.

Ao mesmo tempo que os valores de Zn concentram no produto, os valores de CaO concentram no rejeito, assim aumentando de aproximadamente 13% de CaO na alimentação para aproximadamente 23% de CaO no rejeito, ou seja, o teor de CaO no rejeito se tornou duas vezes mais concentrado do que na alimentação.

Apesar de granulometrias muito diferentes, os resultados tanto na Tabela 21 quanto na Tabela 22 são muito parecidos. Essa observação continua para Zn, MgO

e CaO, sendo que todos as concentrações do mesmo tipo têm características iguais de cada minério. Esses resultados afirmam que o *Sorter* é capaz de analisar o mesmo material, mas em granulometria diferentes, e obter basicamente o mesmo resultado.

5.3.3 Resultados totais do minério de zinco

Para mostrar os resultados num gráfico, o comportamento desses ganhos de teores para os testes 1 e réplicas, nos lotes das frações -50 +19 mm e -25 +8 mm, podem ser analisados nas Figura 33 e Figura 34. Com teores não muito distintos entre os testes 1 e 2, observados nos gráficos, é possível sugerir que a tecnologia pré-concentra o minério de zinco eliminando rejeitos com teores improváveis para serem beneficiados.

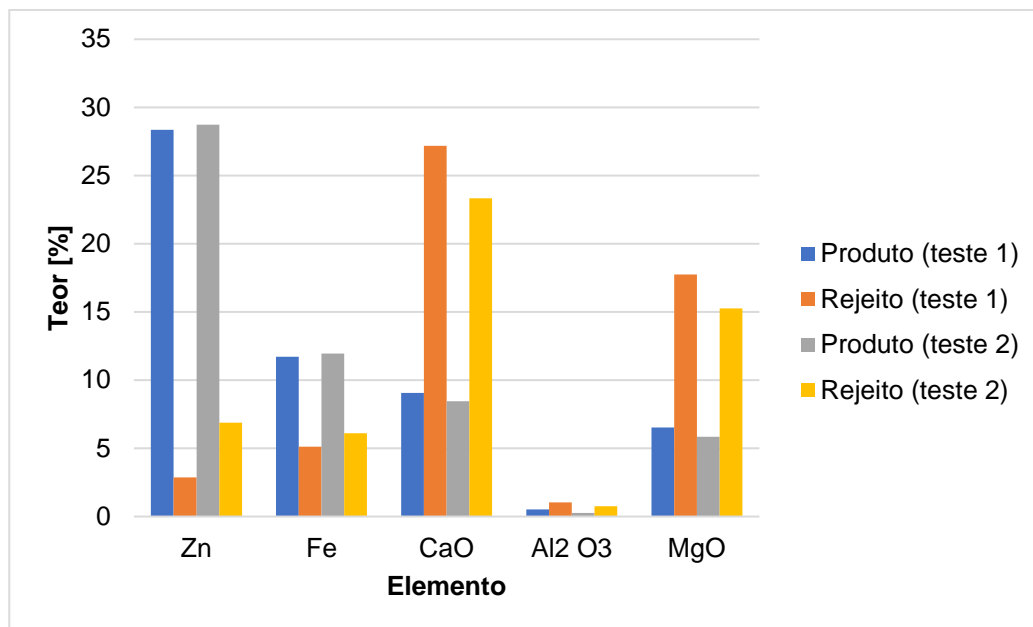


Figura 33. Zinco teores por testes 1 e 2 da granulometria -50+19mm.

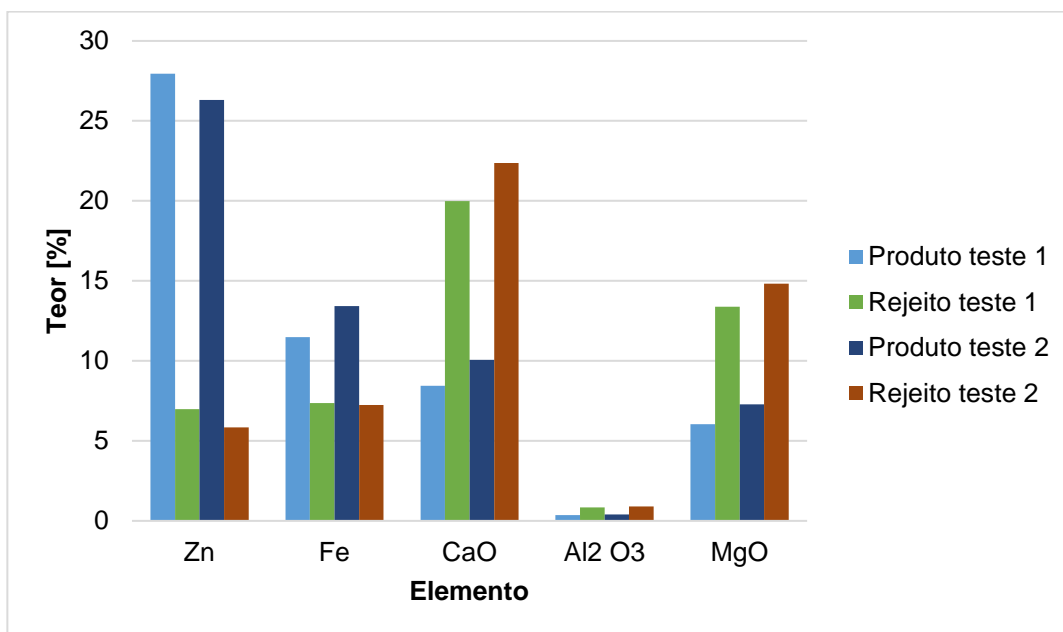


Figura 34. Zinco teores por testes 1 e 2 da granulometria -25+8mm.

Todos os teores de Zinco aumentaram mais de 25% Zn após passar pelo *Sorter*, e a recuperação do Zinco passou 90% em todos os testes com separação de rejeito, sendo que o maior valor de recuperação foi de 96.87%. As médias das recuperações por cada granulometria e elemento estão apresentados como Figura 35. Os teores de CaO caíram até aproximadamente 9% CaO e os teores de MgO caíram até aproximadamente 6.5% MgO. Enquanto as recuperações de Zn e Fe aumentam no produto para mais de 90% e 80%, respectivamente, as recuperações de CaO, MgO, ou Al₂O₃ não aumentam por mais de 55% no rejeito. Significando que apesar do fato que o *Sorter* remove quase 50% desses contaminantes, sua presença está correlacionada com os minérios. Considerando que esses minerais, (CaO, MgO e Al₂O₃) podem causar dificuldade no processo mais adiante, sua redução mostra que os benefícios do *Sorter* podem ir além de ganhos no teor do minério, mas também na sua qualidade metalúrgica para o beneficiamento.

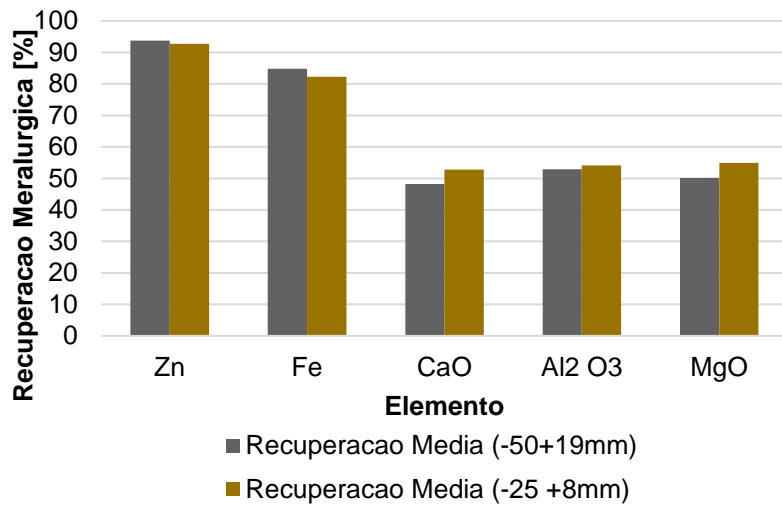


Figura 35. Recuperacoes Médias dos elementos por faixa granulometrica dos produtos de zinco.

A Figura 35 mostra que não houve quase nenhuma diferença de afinidade para separação de zinco para as duas granulometrias. O componente de maior diferença para as duas granulometrias foi o de CaO, mas esse número, 0,47% CaO, é menor que a diferença que ocorre entre amostras da mesma granulometria.

5.3.4 Discussão dos resultados do minério do zinco

Os valores de recuperações metalúrgicas por faixa granulometrica são tao próximos que nenhum relacionamento entre a faixa granulométrica e o equipamento parece ser influenciador para o minério de Zinco. Outros dados que congruem estão relacionados ao *software* do COMEX que apresenta um histograma do material durante os testes representando uma boa divergência de energia dos raios-X nos picos de rejeito a esquerda e picos do produto à direita como ilustrado na Figura 36.

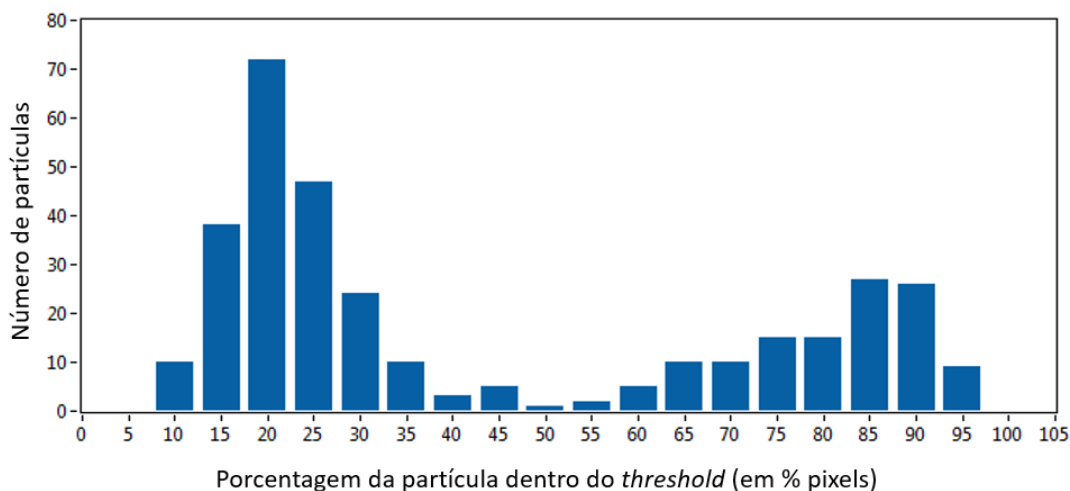


Figura 36. Histograma dos teste com minério de zinco no Software MSX do COMEX.

Estes dados estatísticos servem para mostrar eficiência de separação. Nota-se neste histograma que existem duas populações, uma com porcentagens maior que 60% associados á area de *pixels* no threshold 0-100 (cores de azul até vermelho) contidas nos materiais separados, ilustrando a natureza do material com menor teor (sendo que particulas com mais de 75% foram rejeitados nessa configuração). A outra população no grafico tem baixo porcentagens (menor que 45%) de *pixels* dentro do *threshold* de 0-100. Esse segunda população representa uma distribuição normal demonstrando a natureza do material do produto.

Os resultados do Zinco foram positivos, considerando sua alta recuperação, que se assemelham aos níveis de seraparação atingidos pelos ensaios de afunda flutua por meio denso feito por Dimas *et al.* 2017. Deve-se considerar que as técnicas do *Sorter* não exigem reagentes ou água, e podem fornecer uma opção lucrativa para uma operação de zinco, enquanto as tecnicas de afunda flutua exigem reagentes e agua.

5.3 Discussões gerais

Embora o equipamento seja incipiente, e o método de amostragem pode ter ocorrido sem total representatividade, os resultados desse estudo já foram usados em empresas que solicitaram os testes. As empresas acharam os resultados muito pertinentes e inovador para o estado atual da empresa. Por exemplo, os benefícios do *Sorter* podem ser consideráveis ao partir do momento que o custo de operação

do *Sorter* for apenas mais barato do que o custo de estocagem de aproximadamente 46% do rejeito no caso da mina de ferro, ou se seu custo de operação for apenas mais barato do que os custos de energia de aproximadamente 27% da massa nas granulometrias -60 +8mm do ROM no caso da mina de zinco. Ou seja, o *Sorter* pode possibilitar uma redução de pilhas de rejeito de até 46% podendo prolongar a vida da mina de ferro, e pode aumentar a produção na mina de zinco de até 27% multiplicado pela taxa de produção do material de granulometria de -60 +8 mm no seu ROM.

Como o equipamento se mostrou que é possível recuperar até 52% do ferro, esse valor significa, de certa forma, a eficiência da tecnologia para pré-concentrar esse minério (itabirita) de ferro estudado. Essa baixa eficiência, pode ser devido ao fato que ainda existe muito ferro não liberado nessa granulometria do minério. Sendo que a itabirita está composta por ferro bem disseminado. Mesmo que uma alta recuperação não é atingida com esse material usando o *Sorter*, existe a possibilidade de recuperar valores para melhorar o material *Lump* do rejeito passando a ser produto. Entretanto, pela mesma lógica, o *Sorter* mostrou capacidade de eficiência na separação do minério de zinco (Willemita) de em cima de 93%. Existe uma possibilidade que essa eficiência pode ser melhorada, sendo que apenas uma calibração por cada granulometria foi usada nos testes. Ao fazer que duas calibrações foram usadas para os testes do zinco, a aplicação da técnica na mina, exige um equipamento com múltiplos sensores, ou possivelmente, múltiplos máquinas para obter os mesmos resultados.

Do ponto de vista da recuperação em massa, o *Sorter* conseguiu recuperar mais de 46% de massa com teor de ferro de aproximadamente 60%, e 72% de massa de minério de zinco com teores acima de 27% Zn. No entanto, outra relevância está na pré-concentração dos rejeitos que foram gerados, com teores de 47% Fe para o rejeito do ferro, e 5% Zn para o minério de zinco. Esses rejeitos constituem aproximadamente 48% e 7% do minério total de ferro e zinco, respectivamente.

No caso do minério de ferro, a liberação do minério através de mais britagem ou moagem pode ser necessário para aumentar sua recuperação, sendo que pouco mais pode ser feito para alterar as condições de operação do *Sorter* para o particular minério estudado. Além da curva de calibração feita, os testes do minério de ferro

concluíram que os parâmetros operacionais de *threshold* modificam os teores de ferro, com maiores teores de ferro encontrado nos produtos separados por alto *threshold* no caso geral (houve poucas exceções).

No caso do minério de zinco, poucos parâmetros foram estudados, e mesmo os resultados sendo aceitáveis, existem mais configurações que podem melhorar os resultados ainda mais. Uma vez que afunda flutua pode realizar uma pré-concentração do material em conjunto com um *Sorter*, um *Sorter* pode reduzir a escala exigida pelo seu circuito. Além da curva de calibração feita, os testes do minério de zinco concluíram que os parâmetros operacionais de *threshold* precisam ser modificados para obter o mesmo resultado de minério com granulometria menor, com as maiores partículas usando um limite maior no *threshold* de 100 para a granulometria -60 +19mm, e as partículas menores usando um limite maior no *threshold* de 150.

Houve apenas dois testes de cada granulometria do minério de zinco, e os dois parecem muito semelhantes. Por esse motivo, existe pouco que pode ser falado em respeito da variação do minério de zinco no contexto de sua leitura pelo equipamento, bem ou mal. Portanto, pelos poucos resultados que existem, não há nada que sugeria que o equipamento tem uma afinidade variável para o minério de zinco estudado. Bem ao contrário, os resultados de zinco demonstram o alto grau de reprodutibilidade e precisão da leitura feita pelo equipamento.

Por outro lado, se houve 20 testes de ferro, e várias modificações de parâmetros, onde assim, a variação nos teores de Fe dos resultados caíam para o produto 1 e fica como variação mínima no produto 2, e depois sobe para uma variação muito alto para o produto 3, para diminuir de novo no produto 4. Esse resultado pode significar que a concentração de SiO₂ no minério tende agrupar por concentrações em etapas que coincidam com as configurações. Ainda mais, os teores de Al₂O₃ parecem variáveis e podem adicionar uma contribuição nessa variação da leitura. Apesar desses fatos, a variação maior ainda está no material de alimentação, sendo que nenhum produto teve variância resultante maior que a variância do minério de alimentação.

Fora a variação de leitura que foi identificado por Kuerten (2017), e vários limitações de engenharia do *Sorter* que não fazem parte do escopo desse estudo (os limites de tamanho das partículas, o grau de umidade aceitável pelo computador

fornecido da Advantech, os limites de temperatura para operação do raio-X, problemas na batida por *flap* que podem causar as partículas de ficar perdidas no equipamento, limites no algoritmo de processamento de imagem, limites no controle da esteira, dificuldade na alimentação de material, sujeira na esteira, fluxos de energia e temperatura ambiental durante os testes, etc.), o *Sorter* não apresenta nenhuma limitação em sua capacidade de gerar resultados que podem ser relevantes e pertinentes para a indústria de mineração atual. Existem materiais ou minérios que tem menos afinidade para o equipamento, e existem várias maneiras e variáveis que podem ser estudados para aperfeiçoar o equipamento, mas é justamente por esse motivo que o equipamento existe, para facilitar os estudos do aperfeiçoamento de suas técnicas.

6. CONCLUSÕES

O COMEX *Lab-Sorter* MSX-400-VL-XR-3D (*Sorter*), foi avaliado, sob diferentes condições operacionais para sua capacidade de realizar testes de pré-concentração em escala laboratorial, visando o uso dos resultados gerados para aplicação industrial. Para tal, 24 testes de separação (e muitos mais de calibração) foram realizados para dois minérios diferentes (ferro e zinco). Nesses testes, mais de 73 kg de minério passou, partícula por partícula no equipamento.

A conclusão do objetivo principal foi cumprida com sucesso, sendo que ambas as empresas que realizaram os testes acharam os resultados de alta pertinência para aplicação em suas operações. No caso de uma delas, mais testes foram solicitados depois com o próprio laboratório do estudo.

Com respeito aos objetivos específicos:

- a) **Determinar a capacidade do Sorter de realizar a separação de minérios de Ferro, e Zinco;** o *Sorter* mostrou a capacidade de aumentar o teor do minério de ferro para acima de 60% Fe, aproveitando assim de 46% da massa do material no tamanho *Lump* (-31 +12,7mm). Resumindo, o *Sorter* transforma 52% de uma pilha de rejeito em ferro de produto *Lump*. Com respeito ao Zinco, o equipamento recuperou 93% do minério

de zinco, aumentando seu teor acima de 27% Zn. Nessa forma, o *Sorter* elimina 27% da massa do ROM a ser alimentado na planta de benefício da mina de zinco.

- b) **Analisar a influência dos parâmetros operacionais do equipamento sobre o teor e a massa de material pré-concentrado:** nos testes do minério de ferro os parâmetros de *threshold* mínimo variam de 180 até 150. A Tabela 16 apresenta esses resultados por cada lote do minério de ferro que foi testado, sendo que, para o *threshold* mínimo de 180, um teor de 61,11% Fe e uma massa de 13,03 % da alimentação foram recuperados no conjunto de todos os lotes. Para os *threshold* mínimos de 170, 160, e 150, teores de ferro de 60,9, 60,5, e 60,0% Fe foram obtidos, com massas de 24,7, 34,6, e 46% da alimentação respectivamente para o conjunto de todos os lotes.
- c) **Analisar a influência de granulometria do material a ser separado nos parâmetros operacionais exigidos pelo equipamento para obter o mesmo resultado na pré-concentração:** nos testes de zinco, duas granulometrias, -50 +19mm, e -25 +8mm, foram testados. Calibrações de 75% porcentagem, e 0-100 *threshold* foram usadas no minério com o maior granulometria e 75% porcentagem e 0-150 *threshold* foi usado no minério com o menor granulometria e cada teste foi replicado uma vez. Para a granulometria maior, o *Sorter* atingiu 28,37 % Zn no primeiro teste, e 28,74% na repetição, recuperando 96,87% do zinco no primeiro teste, e 90,6% do zinco na repetição. Para a granulometria menor, teores de 27,95% Zn para o primeiro teste e 26,31% Zn na repetição, recuperando 92,51% do zinco no primeiro teste e 93% do Zn na repetição. A granulometria maior obteve então, uma média de 28,54 % Zn no seu teor de zinco, e a granulometria menor obteve uma média de 27,13% Zn no seu teor de zinco, sendo que o maior recuperou 93,73 % do minério de zinco na média, e o menor recuperou 92,75%. Em resumo, a diferença de granulometria de -50 +19 mm para -25 +8 mm, exigiu uma alteração de *threshold* valor de 50 para obter resultados de entre 1% na recuperação e 1,41% no seu teor para o minério de zinco.

- d) **Verificar a capacidade do equipamento para gerar resultados relevantes, com possível impacto econômico para operações de mineração;** esse fato foi verificado e está ponderada na seção 5.3 discussões gerais, portanto, os benefícios do *Sorter* podem ser consideráveis ao partir do momento que o custo de operação do *Sorter* for apenas mais barato do que o custo de estocagem de aproximadamente 46% do rejeito no caso da mina de ferro, ou se seu custo de operação for apenas mais barato do que os custos de energia de aproximadamente 27% da massa nas granulometrias -60 +8mm do ROM no caso da mina de zinco. Ou seja, o *Sorter* pode possibilitar uma redução de pilhas de rejeito de até 46% podendo prolongar a vida da mina de ferro, e pode aumentar a produção na mina de zinco de até 27% multiplicado pela a taxa de produção do material de granulometria de -60 +8 mm no seu ROM.
- e) **Identificar as principais limitações do equipamento para realizar sua função;** dentro do escopo desse estudo, principalmente para minérios de ferro e zinco, o *Sorter* não apresentou nenhuma limitação em sua capacidade de gerar resultados que podem ser relevantes e pertinentes para a indústria de mineração atual. Existem materiais ou minérios que tem menos afinidade para o equipamento, principalmente quando os valores de densidade dos minérios são muito parecidos comparados com os valores de densidade dos rejeitos que se encontra junto com o minério, e existem várias maneiras e variáveis que podem ser estudados para aperfeiçoar o equipamento, mas é justamente por esse motivo que o equipamento existe, para facilitar os estudos do aperfeiçoamento de suas técnicas.

6.1 Estudos futuros

Primordial nas sugestões para estudos futuros é o desenvolvimento de um sistema capaz de capturar os dados do sensor sem antes ser processado pelo

software do COMEX. Dessa forma as variáveis usadas pelos algoritmos de tratamento de imagem podem ser isoladas e estudadas mais profundamente.

Além disso, um sistema capaz de funcionar como interface entre um operador/pesquisador e os componentes do sistema deve ser criada para facilitar mudanças na operação do equipamento.

Uma vez que o escalo do equipamento é laboratorial, devem ser feitas pesquisas para avaliar a eficácia do aumento para uma escala industrial.

Sendo que o equipamento tem capacidade para capturar a forma em 3D da partícula, esse sistema deve ser explorado com mais detalhe.

REFERÊNCIAS

ADVANTECH, IPC Industrial Chassis, User Manual, Advantech, Co. 2003 Disponível em: <<https://ecauk.com/files/2013/10/Advantech-IPC-510-User-Manual.pdf>>. Acesso em: 8 Set. 2017.

ANCEL, J., X-ray Studies of Coal and Coke, **Transactions of The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers**, Pittsburgh, USA, out. 1926. Disponível em: <<http://onemine.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

ARTHUR, E.; ERNEST, H., Electronic ore Sorting. U.S. Patent 2,504,731.Int Nickel Co, 18 abr 1950.

BAJAJ, T, Information about the X-ray Source, Personal Communication, 2017.

BARTOS, Paul J., Is mining a high-tech industry? Resources Policy, [s.l.], v. 32, n. 4, p.149-158, dez. 2007. Elsevier BV.

BEARMAN, R.a.. Step change in the context of comminution. Minerals Engineering, [s.l.], v. 43-44, p.2-11, abr. 2013. Elsevier BV.

BETTENS, A; LAPOINTE, C., Electronic concentration of low-grade ores with the Lapointe Picker. Canadian Department of Mines, Technological Survey Technical Paper, n. 10, 1955.

BIBBY, P., Preconcentration by radiometric ore Sorting. Proc. Austral. Inst. Mitt. Metall. NIV Queensland Branch Mill Operators Conf., 1982.

BJORKHOLM, P., Dual energy imaging. U.S. Patent 4,511,799, 16, abr, 1985.

BOWMAN, D.j.; BEARMAN, R.a.. Coarse waste rejection through size based separation. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 62, p.102-110, jul. 2014. Elsevier BV.

BRIGGS, H., The Anthracite Problem. Proceedings of the South Wales Institutetute of Engineers,N. 39, 1923.

BUXTON, M.; BENNDORF, J., The use of sensor derived data in optimization along the Mine-Value-Chain. In: 15th International ISM congress, **Proceedings . . .** Aachen [Alemanha], 2013.

CHAVES, A.; CHAVES FILHO, R., Teoria e prática do tratamento de minérios: separação densitária. Oficina de textos, São Paulo, Brazil, 2013.

CLAYTON, C.; SPACKMAN, R., Ore Sorting apparatus. U.S. Patent No. 4,702,379. 27 out. 1987.

COHEN, E.; TAYLOR, B.N., The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants, CODATA Bulletin 63, 1986

COLBORNE, G., Electronic ore Sorting at Beaverlodge. **Canadian Mining and Metallurgical Bulletin**, v. 56, n.616, p. 664-668, 1963.

COOPER, H., On-stream X-ray analysis. Flotation--A. M. Gaudin Memorial. 1976.

COURIOT, H., Examination of Combustible Minerals. Bull. soc. ind. minerale. 1898.

CUTMORE, N.; EBERHARDT, J., The future of ore Sorting in sustainable processing, **Proceedings of the first international conference on sustainable processing of minerals and metals, green processing**, v. 2002, 2002.

DE JONG, T.; HARBECK, H, Automated Sorting of minerals: current status and future outlook. **Proc. of the 37th Canadian Mineral Processors Conference**. 2005.

DUFFY, K.; VALERY, W., JANKOVIC, A.; HOLTHAM, P.; VALLE, R. In Search of the Holy Grail—Bulk Ore Sorting. Austmine. 16 fev 2015

GARRETT, F., BURTON, R., The Use of X-rays in the Examination of Coal. **Transactions of the American Institute of Mining Engineers**, n. 62, 1911.

GILL, K., Innovation in mining – a call to action, Canadian Institute of Mining, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=wN1F8zceZ7Y>>. Acesso em: 8 Set. 2016.

HANDY, R, Hand-Sorting Of Mill Feed, **Transactions of the American Institute of Mining Engineers**. Colorado, USA, set. 1918. Disponível em: <<http://me.smenet.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

HARBECK, H.; KROOG, H., New Developments in Sensor Based Sorting, Montan University Leoben, Austria. 2008.

HUBBELL, J.; SELTZER, S., 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, NIST Standard Reference Database 126, Radiation Physics Division, PML, NIST. Disponível em: <<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>> Acesso em: 25 out. 2017.

C. IWASAKI, C., A Fundamental Study of Japanese Coal. Technical Reports, Tôhoku Imperial University, 1926, Disponível em: <<http://me.smenet.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

JEAN, C.; BUCHOT, P., COHEN, A., Process and apparatus for carrying out said process for the preconcentration of ores by induced measure of the superficial contents, Rech Geol Minieres Bureau De, assignee, United States patent US 3,795,310,5 mar, 1974

JENKINSON, D.; et al., Coal Sorting by X-ray transmission. Proceedings of the International Conference **Proceedings of the International Conference of Mining and Metallurgy**, London, Institute of Mining and Metallurgy, London, 1971.

JOHN, R.s. et al. Understanding microwave induced Sorting of porphyry copper ores, **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 84, p.77-87, dez. 2015. Elsevier BV.

KATTENTIDT, H.u.r.; JONG, T.p.r. de; DALMIJN, W.l.. Multi-sensor identification and Sorting of bulk solids. **Control Engineering Practice**, [s.l.], v. 11, n. 1, p.41-47, jan. 2003. Elsevier BV.

KEMP, N., The X-ray Analysis of Coal with Scientific and Technical Applications. **Transactions of the American Institute of Mining Engineers**, N 67, 1924 Disponível em: <<http://me.smenet.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

KEMP, N., THE EXAMINATION OF COAL AND COKE BY X-RAYS, Journal of the Royal Society of Arts,[s.l.],v. 78, n. 4021, pp. 114-136, feb 1929

KIDD D.; WYATT, N., Radiometric Sorting of ore. Proc. XII Comm. Min. Metall. Congr., Johannesburg, S.Afr. Inst. Min. Metall., 1982.

KIEHLMANN, S., Atomund molekülphysik Röntgenstrahlung, Lernportal Georg-August-Universität Göttingen, 2011.

KIERANMAHER, Dependence of the output of an X-ray tube on applied voltage, estimated using the SpekCalc spectrum generator, SA 3.0, 2011. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17661008>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

KING, R., Automatic Sorting of ores. **Minerals Science and Engineering**, 10(3), 1978, p.198-207.

KLEINE, C., Deshaling of ROM coal using XRT-Sorting, Tech, Rep. AMR, RWTH, Aachen University, 2010.

KNIGHT, R.;KNIGHT, R., Physics for Scientists and Engineers: A Strategic Approach with Modern Physics [and Mastering Physics TM]. Pearson Education., 2007.

KOLACZ, J., Intelligent Electronic Sorting System with Multiple Sensing Features, **IMPC INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS**, 26, 2012, New Delhi [India], 2012, p. 2496-2502.

KOLACZ, J., Efficient Scale Up of Sensor Based Sorting Systems In: IMPC INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 28, 2016, **Proceedings** . . .Canada: **Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum**, 2016, 10 p. ISBN: 978-1-926872-29-2.

KONIGSBERGER, D., X-Ray Absorption, Wiley-Interscience, Maiden MA, 1988

KROOG, H., Automatic Sorting of Minerals and Ores - Cobalt, Nickel, Zinc, Silver, Gold, Iron Ore Sorting by Mikrosort® Colour-, Inductive- and X-Ray Sensor Technology, **44th Annual Conference of Metallurgists of CIM**. Calgary, Alberta, Canada, 2005. Disponível em: <<http://me.smenet.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

KUERTEN, Ariane Salvador. **Pré-concentração de carvão mineral da Mina de Moatize com tecnologia Sensor Based Sorting - SBS**. 2017. 75 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LESSARD, Joseph et al. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore Sorting on a mineral processing circuit. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 91, p.92-99, maio 2016. Elsevier BV.

LESSARD, Joseph; BAKKER, Jan de; MCHUGH, Larry. Development of ore Sorting and its impact on mineral processing economics. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 65, p.88-97, out. 2014. Elsevier BV.

LINDER, H., Physik für ingenieure, Carl Hanser Verlag, München, 18a ed, 2010.

LAPOINTE, C.; WILNOT, R., Electronic concentration of ores with the Lapointe Belt Picker. Canadian Department of Mines, **Technological Survey Memorandum**, n. 123, 1952. Disponível em: <<http://me.smenet.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

MESINA, M.b.; JONG, T.p.r. de; DALMIJN, W.I.. Automatic Sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-ray transmission sensor. **International Journal Of Mineral Processing**, [s.l.], v. 82, n. 4, p.222-232, jun. 2007. Elsevier BV.

NAPIER-MUNN, Tim. Is progress in energy-efficient comminution doomed? **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 73, p.1-6, mar. 2015. Elsevier BV.

NETO, D.; BERGERMAN, M., YOUNG, A., PETTER, C., Pre-Concentration Alternatives For The Reduction Of The Carbonatic Gangue Of A Brazilian Silicate Zinc Ore, **Proceedings from Physical Separation '17**, Minerals Engineering, 2017

NEWMAN, P.; WHELAN, P., Photometric separation of ores in Lump form. **Proceedings of the Symposium of Recent Developments in Mineral Dressing**, London Institute of Mining and Metallurgy, 1952 Disponível em: <<http://me.smenet.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

NEUBERT, Kilian; WOTRUBA, Hermann. Investigations on the Detectability of Rare-Earth Minerals Using Dual-Energy X-ray Transmission Sorting. **Journal Of Sustainable Metallurgy**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.3-12, 18 jul. 2016. Springer Nature.

ONISHCHENKO, A. M.; BELONOZHKO, V. P.. Experimental optimization of a radioisotope ASH meter for a production line. **Soviet Mining Science**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.82-87, jan. 1982. Springer Nature.

PLATT,C., General Physics of Radiation in Remote Sensing, **CSIRO Office of Space Science and Applications (COSSA) Publication 026**, 1991

POKRAJCIC, Z., LEWIS-GRAY, E., Advanced comminution circuit design—essential for industry. **AusIMM Bulletin**. 38-42. aug. 2010

RIEDEL, F.; DEHLER, M., Recovery of unliberated diamonds by X-ray transmission Sorting, Colloquium: Diamonds-Source to Use, p. 193-200. 2010.

RONTGEN, W., The X-Rays. In: Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution, Government Printing Office, Washington, USA,1898, p. 137–39, 141, 142, 143.

SALTER, J.; WYATT N., Sorting in the minerals industry: past, present and future,**Minerals Engineering**, 4.7-11, 1991, p. 779-796.

SALTER J.; WYATT N., Sorting machines in the minerals industry: problems or opportunities? **Proceedings of the XVII International Mineral Processing Congress**, Dresden, sep. 1991

SAMPAIO, C.; TAVARES, L., Beneficiamento gravimétrico: Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade,Editora: UFRGS, Porto Alegre. 2005.

SITES JR LEROY, K., Automatic x-ray apparatus for crystal z-axis orientation determination and Sorting, U.S. Patent No. 3,368,675. 13 Feb. 1968.

SLIGHT, D., Potato separation using electronic discrimination. **Journal Of Agricultural Engineering Research**, [s.l.], v. 6, n. 136, 1961.

STONE, A., Bulk Sorting of particulate material. U.S. patent 4.231.478, 1980.

STRYDOM, H.,**The application of dual energy x-ray transmissions Sorting to the separation of coal from torbanite**. 2010. 88 p. Tese (Mestrado de Engenharia) – Graduate program in Engineering and the Built Environment, University of Witwatersrand, Johannesburg, 2010.

VERAS, M.; YOUNG, A.; SAMPAIO, C.; PETTER, C., A mining breakthrough: Pre-concentration by sensor-based Sorting.**Mining Engineering**, [s.3], v. 68, p. 38-42, mar. 2016. Disponível em: <<http://me.smenet.org/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

WIKIBOOKS CONTRIBUTORS, **Basic Physics of Digital Radiography/The Source**. **Wikibooks**, The Free Textbook Project, 2016. Disponível em: <

https://en.wikibooks.org/w/index.php?title=Basic_Physics_of_Digital_Radiography/ThT_Source&oldid=3045838>. Acesso em: 20 jan. 2018

WOTRUBA, H.; HARBECK, H., **Sensor Based Sorting**. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2010.

WOTRUBA, H.; RIEDEL, F., Sensor-based Sorting of metalliferous ores an overview. Sensorgestuetzte Sortierung. 2006.

APÊNDICE I:

Cronologia de aplicações de sensores de raios-X, período pioneiro 1957-1960.

Fonte: Adaptado de Cooper (1976).

Ano	Operação	Características
1957	Nchanga Consolidated, Zambia (Anglo-American)	Célula única, análise de fluxo múltiplo, baseado no espectro Philips
1958	Sullivan no Kimberly B.C (Cominco)	Monitor de cobre e zinco em caudas filtradas; Leitura tirada do filtro de bateria com o espectrômetro Philips
1959	Arthur e Magna Concentrators, Utah (Kennecott Copper)	Detector único elétrico, em linha, célula de fluxo contínuo, analisando molibdênio no concentrado de cobre
1959	Anaconda Montana (A empresa Anaconda)	Espectrômetro de pesquisa aplicada
1961	Weed Montana (A empresa Anaconda)	Primeiro projeto de analisador de fluxo para aplicação de concentrador
1962	Morenci, Arizona (Phelps Dodge Corporation)	Laboratório de pesquisa Aplicado; Fluxo único
1962	Friedensville, Pensilvânia (New Jersey Zinc Company)	Primeira instalação de sistema de fluxo de células múltiplas (Philips Norte-Americano)
1963	Ray Mines, Arizona (Kennecott Copper)	Philips Norte-Americano; Fluxo múltiplo

1963	Nchanga, Zambia (Anglo-American)	Philips Norte-Americano; Fluxo múltiplo
1963	Missão, Arizona (Asarco)	-
1964	Pyhasalmi, Finland (Outokumpu)	Philips Norte-Americano; Fluxo múltiplo
1965	Fletcher, Missouri (St. Joe Minerals)	General Electric, Fluxo único
1965	Ecstall at Timmins, Ontario (TexasGulf)	Analizador de fluxo múltiplo; Dois Sistemas (Laboratório de Pesquisa Aplicada)
1965	Nevada Mines at McGill, Nevada (Kennecott Copper)	General Electric, Fluxo único
1965	Chino Mines, New Mexico (Kennecott Copper)	Philips Norte-Americano; Fluxo múltiplo
1965	White Pine, Michigan (Intervalo de cobre)	General Electric; Heaços de analisadores múltiplos em vários locais no concentrador
1965	Frood-Stobie at Sudbury, Ontario (International Nickel)	Laboratório de Pesquisa Aplicada; Analizador de fluxo múltiplo
1965	Nittetsu, Japan (Dowa Mining)	Laboratório de Pesquisa Aplicada; Fluxo único
1966	Nova Colina Quebrada, N.S.W. Australia (Zinc Corporation)	Espectrômetro Philips adaptado à pasta fluida
1967	Harjavalta, Finland (Outokumpu)	Espectrômetro Philips modificado para monitorar o cobre no bolo do filtro molhado no tambor

1967	Padrão do Lago, Quebec (Falconbridge Nickel Mines)	Espectrômetro de laboratório de pesquisa aplicada modificado para análise on-stream
1967	Copperhill, Tennessee (Tennessee Copper)	Laboratório de pesquisa aplicada, fluxo único
1967	Palaborwa, S.Africa (Palaborwa Mining Company)	Elliott automação, fluxo múltiplo
1968	Physalmi, Finland (Outokumpu)	Protótipo do analisador de fluxo múltiplo de correio
1967	Opemiska, Quebec (Falconbridge Nickel Mines)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo único
1968	Colina do Norte Quebrada, N.S.W. Australia	Primeira instalação operacional da sonda in-stream; Eletricidade geral em cooperação com Australian A.E.C. Análise de isótopos em fluxo por absorção
1968	Tyrone, New Mexico (Phelps Dodge)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo único
1968	Ozark Lead Missouri (Kenecott Copper)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1968	Mount Isa, Australia (Mount Isa Mines)	Espectrômetro Philips adaptado à pasta fluida
1968	Twin Buttes, Arizona (The Anaconda Company)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1968	Kristeneberg, Sweden (Boliden)	Elliott automação, fluxo múltiplo
1968	Kamioka Mines, Japan (Mitsui Mining and Metals)	Espectrômetro rigaku-denki adaptado à análise de lama fluida

1968	Mattagami Lake, Quebec (Noranda)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1968	Zinc Corporation, N.S.W. Australia (Australian Mining)	Análise on-stream de isótopos, ensaios de células de fluxo
1969	Arthur and Magna, Utah (Kennecott Copper)	Laboratório de pesquisa aplicada; Unidade de fluxo múltiplo cada concentrador
1969	Coppercliff No. 2, Ontario (Niquel Internacional)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1969	Physalmi, Finland (Outokumpu)	Segundo sistema de correio protótipo; Fluxo múltiplo
1969	Lynn Lake, Manitoba (Sherritt-Gordon Mines)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1969	Flin Flon, Manitoba (Hudson Bay Mining and Smelting)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1969	Clarabelle, Ontario (Niquel Internacional)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1969	Fletcher, Missouri (St. Joe Minerals)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1969	Opemiska, Ontario (Falconbridge Nickel Mines)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo único
1969	Avoca, Ireland	Ensaio de analisador de sonda in-stream desenvolvido por U.K. Warren Springs Laboratório
1969	Manibridge, Manitoba (Falconbridge Nickel Mines)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo único
1969	Nova Colina Quebrada Consolidada, N.S.W. Australia (Zinc Corporation)	Instalação do protótipo do sistema de sondagem In-stream Amdel-Philips

1969	Cobar, Australia	Ensaio da sonda in-stream Amdel-philips que levam à aplicação de rotina
1970	Balmat, Nova York (St. Joe Minerals)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1970	Minas Peko, Território do Norte, Austrália	Amdel-philips in-stream probe analysis
1970	Gaspe, Quebec (Noranda)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1970	Keretti, Finland (Outokumpu)	Sistema de fluxo múltiplo de correio
1970	Pyhasalmi, Finland (Outokumpu)	Fluxo múltiplo de correio; Instalação da segunda unidade
1971	Lago Orchan, Quebec (Noranda)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1971	Vihanti, Finland (Outokumpu)	Sistema de fluxo múltiplo de correio
1972	Bor Mines, Iugoslávia	Elliott automação; Fluxo múltiplo
1972	Komioka, Japão (Mitsui Mining and Metals)	Rigaku-Denki; Fluxo múltiplo; Primeira série da produção
1972	Brushy Creek, Missouri (St. Joe Minerals)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1972	Kanmantoo, Austrália do Sul	Amdel-Philips sondas in- stream; Três instalados
1972	Vuonos, Finland (Outokumpu)	Fluxo múltiplo de correio; Primeira instalação de nit
1972	Monte Isa, Austrália (Mount Isa Mines)	Fluxo múltiplo de correio

1972	Lago Ruttan, Manitoba (Sherritt-Gordon Mines)	Fluxo múltiplo de correio
1972	Mt. Lyell, Tasmania	Sistema de sondagem In-stream Amdel-Philips; Dois instalados
1972	Morenci, Arizona (Phelps Dodge)	Fluxo múltiplo de correio
1973	Brunswick, Canada (Noranda)	Fluxo múltiplo de correio
1973	Magmont, Missouri (Cominco American)	Fluxo múltiplo de correio
1973	Kotalahti, Finland (Outokumpu)	Fluxo múltiplo de correio
1973	Vuonos, Finland (Outokumpu)	-
1974	Heath Steele, Nova Brunswick (Amax Chumbo e zinco)	Fluxo múltiplo de correio
1974	Pinto Valley, Arizona (Cities Service Chemicals and Metals)	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1974	Buic, Missouri (Amax Chumbo e zinco)	Fluxo múltiplo de correio
1974	Amalik, USSR	Laboratório de pesquisa aplicada; Fluxo múltiplo
1974	Kombinat GHM Polcowice Lubin, Polônia	Fluxo múltiplo de correio
1974	Sullivan, Kimberley, B.C. (Cominco)	Fluxo múltiplo de correio
1974	Chambishi, Zambia (Roan Consolidated)	Sistema de sondagem In-stream Amdel-Philips
1975	Kombinat Norilsk, USSR	Fluxo múltiplo de correio; Primeira instalação de duas unidades

1975	El Teniente, Chile (Chile Copper)	Fluxo múltiplo de correio
1975	Western Mining, Western Australia	Sistema de sondagem In-stream Amdel-Philips
1975	Metcalf, Arizona (Phelps Dodge)	Fluxo múltiplo de correio
1975	Bolaget, Sweden (Vieille Montagne)	Fluxo múltiplo de correio
1975	Kombinat Norilsk, USSR	Fluxo múltiplo de correio; Instalação da terceira unidade
1975	Avoca Mines, Ireland	Fluxo múltiplo de correio
1975	Renison, Tasmania	Sistema de sondagem In-stream Amdel-Philips
1975	North Broken Hill, N.S.W., Australia	Sistema de sondagem In-stream Amdel-Philips
1976	Sar Cheshmeh, Iran	Fluxo múltiplo de correio
1976	Baluba, Zambia (Roan Consolidated)	Fluxo múltiplo de correio
1976	Viburnum, Missouri (St. Joe Minerals)	Fluxo múltiplo de correio

Apêndice II:

Os valores de μ/ρ para vários elementos:

Fonte: (NIST, Disponível <<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>> Acessado: 8 nov. 2017)

Ferro:

Energia (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	9.085E+03	9.052E+03
1.50000E-03	3.399E+03	3.388E+03
2.00000E-03	1.626E+03	1.620E+03
3.00000E-03	5.576E+02	5.535E+02
4.00000E-03	2.567E+02	2.536E+02
5.00000E-03	1.398E+02	1.372E+02
6.00000E-03	8.484E+01	8.265E+01
7.11200E-03	5.319E+01	5.133E+01
K 7.11200E-03	4.076E+02	2.978E+02
8.00000E-03	3.056E+02	2.316E+02
1.00000E-02	1.706E+02	1.369E+02
1.50000E-02	5.708E+01	4.896E+01
2.00000E-02	2.568E+01	2.260E+01
3.00000E-02	8.176E+00	7.251E+00
4.00000E-02	3.629E+00	3.155E+00
5.00000E-02	1.958E+00	1.638E+00
6.00000E-02	1.205E+00	9.555E-01
8.00000E-02	5.952E-01	4.104E-01
1.00000E-01	3.717E-01	2.177E-01
1.50000E-01	1.964E-01	7.961E-02

2.00000E-01	1.460E-01	4.825E-02
3.00000E-01	1.099E-01	3.361E-02
4.00000E-01	9.400E-02	3.039E-02
5.00000E-01	8.414E-02	2.914E-02
6.00000E-01	7.704E-02	2.836E-02
8.00000E-01	6.699E-02	2.714E-02
1.00000E+00	5.995E-02	2.603E-02
1.25000E+00	5.350E-02	2.472E-02
1.50000E+00	4.883E-02	2.360E-02
2.00000E+00	4.265E-02	2.199E-02
3.00000E+00	3.621E-02	2.042E-02
4.00000E+00	3.312E-02	1.990E-02
5.00000E+00	3.146E-02	1.983E-02
6.00000E+00	3.057E-02	1.997E-02
8.00000E+00	2.991E-02	2.050E-02
1.00000E+01	2.994E-02	2.108E-02
1.50000E+01	3.092E-02	2.221E-02
2.00000E+01	3.224E-02	2.292E-02

Zinco:

Energia	μ/ρ	μ_{en}/ρ
(MeV)	(cm ² /g)	(cm ² /g)

1.00000E-03	1.553E+03	1.548E+03
1.00980E-03	1.518E+03	1.513E+03
1.01970E-03	1.484E+03	1.478E+03
L3 1.01970E-03	3.804E+03	3.777E+03
1.03119E-03	5.097E+03	5.057E+03
1.04280E-03	6.518E+03	6.464E+03
L2 1.04280E-03	8.274E+03	8.202E+03

	1.11565E-03	8.452E+03	8.382E+03
	1.19360E-03	7.371E+03	7.312E+03
L1	1.19360E-03	8.396E+03	8.328E+03
	1.50000E-03	4.825E+03	4.791E+03
	2.00000E-03	2.375E+03	2.359E+03
	3.00000E-03	8.311E+02	8.244E+02
	4.00000E-03	3.865E+02	3.820E+02
	5.00000E-03	2.118E+02	2.082E+02
	6.00000E-03	1.290E+02	1.261E+02
	8.00000E-03	5.875E+01	5.660E+01
	9.65860E-03	3.505E+01	3.332E+01
K	9.65860E-03	2.536E+02	1.599E+02
	1.00000E-02	2.331E+02	1.497E+02
	1.50000E-02	8.117E+01	6.099E+01
	2.00000E-02	3.719E+01	2.986E+01
	3.00000E-02	1.207E+01	1.018E+01
	4.00000E-02	5.384E+00	4.570E+00
	5.00000E-02	2.892E+00	2.419E+00
	6.00000E-02	1.760E+00	1.429E+00
	8.00000E-02	8.364E-01	6.203E-01
	1.00000E-01	4.973E-01	3.278E-01
	1.50000E-01	2.341E-01	1.128E-01
	2.00000E-01	1.617E-01	6.225E-02
	3.00000E-01	1.141E-01	3.764E-02
	4.00000E-01	9.539E-02	3.195E-02
	5.00000E-01	8.450E-02	2.979E-02
	6.00000E-01	7.695E-02	2.861E-02
	8.00000E-01	6.656E-02	2.704E-02
	1.00000E+00	5.941E-02	2.580E-02
	1.25000E+00	5.296E-02	2.443E-02
	1.50000E+00	4.834E-02	2.329E-02
	2.00000E+00	4.235E-02	2.174E-02
	3.00000E+00	3.634E-02	2.041E-02

4.00000E+00	3.360E-02	2.014E-02
5.00000E+00	3.225E-02	2.028E-02
6.00000E+00	3.160E-02	2.061E-02
8.00000E+00	3.138E-02	2.143E-02
1.00000E+01	3.175E-02	2.223E-02
1.50000E+01	3.335E-02	2.367E-02
2.00000E+01	3.509E-02	2.451E-02

Alumínio:

	Energia (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
	1.00000E-03	1.185E+03	1.183E+03
	1.50000E-03	4.022E+02	4.001E+02
	1.55960E-03	3.621E+02	3.600E+02
K	1.55960E-03	3.957E+03	3.829E+03
	2.00000E-03	2.263E+03	2.204E+03
	3.00000E-03	7.880E+02	7.732E+02
	4.00000E-03	3.605E+02	3.545E+02
	5.00000E-03	1.934E+02	1.902E+02
	6.00000E-03	1.153E+02	1.133E+02
	8.00000E-03	5.033E+01	4.918E+01
	1.00000E-02	2.623E+01	2.543E+01
	1.50000E-02	7.955E+00	7.487E+00
	2.00000E-02	3.441E+00	3.094E+00
	3.00000E-02	1.128E+00	8.778E-01
	4.00000E-02	5.685E-01	3.601E-01
	5.00000E-02	3.681E-01	1.840E-01
	6.00000E-02	2.778E-01	1.099E-01
	8.00000E-02	2.018E-01	5.511E-02
	1.00000E-01	1.704E-01	3.794E-02
	1.50000E-01	1.378E-01	2.827E-02
	2.00000E-01	1.223E-01	2.745E-02
	3.00000E-01	1.042E-01	2.816E-02
	4.00000E-01	9.276E-02	2.862E-02
	5.00000E-01	8.445E-02	2.868E-02
	6.00000E-01	7.802E-02	2.851E-02
	8.00000E-01	6.841E-02	2.778E-02
	1.00000E+00	6.146E-02	2.686E-02
	1.25000E+00	5.496E-02	2.565E-02
	1.50000E+00	5.006E-02	2.451E-02
	2.00000E+00	4.324E-02	2.266E-02

3.00000E+00	3.541E-02	2.024E-02
4.00000E+00	3.106E-02	1.882E-02
5.00000E+00	2.836E-02	1.795E-02
6.00000E+00	2.655E-02	1.739E-02
8.00000E+00	2.437E-02	1.678E-02
1.00000E+01	2.318E-02	1.650E-02
1.50000E+01	2.195E-02	1.631E-02
2.00000E+01	2.168E-02	1.633E-02

Silício

Energia (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	1.570E+03	1.567E+03
1.50000E-03	5.355E+02	5.331E+02
1.83890E-03	3.092E+02	3.070E+02
K 1.83890E-03	3.192E+03	3.059E+03
2.00000E-03	2.777E+03	2.669E+03
3.00000E-03	9.784E+02	9.516E+02
4.00000E-03	4.529E+02	4.427E+02
5.00000E-03	2.450E+02	2.400E+02
6.00000E-03	1.470E+02	1.439E+02
8.00000E-03	6.468E+01	6.313E+01
1.00000E-02	3.389E+01	3.289E+01
1.50000E-02	1.034E+01	9.794E+00
2.00000E-02	4.464E+00	4.076E+00
3.00000E-02	1.436E+00	1.164E+00
4.00000E-02	7.012E-01	4.782E-01
5.00000E-02	4.385E-01	2.430E-01
6.00000E-02	3.207E-01	1.434E-01
8.00000E-02	2.228E-01	6.896E-02
1.00000E-01	1.835E-01	4.513E-02
1.50000E-01	1.448E-01	3.086E-02
2.00000E-01	1.275E-01	2.905E-02
3.00000E-01	1.082E-01	2.932E-02
4.00000E-01	9.614E-02	2.968E-02
5.00000E-01	8.748E-02	2.971E-02
6.00000E-01	8.077E-02	2.951E-02
8.00000E-01	7.082E-02	2.875E-02
1.00000E+00	6.361E-02	2.778E-02
1.25000E+00	5.688E-02	2.652E-02
1.50000E+00	5.183E-02	2.535E-02
2.00000E+00	4.480E-02	2.345E-02
3.00000E+00	3.678E-02	2.101E-02
4.00000E+00	3.240E-02	1.963E-02

5.00000E+00	2.967E-02	1.878E-02
6.00000E+00	2.788E-02	1.827E-02
8.00000E+00	2.574E-02	1.773E-02
1.00000E+01	2.462E-02	1.753E-02
1.50000E+01	2.352E-02	1.746E-02
2.00000E+01	2.338E-02	1.757E-02

Oxigênio

Energia (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1.00000E-03	4.590E+03	4.576E+03
1.50000E-03	1.549E+03	1.545E+03
2.00000E-03	6.949E+02	6.926E+02
3.00000E-03	2.171E+02	2.158E+02
4.00000E-03	9.315E+01	9.221E+01
5.00000E-03	4.790E+01	4.715E+01
6.00000E-03	2.770E+01	2.708E+01
8.00000E-03	1.163E+01	1.116E+01
1.00000E-02	5.952E+00	5.565E+00
1.50000E-02	1.836E+00	1.545E+00
2.00000E-02	8.651E-01	6.179E-01
3.00000E-02	3.779E-01	1.729E-01
4.00000E-02	2.585E-01	7.530E-02
5.00000E-02	2.132E-01	4.414E-02
6.00000E-02	1.907E-01	3.207E-02
8.00000E-02	1.678E-01	2.468E-02
1.00000E-01	1.551E-01	2.355E-02
1.50000E-01	1.361E-01	2.506E-02
2.00000E-01	1.237E-01	2.679E-02
3.00000E-01	1.070E-01	2.877E-02
4.00000E-01	9.566E-02	2.953E-02
5.00000E-01	8.729E-02	2.971E-02
6.00000E-01	8.070E-02	2.957E-02
8.00000E-01	7.087E-02	2.887E-02
1.00000E+00	6.372E-02	2.794E-02
1.25000E+00	5.697E-02	2.669E-02
1.50000E+00	5.185E-02	2.551E-02
2.00000E+00	4.459E-02	2.350E-02
3.00000E+00	3.597E-02	2.066E-02
4.00000E+00	3.100E-02	1.882E-02
5.00000E+00	2.777E-02	1.757E-02
6.00000E+00	2.552E-02	1.668E-02
8.00000E+00	2.263E-02	1.553E-02
1.00000E+01	2.089E-02	1.483E-02
1.50000E+01	1.866E-02	1.396E-02
2.00000E+01	1.770E-02	1.360E-02

APÊNDICE II:

As configurações do *Sorter* para os testes feitos. Observe que os parâmetros do **3D**, **HSDO**, **IA**, **IP1_MACX**, **MFDIO**, **System**, e **Xsrc** não foram alterados para realizar os testes e por esse motivo eles não estão inclusos aqui.

Configurações usado nos testes do ferro e manganês:

IP2

[Cfg0_Overlap]

Enable = TRUE

OverlapX = 128

OverlapO = 256

[Cfg0_ErodeXParts]

Erode1 = -1

Erode2 = 1

Erode2Struct = "1 1 1\0D\0A1 1 1\0D\0A1 1 1\0D\0A"

LabelsConn = FALSE

[Cfg0_HgOptical]

HgRejRadius = 30

[Cfg1_FltrPart]

Enable = TRUE

Remove = TRUE

SelVal_ArrSize = 2

SelVal00_MeasPar = 35

SelVal00_RngLo = 0.000000

SelVal00_RngHi = 10.000000

SelVal00_Rng = FALSE

SelVal01_MeasPar = 16

SelVal01_RngLo = 400.000000

SelVal01_RngHi = 2000.000000

SelVal01_Rng = FALSE

[Cfg2_Xray0]

Description = "Xray 1"

RelDens0 = 180

(OBS. o parâmetro RelDens0 foi ajustado de 180 até 160 diminuindoem valor por 10 pontos a cada concentração do ferro, e o RelDens0 nos testes do manganês foi 0 por todos os testes)

RelDens1 = 220

(OBS. o parâmetro RelDens1 manteve como 220 por cada teste do ferro, e o RelDens1 nos testes do manganês varia entre 165 até 195 por todos os testes)

PercThr = 75

(OBS. O PercThr manteve de 75% por todos os testes do ferro e do manganês)

Invert = FALSE

Enable = TRUE

UsePix = FALSE

[Cfg2_Xray1]

Description = "Xray 2"

RelDens0 = 206

RelDens1 = 207

PercThr = 5

Invert = FALSE

Enable = FALSE

UsePix = TRUE

[Cfg2_Opt0]

FeatureDesc = "Optical 1"

PercThr = 75

Invert = FALSE

Enable = TRUE

UsePix = FALSE

[Cfg2_Opt1]

FeatureDesc = "Optical 2"

PercThr = 20

Invert = FALSE

Enable = TRUE

UsePix = FALSE

[Cfg2_Opt2]

FeatureDesc = ""

PercThr = 74

Invert = FALSE
Enable = FALSE
UsePix = FALSE

XDaq (Obs. XDaq ficou igual por todos os testes feitos)

[XDaq_MAX]
XDaqInf = "img0"

[XDaqCfg1_Emendation]
EmLEZero = ""
EmLEHigh = ""
EmHEZero = ""
EmHEHigh = ""

[XDaqCfg0_XRayBnds]
ImgSizeH = 512
ImgSizeW = 640
ROILeft = 0
ROIright = 319
FlipLtR = TRUE

[XDaqCfg2_AcqCtrl]
FrmStmpTO_ms = 100
GetFrmDelay_ms = 50
CorrLim_ms = 4
HistoryLen = 15

[XDaqCfg0_Network]
NM_MAC = ""
NI_IP = ""
NK_Mask = ""
NG_Gateway = ""
NP_CmdPort = 0
NA_ImgPort = 0
TP_PingInterval = 0

[XDaqCfg0_Core]
AC_StartCh = 0
AC_StopCh = 639

BS_BaseLine = 50

OC_OffsetCal = 639

GC_GainCalTrgt = 32768

CS_CalSw_Gain = TRUE

CS_CalSw_Offset = TRUE

CS_CalSw_Baseline = TRUE

LUTBgnd = 31000

GainArr = "1.451508	1.313553	1.293640	1.329910	1.278641
1.325607	1.281738	1.281647	1.317352	1.272583
1.279236	1.275116	1.271301	1.310349	1.278992
1.269424	1.272095	1.273666	1.263458	1.263702
1.262924	1.293640	1.291031	1.255814	1.251877
1.252594	1.249298	1.248718	1.246826	1.252350
1.255142	1.255417	1.301346	1.272537	1.270615
1.267075	1.263901	1.290787	1.267166	1.264633
1.285675	1.264145	1.272095	1.252731	1.244125
1.247253	1.248535	1.250961	1.249435	1.246536
1.287842	1.243790	1.285019	1.243423	1.260635
1.255753	1.273285	1.291489	1.259476	1.266479
1.265656	1.267670	1.267563	1.292511	1.193253
1.127594	1.131760	1.121872	1.120804	1.120270
1.117783	1.116486	1.114288	1.112427	1.112778
1.110092	1.111450	1.109421	1.111420	1.111984
1.113861	1.111557	1.107727	1.106979	1.108185
1.108749	1.105972	1.107880	1.104218	1.099915
1.098267	1.095657	1.095764	1.093567	1.094635
1.101730	1.039124	1.036652	1.036469	1.033813
1.038956	1.038467	1.043991	1.040970	1.042206
1.040802	1.039856	1.041595	1.042130	1.042267
1.039352	1.041168	1.044495	1.041992	1.040451
1.039551	1.039810	1.040802	1.041306	1.034561
1.036499	1.043198	1.046295	1.051697	1.050385
1.053802	1.058456	1.177551	1.050278	0.984726
1.000580	0.982254	0.980865	0.980804	0.979401
0.983276	0.984940	0.985229	0.976135	0.976486
0.973404	0.968994	0.975693	0.970581	0.981094
0.971558	0.966461	0.961517	0.954987	0.951447
0.943634	0.945786	0.943329	0.939301	0.940308
0.942474	0.940796	0.936996	0.938309	0.941284
0.936386	0.933929	0.937881	0.935791	0.937485

0.934158	0.938095	0.939575	0.932968	0.933441
0.935532	0.937164	0.941116	0.934616	0.939926
0.942413	0.947372	0.941284	0.943848	0.944214
0.948914	0.950348	0.946411	0.950348	0.953857
0.952103	0.957306	0.961441	0.962143	0.961807
0.968750	1.020172	1.179459	1.116562	1.112137
1.109573	1.112625	1.111038	1.106155	1.122253
1.110428	1.112549	1.112274	1.106018	1.110016
1.113449	1.111862	1.114014	1.114624	1.111755
1.104965	1.103439	1.105637	1.104446	1.104340
1.099182	1.093246	1.095840	1.101181	1.100998
1.101181	1.103149	1.107285	1.111145	1.111862
1.110992	1.106415	1.108261	1.108139	1.108292
1.104111	1.108261	1.109909	1.106277	1.107544
1.131439	1.109085	1.109726	1.120377	1.111115
1.125153	1.120117	1.118469	1.115921	1.118774
1.118774	1.121307	1.125183	1.125076	1.121765
1.125580	1.125885	1.125427	1.132965	1.139511
1.182358	1.376678	1.327225	1.324493	1.312759
1.302124	1.302795	1.305130	1.306381	1.300980
1.303619	1.301758	1.306015	1.302063	1.300308
1.303986	1.306641	1.307892	1.310715	1.304718
1.303055	1.310562	1.308823	1.308823	1.306122
1.302536	1.307526	1.310135	1.313232	1.305954
1.307678	1.315033	1.309448	1.339645	1.340088
1.328888	1.334473	1.333221	1.334473	1.338226
1.338226	1.342010	1.343384	1.339325	1.338120
1.346527	1.347641	1.355225	1.361130	1.359329
1.363617	1.362717	1.358475	1.357803	1.359329
1.363281	1.363174	1.366470	1.369949	1.366867
1.388824	1.394501	1.388519	1.400757	1.488632
1.607925	1.434738	1.423630	1.433472	1.419632
1.429413	1.427795	1.420486	1.434601	1.432541
1.425003	1.452026	1.437256	1.437759	1.456543
1.592834	1.447662	1.400574	1.427612	1.420731
1.439514	1.441803	1.438950	1.450104	1.449387
1.431778	1.440536	1.452148	1.450928	1.440598
1.428848	1.491211	1.638550	1.501938	1.494675
1.498093	1.480972	1.494812	1.482513	1.456741

1.479691	1.448044	1.437759	1.420792	1.417236
1.390533	1.402847	1.446442	1.571976	1.377899
1.383545	1.384949	1.391647	1.381271	1.400986
1.389114	1.375992	1.396698	1.378891	1.375870
1.384064	1.383194	1.383545	1.480362	1.311020
1.265991	1.165787	1.078888	1.109680	1.090225
1.078384	1.085495	1.092514	1.101807	1.096832
1.101624	1.093170	1.089905	1.101471	1.116333
1.209991	1.143127	1.124649	1.126236	1.131439
1.131989	1.139313	1.141418	1.144531	1.150558
1.155624	1.152664	1.170273	1.164627	1.161606
1.197174	1.229706	1.168152	1.164291	1.162552
1.154236	1.154602	1.140778	1.142410	1.137848
1.131256	1.128250	1.116837	1.118729	1.109604
1.105042	1.128799	1.238480	1.106903	1.099701
1.097900	1.098083	1.095795	1.086105	1.087692
1.082016	1.076584	1.077606	1.080978	1.086578
1.080338	1.091064	1.189438	0.932098	0.907288
0.906082	0.902512	0.904160	0.898727	0.904678
0.902267	0.901779	0.900589	0.909912	0.907990
0.913437	0.917938	0.916885	1.041931	0.945160
0.925644	0.927917	0.935638	0.927979	0.925491
0.926056	0.928574	0.928055	0.929138	0.923660
0.928558	0.929718	0.931168	0.934006	0.989059
1.057236	0.986771	0.998993	0.991791	0.990952
0.986923	0.987366	0.982071	0.969772	0.964417
0.965485	0.966141	0.959747	0.957932	0.953079
0.991165	0.962250	0.909134	0.907043	0.912933
0.900208	0.896835	0.901154	0.895813	0.896149
0.897003	0.893372	0.896942	0.901001	0.901154
0.911499	0.902588	1.160370	1.089569	1.069336
1.060486	1.055725	1.049774	1.050079	1.052582
1.055832	1.060547	1.068817	1.067764	1.073792
1.066208	1.066940	1.154205	1.257828	1.206390
1.212906	1.238068	1.222992	1.230530	1.229889
1.226105	1.229141	1.233490	1.248581	1.256104
1.251678	1.260254	1.343491	1.345200	1.178482
1.151642	1.150681	1.142609	1.131790	1.120880
1.113861	1.109726	1.108597	1.097229	1.106308
1.108597	1.112167	1.107239	1.105225	1.132935

1.190475	1.103745	1.098343	1.096680	1.090439
1.087112	1.079941	1.080795	1.077774	1.077667
1.081985	1.083023	1.087402	1.089935	1.101700
1.116608	1.488831	1.341568	1.313232	1.310242
1.308823	1.299896	1.302994	1.300980	1.302948
1.305176	1.309448	1.314072	1.315872	1.329697
1.328888	1.419632	1.492767	1.417480	1.433472
1.436737	1.453766	1.443008	1.444351	1.445236
1.456284	1.450867	1.449646	1.461151	1.464813
1.466324	1.466522	1.594849	1.462784	1.430603
1.419006	1.435806	1.423569	1.422089	1.419876
1.427292	1.403275	1.405075	1.380569	1.398956
1.381439	1.381439	1.359833	1.380692	1.622498
1.461090	1.465668	1.455048	1.448685	1.453827
1.434738	1.432541	1.428787	1.424500	1.430542
1.427979	1.420303	1.422653	1.442505	1.561859\0D\0A"

OffsetArr = "1845.695312 1841.066406 1867.027344 1857.710937 1880.417969

1874.105469	1865.191406	1884.324219	1880.402344	1904.011719
1901.128906	1882.113281	1887.683594	1888.027344	1884.558594
1854.265625	1879.246094	1892.253906	1873.078125	1881.441406
1881.628906	1886.074219	1875.597656	1886.238281	1855.812500
1854.648437	1864.910156	1876.851562	1864.601562	1880.675781
1824.046875	1880.132812	1718.667969	1802.632812	1790.746094
1828.433594	1810.781250	1849.343750	1819.363281	1845.664062
1827.695312	1853.125000	1833.230469	1841.703125	1842.339844
1847.523437	1843.914062	1856.968750	1847.394531	1852.800781
1851.031250	1859.890625	1838.832031	1855.621094	1853.808594
1846.855469	1857.347656	1857.367187	1846.128906	1845.250000
1839.101562	1840.605469	1836.390625	1820.082031	2057.558594
2088.738281	2076.664062	2085.515625	2075.613281	2098.687500
2063.078125	2078.609375	2088.437500	2067.632812	2107.449219
2100.113281	2078.273437	2085.234375	2087.820312	2120.863281
2090.597656	2083.839844	2075.054687	2085.160156	2056.390625
2098.851562	2051.007812	2073.558594	2068.609375	2090.078125
2067.015625	2090.289062	2067.796875	2078.542969	2047.894531
2102.289062	2001.683594	2034.136719	2007.101562	2029.992187
2046.976562	2043.746094	2012.902344	2037.613281	2025.296875
2029.390625	2023.851562	2032.867187	2048.156250	2043.746094
2013.578125	2037.617187	2045.054687	2062.636719	2033.593750

2051.710937	2035.652344	2041.285156	2064.515625	2034.707031
2027.980469	2030.390625	2020.046875	2044.890625	2023.914062
2059.023437	2035.949219	2012.617187	1607.578125	1619.781250
1633.238281	1622.375000	1631.535156	1623.250000	1627.066406
1662.652344	1629.117187	1650.332031	1656.863281	1646.460937
1635.753906	1620.898437	1651.175781	1617.730469	1674.312500
1644.156250	1649.027344	1662.210937	1626.925781	1635.136719
1637.183594	1645.675781	1620.113281	1657.125000	1615.015625
1632.898437	1622.414062	1632.269531	1633.914062	1600.457031
1636.121094	1706.464844	1677.863281	1737.078125	1692.460937
1725.511719	1689.531250	1761.621094	1709.425781	1699.722656
1713.320312	1720.457031	1699.000000	1725.992187	1722.457031
1714.488281	1722.445312	1729.917969	1725.343750	1729.058594
1709.621094	1718.425781	1731.218750	1746.312500	1717.238281
1711.480469	1725.000000	1726.238281	1723.371094	1737.636719
1717.335937	1730.093750	1579.019531	1592.496094	1607.519531
1623.308594	1603.597656	1602.433594	1613.636719	1594.828125
1586.652344	1594.226562	1600.039062	1583.425781	1631.207031
1603.453125	1596.343750	1603.394531	1582.285156	1589.859375
1598.917969	1590.199219	1588.515625	1611.460937	1592.835937
1596.859375	1584.378906	1584.101562	1590.554687	1583.937500
1581.484375	1594.140625	1563.503906	1583.734375	1661.402344
1628.398437	1644.156250	1697.933594	1650.371094	1674.433594
1638.656250	1675.203125	1642.179687	1663.785156	1656.878906
1644.636719	1655.062500	1661.308594	1647.328125	1653.742187
1641.890625	1665.542969	1635.187500	1679.113281	1667.367187
1678.800781	1672.960937	1680.683594	1667.281250	1662.257812
1624.015625	1669.867187	1645.953125	1669.781250	1637.160156
1663.417969	1628.261719	1635.742187	1634.660156	1633.214844
1656.656250	1651.015625	1649.089844	1684.757812	1652.937500
1658.523437	1641.031250	1654.023437	1655.699219	1664.863281
1664.140625	1672.511719	1637.781250	1649.625000	1648.378906
1667.765625	1638.574219	1667.144531	1638.628906	1640.105469
1651.167969	1651.035156	1606.808594	1654.585937	1648.691406
1650.945312	1591.281250	1649.410156	1601.164062	1647.554687
1605.843750	1628.589844	1617.234375	1653.878906	1627.476562
1635.933594	1626.074219	1617.601562	1643.996094	1630.417969
1612.230469	1646.035156	1614.609375	1640.882812	1601.300781
1609.972656	1619.988281	1648.218750	1616.234375	1617.472656
1625.644531	1624.585937	1622.136719	1621.902344	1611.281250

1596.429687	1586.671875	1627.937500	1606.921875	1621.246094
2064.898437	2055.117187	2071.593750	2070.429687	2072.656250
2076.886719	2062.175781	2065.625000	2050.589844	2067.812500
2073.593750	2055.597656	2070.304687	2053.417969	2071.402344
2066.753906	2080.105469	2068.132812	2079.531250	2059.906250
2084.437500	2085.214844	2058.441406	2080.070312	2072.175781
2066.648437	2072.996094	2072.457031	2065.503906	2078.039062
2069.066406	2073.457031	2011.695312	1999.562500	1994.437500
2008.105469	1992.804687	2007.621094	2001.441406	1992.664062
2003.839844	2002.351562	2005.332031	2006.949219	2004.804687
1991.652344	1977.726562	1993.039062	2005.398437	2005.777344
1992.824219	2000.113281	1982.855469	1989.718750	1983.453125
2006.105469	1986.480469	2007.519531	1992.660156	1984.046875
1991.343750	2001.277344	2000.070312	1997.035156	2089.851562
2074.183594	2072.316406	2110.289062	2095.785156	2078.046875
2096.242187	2071.257812	2135.671875	2097.812500	2104.023437
2092.367187	2105.851562	2088.621094	2108.414062	2057.285156
2081.824219	2081.101562	2091.222656	2114.585937	2108.949219
2098.167969	2081.246094	2060.093750	2076.703125	2079.980469
2122.210937	2094.652344	2110.511719	2086.324219	2089.898437
2120.750000	2203.449219	2216.121094	2227.281250	2169.925781
2222.789062	2252.246094	2212.968750	2223.488281	2208.625000
2216.101562	2231.285156	2212.679687	2206.105469	2179.824219
2200.683594	2221.000000	2209.937500	2237.035156	2220.062500
2209.136719	2234.593750	2226.617187	2227.574219	2200.812500
2232.304687	2230.667969	2203.980469	2204.035156	2236.062500
2214.464844	2212.632812	2193.300781	1866.515625	1830.902344
1831.121094	1848.097656	1836.035156	1862.449219	1828.820312
1859.968750	1843.546875	1839.707031	1818.652344	1853.281250
1841.488281	1855.128906	1862.484375	1857.398437	1851.863281
1855.574219	1857.722656	1832.792969	1887.734375	1830.812500
1868.152344	1864.093750	1829.378906	1854.101562	1849.113281
1844.472656	1859.082031	1824.015625	1871.765625	1843.964844
1748.945312	1762.257812	1784.679687	1785.539062	1772.683594
1765.933594	1767.304687	1748.425781	1765.804687	1768.445312
1757.121094	1758.574219	1768.937500	1751.667969	1771.722656
1766.296875	1768.226562	1787.121094	1759.570312	1749.156250
1783.304687	1756.914062	1755.250000	1774.808594	1777.757812
1776.445312	1764.496094	1757.808594	1754.148437	1779.500000

1783.621094	1751.589844	1798.832031	1773.742187	1780.921875
1775.921875	1806.671875	1765.250000	1801.062500	1789.691406
1783.593750	1791.851562	1792.101562	1798.609375	1783.980469
1810.328125	1780.296875	1787.601562	1776.257812	1807.226562
1781.332031	1778.835937	1793.070312	1769.546875	1784.273437
1786.257812	1789.777344	1779.285156	1752.613281	1754.640625
1796.070312	1760.238281	1797.750000	1771.429687	1789.738281
1820.941406	1814.347656	1795.964844	1786.308594	1803.097656
1789.285156	1776.964844	1799.363281	1805.542969	1808.519531
1800.832031	1790.796875	1800.035156	1787.210937	1789.769531
1814.550781	1798.699219	1809.644531	1798.503906	1823.347656
1780.425781	1798.542969	1805.132812	1821.546875	1785.949219
1818.460937	1788.234375	1791.476562	1804.792969	1793.964844
1802.472656	1772.265625	1764.140625	1759.449219	1763.289062
1752.800781	1761.992187	1756.988281	1764.433594	1785.351562
1793.316406	1760.996094	1754.035156	1760.097656	1776.468750
1789.804687	1752.816406	1776.578125	1739.613281	1734.101562
1745.507812	1731.015625	1757.027344	1782.503906	1755.691406
1763.656250	1752.667969	1761.464844	1759.414062	1762.203125
1757.683594	1748.750000	1790.535156	1635.753906	1634.726562
1609.492187	1611.121094	1631.378906	1628.511719	1638.472656
1628.007812	1641.183594	1642.300781	1629.015625	1637.070312
1619.312500	1624.300781	1643.445312	1618.769531	1625.765625
1614.066406	1615.085937	1643.828125	1634.937500	1614.292969
1612.425781	1626.062500	1629.378906	1595.839844	1627.589844
1650.773437	1632.390625	1651.484375	1638.277344	1619.929687\0D\0A"

[XDaqCfg0_FrmOut]

SI_Port = 0

ST_IntTime = 1000

EL_ExtLineTrigMode = 0

SB_OutputScalingBits = 0

SS_SensLev_Hi = 13

SS_SensLev_Lo = 12

AF_AvgFilter = 0

SU_SumLine = 0

EM_EnergyMode = 2

CN_VCh1 = 2

CN_VCh2 = 3

CN_VCh3 = 0

CN_VCh4 = 0
FI_FPGAVer = "rev.1 build 2"
TR_Temp = 13
ED_Enable = 0
ED_Mode = 0

[XDaqCfg0_RI]
RI0_SN = "CHH28G1370510013"
R1_Type = 1
R1_ModuleName = "X-DAQ-Lab"
RI2_PixNum = 640
RI2_PixSize = 150
RI2_ImgPort = 0
RI3_MinIntTime = 250
RI3_MaxIntTime = 10000
RI5_PixPerBoard = 64

MCU_FrmVer = 4

Xray_Analysis

[Set_01]
R_HE(LE)_Coeffs = "500.0000000000000000 0.284802311458758 0.000010079243563
0.0000000000000000 0.0000000000000000"
RightPX = FALSE
R_HE(LE)_Degree = 2
S_(HE,LE)_Coeffs = "0.000000000021230 0.000582028460587 0.000747063149242
0.000001585655822 0.000001126313899 0.000000558082517
0.0000000000000000"

[Set_00]
R_HE(LE)_Coeffs = "500.000233716907644 0.437521214645024
0.000010144806273"
RightPX = TRUE
R_HE(LE)_Degree = 2
S_(HE,LE)_Coeffs = "0.000000000021230 0.000382028460587 0.000747063149242
0.000001585655822 0.000001126313899 0.000000558082517
0.0000000000000000"

[SuperConfig]
LE_Bcg = 1200.000000

HE_Limit = 27000

HELE_Ratio_Lo = 60000

HELE_Ratio_Hi = 65000

Configurações usado nos testes do zinco:

IP2

[Cfg0_Overlap]

Enable = TRUE

OverlapX = 128

OverlapO = 256

[Cfg0_ErodeXParts]

Erode1 = -1

Erode2 = 1

Erode2Struct = "1 1 1\0D\0A1 1 1\0D\0A1 1 1\0D\0A"

LabelsConn = FALSE

[Cfg0_HgOptical]

HgRejRadius = 30

[Cfg1_FltrPart]

Enable = TRUE

Remove = TRUE

SelVal_ArrSize = 2

SelVal00_MeasPar = 35

SelVal00_RngLo = 0.000000

SelVal00_RngHi = 10.000000

SelVal00_Rng = FALSE

SelVal01_MeasPar = 16

SelVal01_RngLo = 400.000000

SelVal01_RngHi = 2000.000000

SelVal01_Rng = FALSE

[Cfg2_Xray0]

Description = "Xray 1"

RelDens0 = 0

RelDens1 = 100

(OBS. Os valores do RelDens1 foram 100 para os testes da granulometria -50+19mm e 150 na granulometria -25+8mm)

PercThr = 75

Invert = FALSE
Enable = TRUE
UsePix = FALSE

[Cfg2_Xray1]
Description = "Xray 2"
RelDens0 = 206
RelDens1 = 207
PercThr = 5
Invert = FALSE
Enable = FALSE
UsePix = TRUE

[Cfg2_Opt0]
FeatureDesc = "Optical 1"
PercThr = 75
Invert = FALSE
Enable = FALSE
UsePix = FALSE

[Cfg2_Opt1]
FeatureDesc = "Optical 2"
PercThr = 20
Invert = FALSE
Enable = FALSE
UsePix = FALSE

[Cfg2_Opt2]
FeatureDesc = ""
PercThr = 74
Invert = FALSE
Enable = FALSE
UsePix = FALSE

Xray_Analysis

[Set_01]
R_HE(LE)_Coeffs = "500.00000000000000 0.284802311458758 0.000010079243563
0.000000000000000 0.000000000000000"
RightPX = FALSE

R_HE(LE)_Degree = 2
S_(HE,LE)_Coeffs = "0.00000000021230 0.000582028460587 0.000747063149242
0.000001585655822 0.000001126313899 0.000000558082517
0.0000000000000000"

[Set_00]

R_HE(LE)_Coeffs = "500.000233716907644 0.437521214645024
0.000010144806273"

RightPX = TRUE

R_HE(LE)_Degree = 2

S_(HE,LE)_Coeffs = "0.00000000021230 0.000382028460587 0.000747063149242
0.000001585655822 0.000001126313899 0.000000558082517
0.0000000000000000"

[SuperConfig]

LE_Bcg = 1200.000000

HE_Limit = 32000

HELE_Ratio_Lo = 60000

HELE_Ratio_Hi = 65000