



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



APLICABILIDADE DO SENSOR BASED SORTING PARA MINÉRIO DE FERRO NO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO

LUCAS BARRETO NAPOLI

Orientador: Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves

OURO PRETO
2021

LUCAS BARRETO NAPOLI

APLICABILIDADE DO SENSOR BASED SORTING PARA MINÉRIO DE FERRO NO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia de
Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N216a Napoli, Lucas Barreto.

Aplicabilidade do Sensor Based Sorting para minério de ferro no
Quadrilátero Ferrífero. [manuscrito] / Lucas Barreto Napoli. - 2022.
46 f.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minérios de ferro. 2. Quadrilátero Ferrífero (MG). 3. Beneficiamento
de minério. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II. Universidade Federal de
Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.7:622.341

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos sete dias do mês de janeiro de 2022, às 15h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Lucas Barreto Napoli**, matrícula 16.2.1404, intitulado: **“AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO SISTEMA BASED SORTER PARA MINÉRIO DE FERRO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO”**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves, PhD. Priscila Maria Esteves Brandão e M.Sc. Evandro Costa e Silva. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a PhD. Priscila Maria Esteves Brandão, segundo o M.Sc. Evandro Costa e Silva em último, o Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 9,5. O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 (quinze) dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. Ouro Preto, 07 de dezembro de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

Membro: PhD. Priscila Maria Esteves Brandão

Membro: M.Sc. Evandro Costa e Silva

Discente: Lucas Barreto Napoli

Dedico meus agradecimentos para meus familiares, amigos e colegas de trabalho, por todo apoio e suporte. Agradeço também à UFOP, aos meus professores e à gloriosa Escola de Minas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Cristiane Saúde Barreto Napoli, e ao meu pai, Mark Napoli Costa, que sempre me deram apoio, força e ensinamento. Seja de forma direta ou indireta, estando perto ou à distância, contribuindo para a minha formação desde sempre e para sempre!

Aos meus amigos e familiares, que me receberam de braços abertos, em todo os momentos, nessas idas e vindas entre Ouro Preto e Belo Horizonte. Principalmente, pela compreensão, apoio e motivação constante em toda minha jornada!

Aos colegas de Steinert Latinoamericana, principalmente à Head of the Lab Dra. Priscila Esteves e ao diretor Vinicius Souto, que confiaram em mim, na minha capacidade de trabalho e possibilitaram a execução desta monografia.

Aos meus professores, que compartilharam de forma exemplar seus ensinamentos, experiências e conhecimento. Em especial ao professor Dr. Vladimir Kronemberger Alves, meu orientador deste TCC e ao professor Carlos Arroyo que me auxiliou com a iniciação científica, além de possibilitar meu curso realizado em Santiago – Chile.

Por fim, agradeço à cidade histórica de Ouro Preto e a Belo horizonte, à Universidade Federal de Ouro Preto e à gloriosa Escola de Minas!

RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero tem uma importância inegável, não só para o estado de Minas Gerais, mas para o Brasil. Sabe-se da existência de diversos elementos presentes nesta província geológica como manganês, ouro e, principalmente, ferro. Porém, acontecimentos recentes envolvendo rompimento de barragens trouxeram a necessidade de se repensar a forma como a mineração vem sendo executada na região. Além disso, é sabido que existe uma redução nos teores do minério de ferro extraído do Quadrilátero Ferrífero, ocorre uma flutuação de preços desse minério e que as suas especificações comerciais estão ficando cada vez mais difíceis de serem atingidas. Nesse contexto, surge à tona a aplicação de equipamentos de tecnologia digital, visando fornecer soluções sustentáveis para o processamento mineral. Assim, este trabalho tem como finalidade apresentar e avaliar a tecnologia *Sensor Based Sorting* (SBS) para minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Com isso, foi escolhida a metodologia *Rock by Rock* para testar as 60 amostras selecionadas. Além disso, foram criadas/testadas duas curvas de separabilidade. No final do teste, foram simulados três cenários visando uma provável aplicação real desta tecnologia de separação por sensores para minério de ferro.

Palavras-chave: KSS XT CLI, Minério de Ferro, Quadrilátero Ferrífero, *Rock by Rock*, *Sensor Based Sorting*.

ABSTRACT

The Iron Quadrangle has an undeniable importance, not only for the state of Minas Gerais, but also for Brazil. The existence of several elements such as manganese, gold and, mainly, iron, in this geological province is well known. However, after recent events involving the breaking of dams, there has been a need to rethink the way mining has been carried out in the region. In addition, it is known that there has been a reduction in the levels of iron ore extracted from the Iron Quadrangle, there is a fluctuation in the prices of this ore and that its commercial specifications are becoming increasingly difficult to be met. In this context, the application of equipment using digital technology has emerged, providing sustainable solutions for mineral processing. Thus, this work presents and evaluate Sensor Based Sorting (SBS) technology for iron ore from the Iron Quadrangle. With that, the Rock by Rock methodology was chosen to test how 60 chosen. In addition, two separability curves were raised / tested. At the end of the test, three scenarios were simulated in order to obtain possible results for a probable real application of the Sensor Based Sorting technology for iron ore.

Keywords: KSS XT CLI, Iron Ore, Iron Quadrangle, *Rock by Rock*, *Sensor Based Sorting*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico simplificado da Província do Quadrilátero Ferrífero.	11
Figura 2: O Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Geologia simplificada	13
Figura 3: Distribuição dos elementos químicos na crosta terrestre	13
Figura 4: Desenho teórico de um KSS XT CLI.	15
Figura 5: Exemplo esquemático de um KSS XT CLI	16
Figura 6: Exemplo esquemático de um equipamento capaz de realizar a tecnologia SBS.	16
Figura 7: Desenho esquemático sensor de cor	18
Figura 8: Exemplo de resposta do sensor Laser 3D para algumas partículas.	18
Figura 9: Geração de imagens tridimensionais através de triangulação de Laser. ...	19
Figura 10: Exemplo esquemático do sensor indutivo ARGOS.	20
Figura 11: Comparativo entre um sensor convencional e um sensor ARGOS.	20
Figura 12: Esquema de um sensor de transmissão de raios-x por energia dual.	21
Figura 13: ? Diagrama de energia dual para Raio-X de transmissão	22
Figura 14: Procedimento da metodologia de teste <i>Feasibility Test</i>	25
Figura 15: Exemplo de amostras de calibração	26
Figura 16: Procedimento da metodologia “ <i>Bulk Test</i> ”	26
Figura 17: Metodologia “ <i>Step</i> ”	27
Figura 18: Procedimento da metodologia de teste “ <i>Rock by Rock</i> ”	28
Figura 19: Amostras e 1 a 20	29
Figura 20: Amostras e 21 a 40	29
Figura 21: Amostras e 41 a 60	30
Figura 22: Resultados entre a análise química e algumas das respostas dos sensores	31
Figura 23: Resposta das 60 amostras ao Sensor de Cor	32
Figura 24: Resposta das 60 amostras ao Sensor Laser 3D	33
Figura 25: Resposta das 60 amostras ao Sensor ARGOS	33
Figura 26: Resposta das 60 amostras ao Sensor XRT	34
Figura 27: Curva de baixa densidade	35
Figura 28: Curva de alta densidade	35
Figura 29: Resultados das curvas de baixa e alta densidade	36
Figura 30: Aplicação da configuração da curva de baixa densidade	36

Figura 31: Teor médio de Fe por litologia.....	37
Figura 32: Teor médio de SiO ₂ por litologia	37
Figura 33: Distribuição do teor de Fe (%).....	38
Figura 34: Relação Ejeção Mássica, MD e Caso Amostra 1	39
Figura 35: Relação Ejeção Mássica, MD e Cenário 1	39
Figura 36: Recuperação mássica para os 3 casos do Cenário 1	40
Figura 37: Relação Ejeção Mássica, MD e Cenário 2	41
Figura 38: Recuperação mássica para os 3 casos do Cenário 2	41
Figura 39: Relação Ejeção Mássica, MD e Cenário 2	42
Figura 40: Recuperação mássica para os 3 casos do Cenário 3	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição das 60 amostras.	29
Tabela 2: Exemplo de alguns resultados obtidos dos ensaios destrutivos.	30
Tabela 3: Distribuição das litologias para o Cenário 1	39
Tabela 4: Distribuição das litologias para o Cenário 2	40
Tabela 5: Distribuição das litologias para o Cenário 2	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. OBJETIVO GERAL	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1. QUADRILÁTERO FERRÍFERO	11
3.2. MINÉRIO DE FERRO	13
3.3. TECNOLOGIA <i>SENSOR BASED SORTING</i> E A MINERAÇÃO	14
3.4. EQUIPAMENTO KSS XT CLI	15
3.4.1. SENSOR COR	17
3.4.2. SENSOR LASER 3D	18
3.4.3. SENSOR INDUTIVO ARGOS	19
3.4.4. SENSOR RAIO-X DE TRANSMISSÃO	21
3.5. GUIA E TIPOS DE TESTE PARA ORE SORTING	23
3.3.1. <i>ROCK BY ROCK</i>	24
3.3.2. <i>FEASIBILITY TEST</i>	24
3.3.3. <i>BULK TEST</i>	26
4. METODOLOGIA	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. RESPOSTA DOS SENSORES AOS SCANS	31
5.2. CURVAS DE ALTA E DE BAIXA DENSIDADE	35
5.3. GRÁFICOS	36
5.4. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	38
6. CONCLUSÕES	42
7. REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

FARINA (et al.,2016) diz que o Quadrilátero Ferrífero é uma importante província metalogenética, conhecida mundialmente por conter elementos como ferro, ouro e manganês, etc. localizada na porção mais meridional do Cráton de São Francisco, em Minas Gerais, Brasil. Para ROESER *et al.*, 2010, o estado de Minas Gerais cujo sinônimo informal pode ser: “algo de cada”, faz toda a honra ao seu nome como um paraíso mineralógico e isto se aplica ao Quadrilátero Ferrífero.

É inegável a importância desta região, não só para Minas Gerais, mas também para o Brasil. Principalmente quando estamos tratando da exploração e exploração do minério de ferro. Porém, segundo SOUTO (et al.,2020) as recentes tragédias causadas pelo rompimento das barragens de rejeitos de Mariana em 2015 e de Brumadinho em 2019 trouxeram à tona a necessidade urgente de repensar o setor mineral. Para dar continuidade às suas atividades, é fundamental a promoção de uma mineração mais responsável, com foco na sustentabilidade, na preservação e recuperação do meio ambiente. Além disso, sabe-se que existe uma redução nos teores do minério de ferro extraído do Quadrilátero Ferrífero, ocorre uma flutuação de preços desse minério e que as suas especificações comerciais estão ficando cada vez mais difíceis de serem atingidas.

Com isso, é preciso mitigar tais problemas e cenários. Segundo ESTEVES (et al., 2020) existe uma crescente necessidade na indústria da mineração para a aplicação de equipamentos de tecnologia digital, visando fornecer soluções sustentáveis para o processamento mineral. Nesse contexto, a aplicação de classificação baseada em sensores *Sensor Based Sorting* (SBS) evoluiu significativamente nos últimos anos.

Dessa forma, a aplicação desta tecnologia torna-se uma possível solução para as questões citadas acima. Isso pois, destaca-se que esse tipo de tecnologia pode promover a redução da necessidade/volume de barragens de rejeitos, devido o descarte dos materiais de baixo teor ainda em granulometria grosseira e a umidade natural, ou seja, um pré-processamento e enriquecimento da alimentação com esse descarte.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

- Avaliar a aplicação e utilidade do SBS para amostras que possuem diversas litologias provindas de uma jazida de minério de ferro ao norte do Quadrilátero Ferrífero (especificamente, nos arredores da borda leste da Serra do Espinhaço).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar e identificar as litologias de 60 amostras coletadas.
- Realizar o Teste *Rock by Rock* no KSS XT CLI para as amostras selecionadas;
- Verificar as respostas das 60 amostras para os sensores presentes no equipamento KSS XT CLI.
- Elaborar, utilizar e comparar uma curva de baixa densidade e alta densidade, para aplicar nas amostras em questão;
- Apresentar e analisar os resultados da análise química para as 60 amostras.
- Avaliar três cenários simulando possíveis realidades de teores de minérios de ferro distintos.

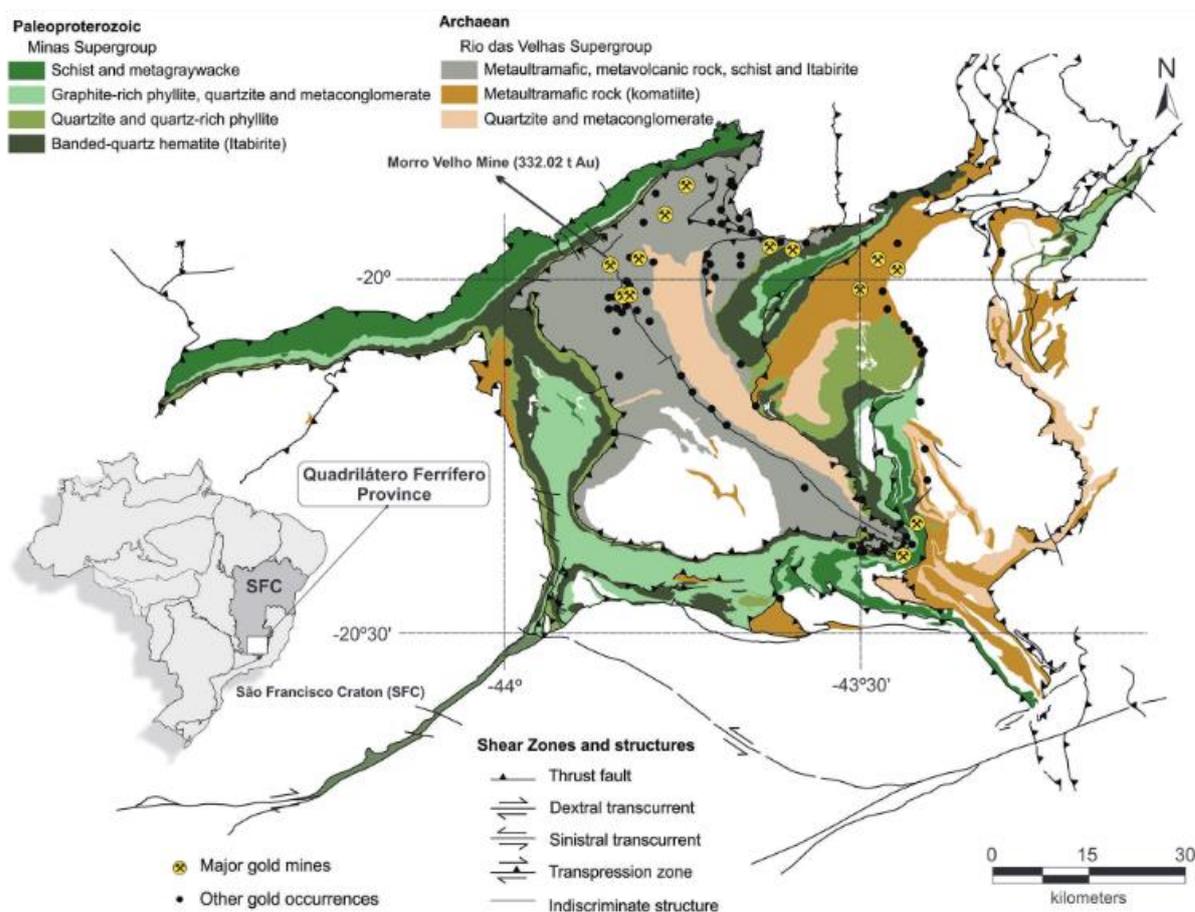
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma breve revisão da literatura que servirá de base para a execução deste trabalho, abordando os seguintes tópicos: minério de ferro, o Quadrilátero Ferrífero (QF), o equipamento KSS XT CLI, os tipos e o guia dos testes executados pela STL. Importa ressaltar que a empresa Steinert Latinoamericana (STL) autorizou a utilização dos dados abordados neste trabalho.

3.1. QUADRILÁTERO FERRÍFERO

ROESER (*et al.*, 2010) relata que o Quadrilátero Ferrífero é uma estrutura geológica cuja forma se assimila a um quadrado, e se estende por uma área entorno de 7000 km², Minas Gerais - Brasil (figura 1). Roeser ainda complementa dizendo que é a continuação sul da Serra do Espinhaço de idade arqueana (> 2.7 bilhões de anos).

Figura 1: Mapa geológico simplificado da Província do Quadrilátero Ferrífero



FONTE: COSTA *et al.*, Journal of the Geological Survey of Brazil vol. 2, 2019 adaptado.

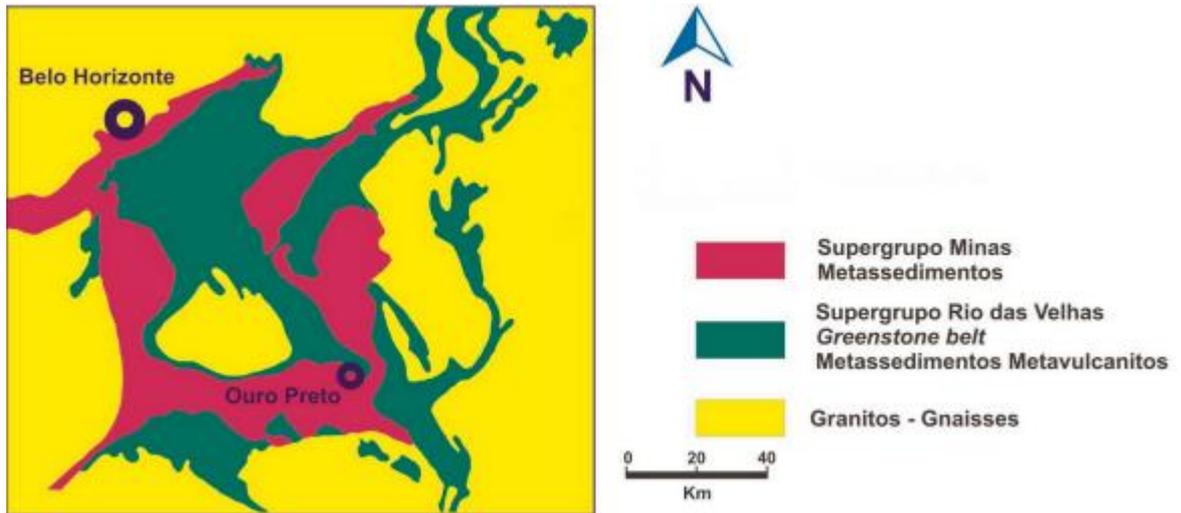
De acordo com COSTA (et al.,2019), o QF é uma província metalogenética muito importante e que está localizado no Cráton do São Francisco.

Para DORR (1969), depósitos hematíticos de altos teores do Quadrilátero Ferrífero se resume ao Supergrupo Minas, basicamente formado pelos grupos Itabira, pela formação Sabará, Piracicaba e Caraça, sequencialmente metamorfizados. Porém, é necessário abordar a divisão feita por DORR (1969), em que as rochas da região, de origem Pré-Cambriana, foram separadas em 3 Supergrupos às quais estão subdivididas em grupos e em unidades menores, como: Série Rio Das Velhas; Série Minas; e a Série Itacolomi.

Em resumo, a figura 2 apresenta, segundo ROESER (et al.,2010) os três grupos principais do QF:

- Supergrupo Rio das Velhas: formado por metassedimentos vulcanoclásticos, químicos e pelíticos, encontra-se discordante acima do embasamento e é considerado um cinturão de rochas verdes – *greenstone belt*. Destaca-se as jazidas de ouro em sua paragênese clássica de sulfetos.
- O supergrupo Minas: composto principalmente de metassedimentos pelíticos e quartzosos e coloca-se discordante acima do cinturão verde Rio das Velhas. O grupo mais relevante é o de Itabira (termos econômicos), pois nele consta os itabiritos (minério de ferro), internacionalmente conhecidos como banded Iron Formations (BIF's), minérios bandeados.
- O grupo Itacolomy é basicamente composto de quartzitos.

Figura 2: O Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Geologia simplificada

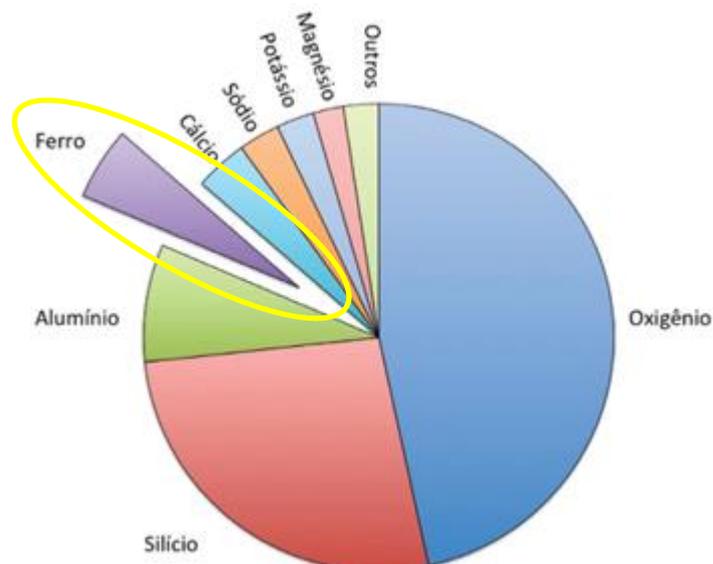


FONTE: ROESER, *et al.* (2010); DORR (1969)

3.2. MINÉRIO DE FERRO

O elemento ferro é um dos oito elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre, com cerca de 5% em massa (DUARTE, 2020) como é mostrado no gráfico 3. O autor também cita que o Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo, juntamente com China e Austrália.

Figura 3: Distribuição dos elementos químicos na crosta terrestre



FONTE: DUARTE, Hélio A, 2020, adaptado.

Na natureza, o ferro se encontra, principalmente, na forma de óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos em geral, na forma cristalina (DUARTE, 2020). Seus principais minerais e seus respectivos teores são: Magnetita (Fe_3O_4 ; 72,4%), Hematita (Fe_2O_3 ; 69,9%), Goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 62,9%), Limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; 59,8%), Ilmenita (FeTiO_3 ; 36,8%), Siderita (FeCO_3 ; 48,2%), Pirita (FeS_2 ; 46,5%), Pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$; 61,0%) (CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de *et al.* Minério de ferro, 2014).

Além disso, Carvalho (*et al.*, 2014) ainda complementa que, geologicamente os depósitos de minério de ferro podem ser divididos em sedimentares acamadados, formados por soluções hidrotermais, relacionados a atividades vulcânicas, à processos de metamorfismo e/ou deformação, e resultantes de alteração e acúmulo na superfície terrestre; enfatizando os depósitos sedimentares acamadados por constituírem os depósitos das formações ferríferas bandadas.

No Brasil, mais especificamente no QF, o minério de ferro explorado e explotado pode ser apresentado e classificado por: minério itabirítico – determinado pela variação entre bandas constituídas de óxidos de ferro e bandas constituídas de sílica; minério hematítico – mais homogêneos, constituídos basicamente de hematita (mais ricos em ferro); e a canga – um minério secundário, composto de brecha de hematita cimentada por limonita. (CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de *et al.* Minério de ferro, 2014).

3.3. TECNOLOGIA *SENSOR BASED SORTING* E A MINERAÇÃO

Segundo WOTRUBA (*et al.*, 2019), a terminologia SBS é um termo abrangente para todas as aplicações em que as partículas analisadas são singularmente detectadas por um sensor e, em seguida, rejeitado (dependendo do critério de separabilidade) por uma separação mecânica, seja ela hidráulica ou processo pneumático. O autor ainda complementa dizendo que o SBS é baseado em sensores que inspecionam partículas individuais para determinar o valor de alguma propriedade analisada, usando medições sem contato e em tempo real que obtêm tanto a localização (para controlar a última ejeção do processo) quanto as características do material. LESSARD (*et al.*, 2016) aborda a separação de minério por sensores como uma tecnologia que oferece efeitos positivos significativos. Tem o potencial de gerar uma mudança radical na forma como os novos recursos e as minas existentes são

avaliados para desenvolvimento futuro. Considerando a forma com que os projetos de mineração são comercializados e como os circuitos são projetados e operados. De acordo com ESTEVES (*et al.*, 2020), ao rejeitar precocemente a ganga em frações de tamanhos mais grosseiros, a aplicação da tecnologia permite a redução dos custos de processamento, aumento da produtividade da planta e pode reduzir os impactos ambientais. Nesse sentido, a tecnologia tem se mostrado capaz de gerar mudanças com expressivos ganhos de custo e sustentabilidade. É possível aplicar a tecnologia SBS em diferentes posições no fluxograma de beneficiamento e com múltiplos objetivos, como pré-concentração, rejeição precoce de ganga, criação de produto e desvio de minério.

3.4. EQUIPAMENTO KSS XT CLI

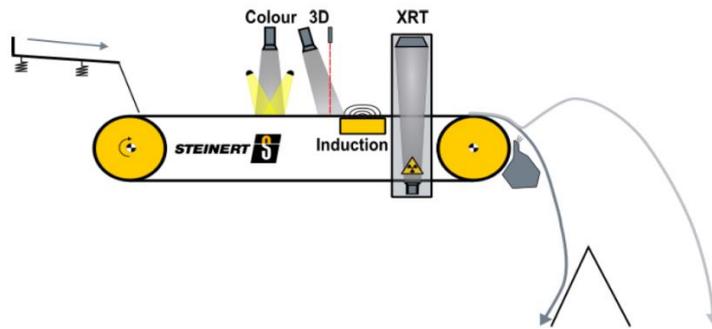
O equipamento KSS XT CLI é apresentado nas figuras 4 e 5. Equipamento utilizado como uma das opções oferecidas pela Steinert para a realização da tecnologia SBS. Tal máquina contém quatro sensores: cor (*colour*), 3D Laser, indução ARGOS (*induction*) e Raios-X de Transmissão (XRT).

Figura 4: Desenho teórico de um KSS XT CLI



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020.

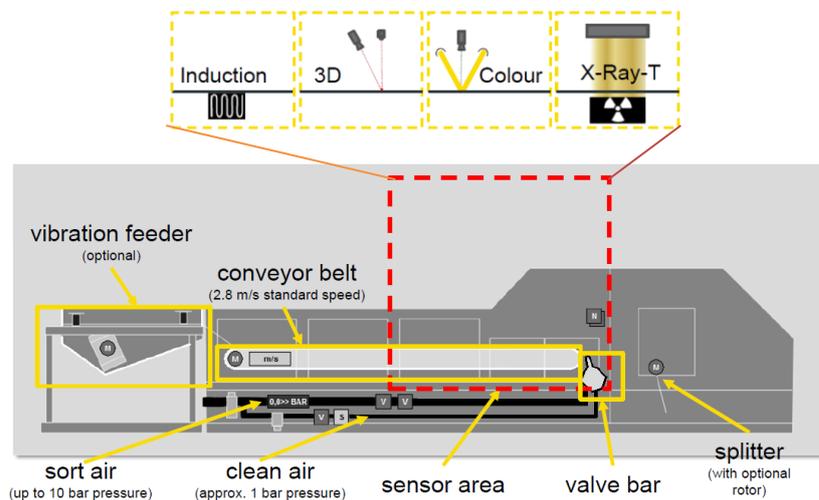
Figura 5: Exemplo esquemático de um KSS XT CLI



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020.

A tecnologia SBS, também pode ser chamada de sistema de separação por sensores, possui (figura 6): uma calha vibratória (*vibration feeder* – opcional), correia transportadora (*conveyor belt* – velocidade operacional padrão de 2,8 m/s), barra de válvulas (*valve bar*), divisor (*splitter* – com um rotor opcional), área onde se encontram os sensores (*sensor área*), ar classificador (*sort air* – até 10bar de pressão) e ar limpo (*clean air* – aproximadamente 1bar de pressão).

Figura 6: Exemplo esquemático de um equipamento capaz de realizar a tecnologia SBS



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

Segundo ESTEVES (*et al.*, 2020) a figura acima exemplifica um processo de separação pneumática que utiliza uma barra de válvula que concede a ejeção precisa de partículas individuais. Dessa forma, as amostras em questão são alimentadas em

uma calha vibratória, para que se forme uma monocamada de partículas. O objetivo é fazer com que não ocorra uma sobreposição de partículas. Assim, os sensores possuem plena capacidade para exercer as devidas leituras nas partículas e ejetá-las precisamente. O divisor regulável, à direita, garante a separação das partículas que caem diretamente por gravidade e as que são ejetadas pelos jatos de ar da barra da válvula.

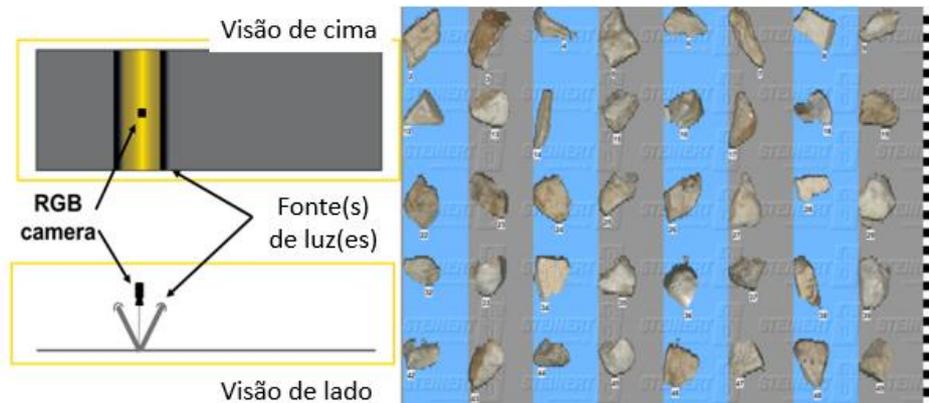
Além disso, uma das grandes vantagens da Steinert é a possibilidade de se combinar mais de um sensor, para uma mesma aplicação, em um único equipamento. A seguir, serão abordados os princípios de funcionamento dos quatro sensores presentes no KSS XT CLI

3.4.1. SENSOR COR

A detecção por cor, sensor de cor ou sensor óptico tem como seu objetivo principal detectar a cor do objeto a ser analisado. As câmeras se localizam na parte superior do KSS XT CLI, no centro da correia transportadora. Todo material processado é escaneado por esse sensor, e devido à sua posição estratégica, as câmeras detectam para cada objeto/partícula, características como: dimensão, formato, estrutura e o posicionamento na correia. Dessa maneira, é realizado então a análise de cor, por meio da conversão do sinal de vídeo para um componente RGB (*Red Green Blue* – Vermelho Verde Azul) e depois, ocorrer a transformação para o sistema HSL (*Hue Saturation Luminance* – Matiz Saturação Luminosidade). Cabe observar que os dados são processados pelo computador do equipamento (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2020).

A figura 7 apresenta um desenho esquemático, do sensor óptico, de como ocorre o escaneamento de um objeto e sua resposta final (à direita):

Figura 7: Desenho esquemático sensor de cor

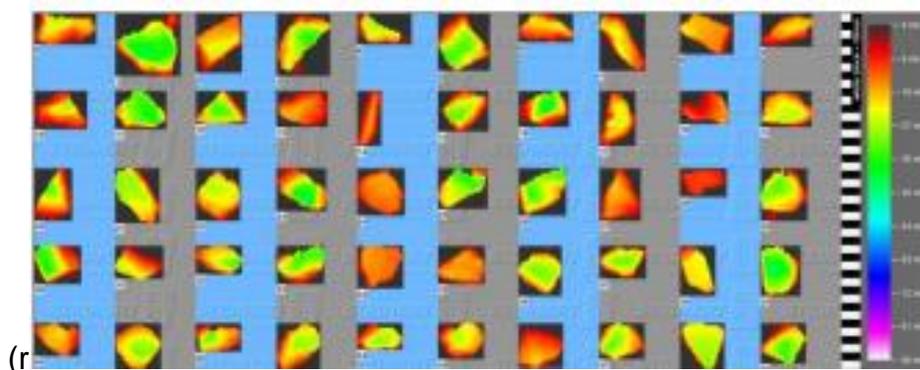


FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

3.4.2. SENSOR LASER 3D

A função do sensor Laser 3D é gerar informações sobre características superficiais em geral, são elas: forma, tamanho, rugosidade e brilho. Em conjunto com outros sensores, permite determinar a posição exata da partícula. Dessa maneira, possibilita a ejeção precisa, quando necessária. Em suma, seu funcionamento ocorre graças ao sistema de detecção da reflexão e difração do laser, na superfície das partículas que estão sendo analisadas (Relatórios interno da empresa Steiert Latinoamericana, 2020). Gerando, então, uma figura 3D das amostras (Figura 8):

Figura 8: Exemplo de resposta do sensor Laser 3D para algumas partículas

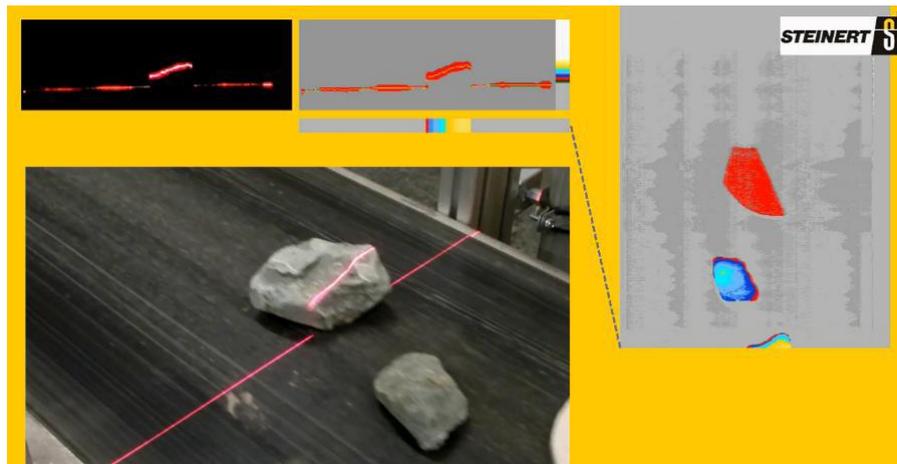


FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

Nota-se a escala de cores (à direita da figura), medindo o tamanho (em pixels) das

partículas estudas nesse caso. Quanto mais baixa a partícula, mais vermelho é sua resposta, e, quanto mais alta esta partícula, mais branco é sua resposta. Por fim, a figura 9 retrata o princípio de funcionamento e geração de imagem 3D por meio da triangulação de Laser:

Figura 9: Geração de imagens tridimensionais através de triangulação de Laser

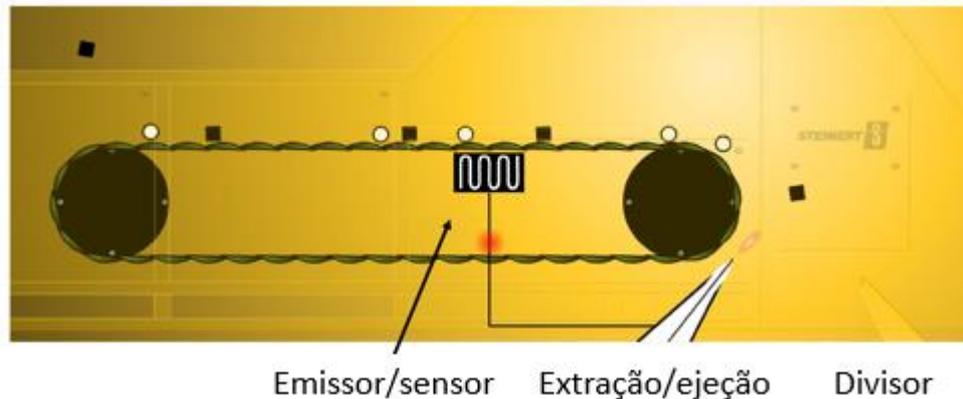


FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

3.4.3. SENSOR INDUTIVO ARGOS

Esse sensor tem como finalidade identificar materiais com sinais magnéticos e/ou condutores elétricos, separação de bolas, peças metálicas, sucatas, etc. Ou seja, na mineração, materiais com essas características distintas podem ser facilmente identificados. Um exemplo seria a magnetita (Fe_3O_4) e o quartzo (SiO_2). Localizado abaixo da correia transportadora do KSS XT CLI (figura 10), esse sensor conta com duas bobinas ativas. Assim, um campo magnético circundante é criado e utilizado para detectar propriedades condutoras e magnéticas de objetos (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2020).

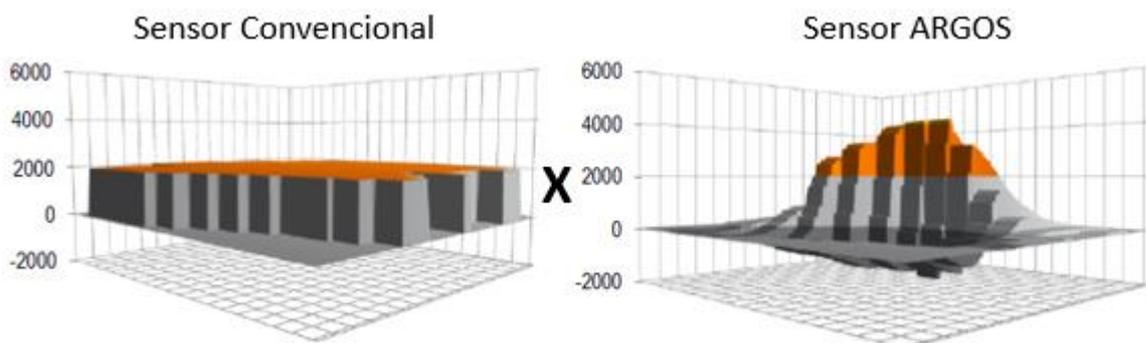
Figura 10: Exemplo esquemático do sensor indutivo ARGOS



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

É importante frisar que o sensor indutivo ARGOS se diferencia dos sensores indutivos padrões. Os sensores convencionais reconhecem os materiais apenas em movimento, gerando sinais binários (presença de metal: sim ou não). Além disso, esses sensores dependem da duração e da intensidade do sinal. Em contrapartida, o sensor ARGOS transmite um sinal com informação adicional sobre o objeto. Vale ressaltar, que não é necessário que os objetos estejam em movimento para serem reconhecidos, pois o sensor possui uma maior sensibilidade para partículas finas e um sistema integrado de controle da temperatura, o que implica em um melhor controle de qualidade (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2020). Para ilustrar a explicação anterior, a figura 11 traz um comparativo entre a resposta de um sensor convencional e a resposta de um sensor ARGOS:

Figura 11: Comparativo entre um sensor convencional e um sensor ARGOS

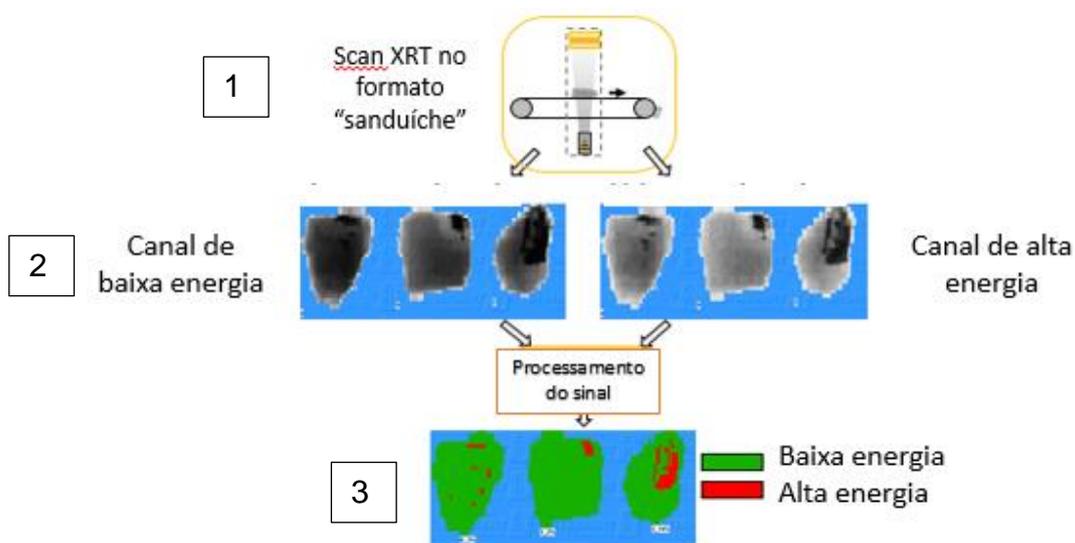


FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

3.4.4. SENSOR RAI0-X DE TRANSMISSÃO

O princípio de funcionamento do sensor Raio-X de Transmissão tem como base a medição da densidade atômica do objeto escaneado. A figura 12 retrata de modo simplificado como é realizado todo o processo, desde o escaneamento das amostras até as respostas geradas com diferentes tons de cinza e posteriormente o processamento dos sinais.

Figura 12: Esquema de um sensor de transmissão de raios-x por energia dual

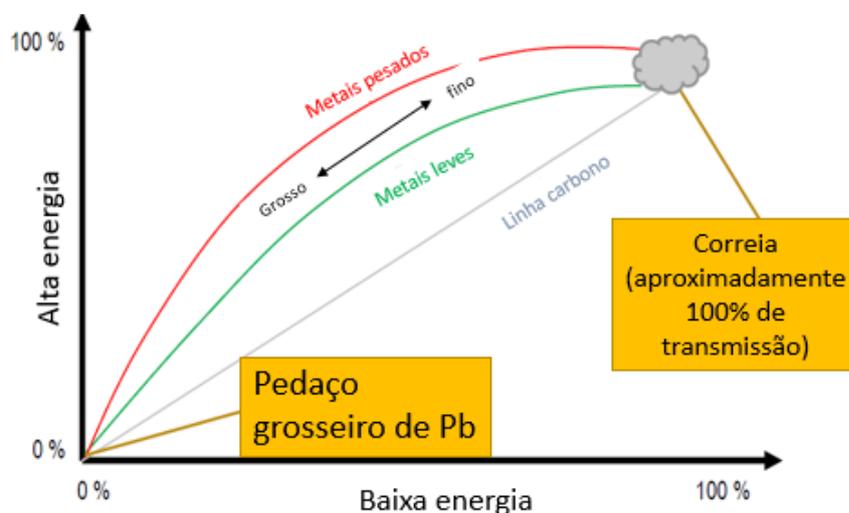


FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

A parte 1 da figura 12 aborda como o *scan* é realizado. De forma resumida, o material é penetrado com Raio-X, assim os detectores abaixo da correia transportadora e do material medem o espectro transmitido (*scan XRT* no formato "sanduíche").

O computador determina a diferença entre a radiação incidente e a transmitida, e posteriormente a diferença de intensidade resultante (absorção) sobre a composição atômica. A figura 13 abaixo mostra o princípio básico de uma análise de raios-X de energia dupla.

Figura 13: Diagrama de energia dual para Raio-X de transmissão



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2020 adaptado.

As diferenças de densidade entre os materiais são medidas e a energia dual é utilizada para compensar a influência de diferentes espessuras do material. Como exemplo pode-se comparar uma partícula de quartzo maior em tamanho e espessura, com relação a uma partícula pequena de hematita. Sem essa energia, devido ao seu tamanho superior, tal partícula de quartzo teria um valor de densidade próxima ou até mesmo superior que a partícula menor de hematita. Porém, com a compensação da energia dual, essa possibilidade é tratada. Ou seja, prevalece a densidade atômica do elemento mais denso. Assim a densidade da hematita predomina sob a densidade do quartzo.

Assim, os materiais que contêm elementos mais pesados são esperados na curva superior (vermelha), os materiais que contêm elementos com uma densidade mais baixa podem ser encontrados na curva inferior (verde). Neste diagrama, é definida uma área de interesse, que permite o mapeamento de cada pixel único registrado e, portanto, alocado a uma classe de densidade – cria-se então, uma curva de separabilidade de alta energia ou de baixa energia para definir os parâmetros de separação (linha de corte) entre uma partícula e outra (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2020).

A parte 2 da figura 12, consiste na resposta de partículas para o sensor XRT. As

imagens estão em escala de cinza onde tons mais escuros indicam maior absorção de XRT, indicando maior densidade atômica, e tons mais claros indicam uma absorção mais baixa que está relacionada às densidades atômicas reduzidas (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2020). Por fim, a parte 3 representa a análise da resposta do sensor de Raio-X por transmissão.

Tal sensor possui uma gama de aplicações. Segundo SOUTO (*et al.*, 2020) o XRT tornou-se o mais versátil e, dessa forma, o mais utilizado na separação de minerais pela aplicação da tecnologia de separação por sensores. SOUTO ainda complementa dizendo que, a capacidade de avaliar as partículas como um todo, sem a necessidade de preparação prévia da superfície, é um dos pontos primordiais para sua adesão e popularidade. Finalmente, devido às claras diferenças de densidade entre minerais minério, cangas, rejeito e rochas, é possível diferenciar e separar partículas metálicas, como óxidos e sulfetos, de contaminantes como carbonatados ou silicatos, por exemplo.

3.5. GUIA E TIPOS DE TESTE PARA ORE SORTING

A Steinert Latinoamericana (STL) possui um guia que contempla os tipos de testes para *ore sorting* e como é definido cada teste. Neste tópico, serão abordados de forma sucinta, os três tipos de testes, bem como cada teste é escolhido e executado.

Inicialmente, para realizar um teste no Centro de Testes da STL, é necessário discutir o projeto, contextualizando a situação do mesmo e abordando todas as questões técnicas, como recuperação mássica desejada, teor de corte, tamanho das partículas etc. Dessa forma é possível selecionar a melhor aplicação do teste. Em seguida, é feito um esclarecimento técnico, pela equipe técnica da Steinert Latinoamericana, levando em consideração, principalmente, o objetivo central do teste. Feito isso, é escolhido o tipo de teste a ser executado. Normalmente, para validar um teste de classificação e obter resultados precisos e coerentes com o que está sendo analisado/aplicado, faz-se uma avaliação inicial, seguida por um teste de desempenho. Além disso, uma combinação entre as diferentes abordagens de teste pode ser utilizada, a fim de obter um melhor entendimento da aplicação (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2021).

Ressalta-se a importância de obedecer os requisitos das amostras: tamanho das frações das amostras e representatividade. O material a ser investigado deve ser o mais representativo possível para se obter uma avaliação realista da aplicação e seu tamanho o mais adequado, para que a liberação seja a mais fiel possível, por afetar diretamente as propriedades superficiais do material em questão e a intensidade da mineralização em rochas individuais. O tamanho influencia diretamente na liberação e, conseqüentemente, na tecnologia de classificação e a eficiência de separação (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2021).

A seguir, demonstra-se as características dos três tipos de teste que podem ser definidos, após a discussão do projeto e os esclarecimentos técnicos.

3.3.1. *ROCK BY ROCK*

O tipo de teste “*Rock by Rock*” é comumente chamado de “Teste das 100 Rochas”. Corresponde no escaneamento de amostras individuais de rochas, que posteriormente são enviadas para ensaios destrutivos (análise química). Neste, faz-se uma correspondência entre os sinais/respostas dos sensores analisados e os resultados da análise química para obter uma posição qualitativa perante o uso da tecnologia *sensor based sorting* (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2021).

Para a realização deste tipo de teste, as amostras devem obedecer aos seguintes parâmetros: tamanho homogêneo (sugestão: - 25 +10mm / - 75 +25mm); conter entre 50 a 200 amostras; possuir informações mineralógicas fornecidas por geólogos e/ou especialistas sobre o tipo de rocha enviada. As demais características do “Teste das 100 Rochas” serão abordadas no capítulo de Metodologia, deste trabalho.

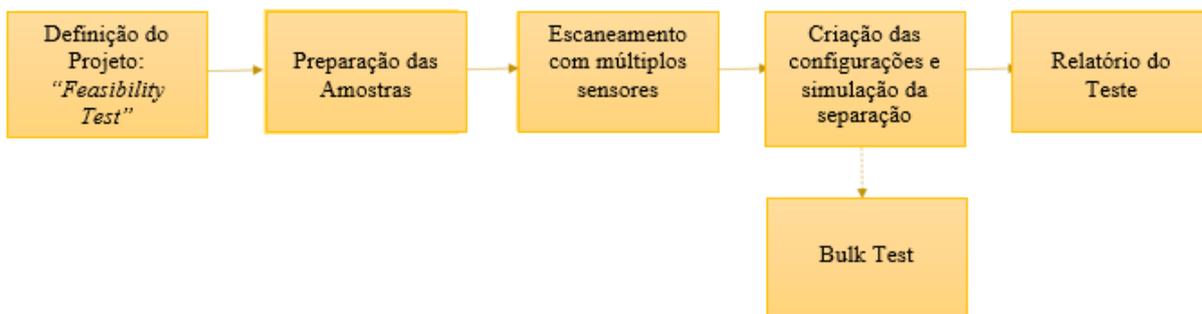
3.3.2. *FEASIBILITY TEST*

De modo geral, de acordo com o relatório interno (STEINERT LATINOAMERICA, 2021), o “*Feasibility Test*” é realizado como uma avaliação inicial sobre a aplicabilidade de separação. Para realização de tal teste, é preciso amostras de calibração que são utilizadas para caracterização e desenvolvimento das configurações. Os dados gerados podem ser usados para simular a separação de

materiais, como uma forma de se avaliar, inicialmente, as possíveis aplicações de separação. Posteriormente, em caso de continuidade dos testes, o algoritmo e as configurações são então utilizados em um outro teste em massa.

O fluxograma abaixo (figura 14) resume o procedimento de teste do “*Feasibility Test*”. Além disso, seus objetivos principais são desenvolver e validar configurações para aplicação (nas devidas amostras), e obter uma avaliação qualitativa da separação com base em dados simulados e nos resultados obtidos (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2021).

Figura 14: Procedimento da metodologia de teste *Feasibility Test*



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2021.

Após a definição do teste, as amostras de calibração devem ser preparadas seguindo as seguintes orientações: tamanho homogêneo (-25 +10mm) ou (-75 +25mm), variando sua massa de 10kg a 30kg, por tipo de amostra. Os diferentes tipos de amostras, além de seguir as orientações referidas acima, devem ser escolhidas a dedo por um especialista, de preferência um geólogo da área. A figura 15 retrata um exemplo de possíveis amostras de calibração:

Figura 15: Exemplo de amostras de calibração



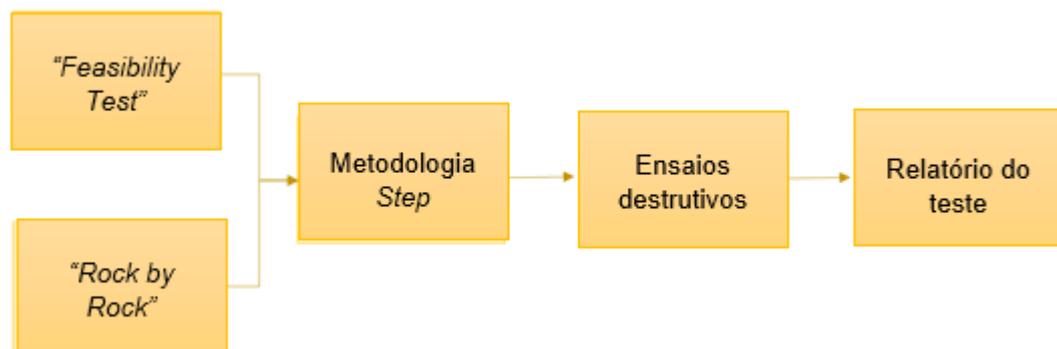
FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2021.

O escanamento das amostras é feito uma a uma, e graças ao equipamento KSS XT CLI, múltiplos sensores são utilizados ao mesmo tempo, gerando as devidas respostas para cada amostra. Feito isso, as configurações são criadas e validadas de acordo com os resultados das simulações realizadas. Por fim, as devidas conclusões do teste realizado, gerando um relatório final, e caso necessário, é dada a continuidade nos testes, realizando então um *Bulk Test*.

3.3.3. BULK TEST

A metodologia do “*Bulk Test*” pode ser resumida segundo o fluxograma (figura 16):

Figura 16: Procedimento da metodologia “*Bulk Test*”



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2021.

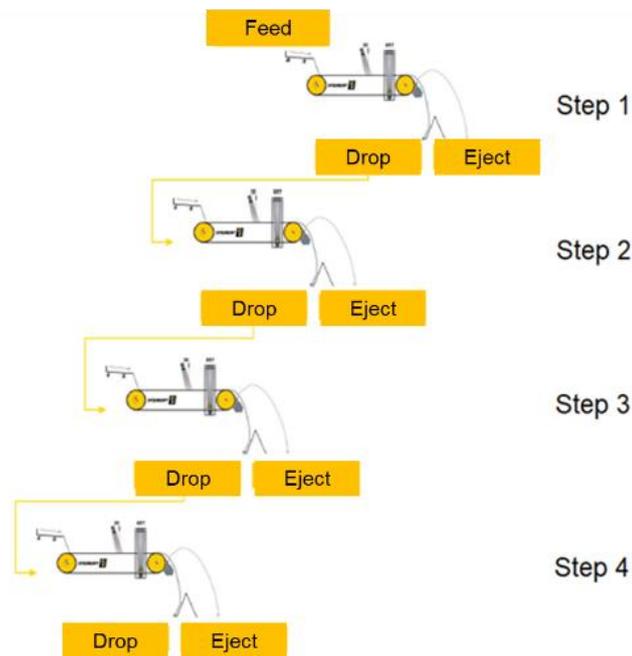
Nota-se que o teste *Feasibility Test* e/ou o *Rock by Rock Test* fazem parte do *Bulk Test*. Ou seja, é preciso realizar pelo menos um desses dois testes, para dar sequência no teste *Bulk*. Conforme o relatório interno (STEINERT LATINOAMERICANA, 2021), seu objetivo principal consiste em aplicar a configuração

desenvolvida na separação de uma amostra. Além disso, as considerações do processo podem ser definidas, como vazão, pressão do ar e consumo de ar.

As amostras para o teste *Bulk* obedecem a uma faixa granulométrica preestabelecida, sugere-se -25 +10mm ou -75 +25mm com uma massa variando entorno de 300 kg a 5000kg, para cada tipo de amostra *bulk*. É muito importante que o material selecionado seja bastante representativo. Ou seja, que todos os tipos de rocha e suas diferentes características estejam presentes nas amostras do teste, representando, de forma adequada, as amostras que se encontram *in locu* do material estudado. Assim, é possível obter uma avaliação realista da aplicação.

A metodologia de *Steps*, figura 17, tem como princípio reunir informações sobre o comportamento do material em questão, classificando a amostra global em diferentes sensibilidades de configuração (Relatórios interno da empresa Steinert Latinoamericana, 2021).

Figura 17: Metodologia “Step”



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2021.

Vale destacar que, mesmo realizando essa metodologia em etapas, em um contexto real de indústria e mineração, a separação ocorre em uma única etapa, com uma

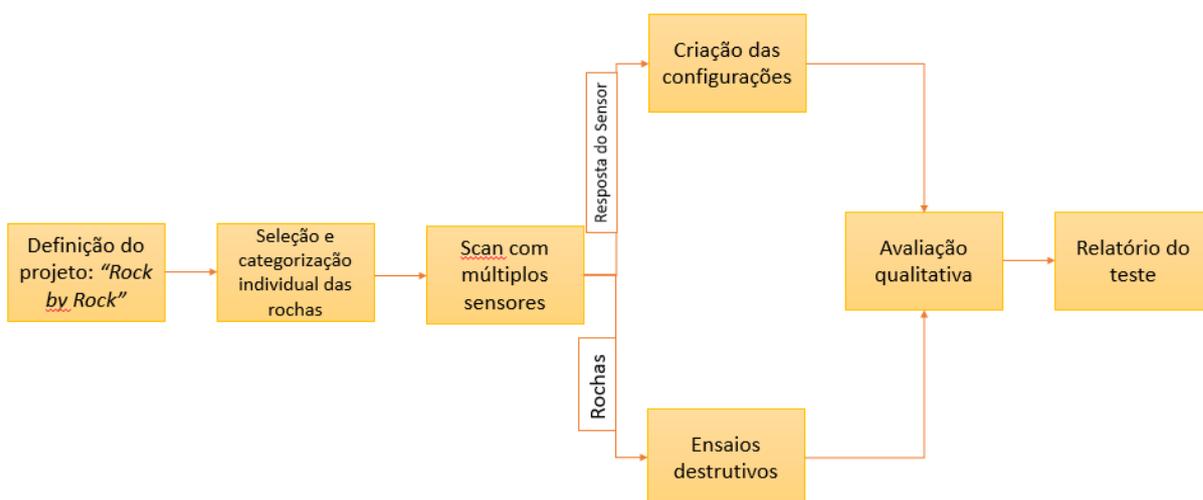
configuração adequada aquela situação. Em seguida, as amostras geradas no final do teste são enviadas para uma análise química (ensaios destrutivos). Por fim, os resultados são avaliados e, então, é gerado um relatório final.

4. METODOLOGIA

A metodologia de teste escolhida para a execução deste trabalho foi a *Rock by Rock* para realizar uma análise qualitativa sobre a aplicabilidade de separação entre os diferentes teores/litologias presentes nas amostras selecionadas de minério de ferro. Além disso, segundo documento da Steinert Latinoamericana – *Rock by Rock Protocol*, esse tipo de teste é designado para obter uma correlação entre as informações mineralógicas e as respostas dos sensores em questão, além de um melhor entendimento sobre a relação entre os resultados do ensaio e as respostas dos sensores (Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2021).

O fluxograma a seguir (figura 18) aborda o procedimento *Rock by Rock*:

Figura 18: Procedimento da metodologia de teste “*Rock by Rock*”



FONTE: Relatórios internos da empresa Steinert Latinoamericana, 2021.

Observa-se que, o Teste das 100 Rochas foi definido e ocorreu a seleção (figuras 19, 20 e 21) e categorização (tabela 1) das 60 amostras de minério de ferro, do quadrilátero ferrífero:

Tabela 1: Descrição das 60 amostras

Litologia	Identificação das amostras
Hematita compacta	49 até 51; 53 até 60
Canga hematítica	41 até 48; 52
Itabirito compacto hematítico	1 até 24
Itabirito compacto silicoso	25 até 31
Quartzito	36 até 40
Quartzito ferruginoso	32 até 35

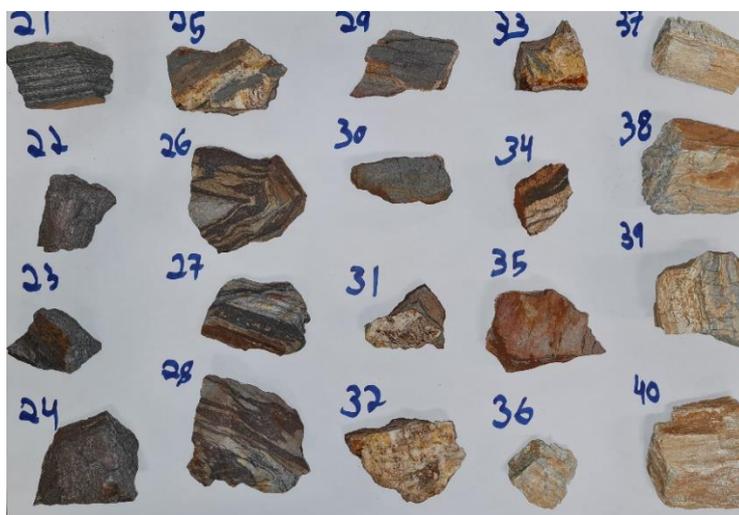
FONTE: Elaborada pelo autor

Figura 19: Amostras e 1 a 20



FONTE: Elaborada pelo autor

Figura 20: Amostras e 21 a 40



FONTE: Elaborada pelo autor

Figura 21: Amostras e 41 a 60



FONTE: Elaborada pelo autor

Em seguida, efetuou-se os *scans* com os múltiplos sensores (XRT, indutivo, laser e cor). As respostas dos sensores serão abordadas na parte de Resultados deste trabalho. A terceira etapa relaciona-se com a análise de dados. A tabela 2 a seguir exemplifica alguns dos resultados obtidos dos ensaios destrutivos.

Tabela 2: Exemplo de alguns resultados obtidos dos ensaios destrutivos

Identificação da Amostra	Fe(%)	SiO ₂ (%)	Litologia
Amostra 24	36,3	46,99	Itabirito compacto hematítico
Amostra 25	21,9	66,91	Itabirito compacto silicoso
Amostra 26	37,8	44,1	Itabirito compacto silicoso
Amostra 27	33,6	50,7	Itabirito compacto silicoso
Amostra 28	35,5	48,05	Itabirito compacto silicoso
Amostra 29	19	72,37	Itabirito compacto silicoso
Amostra 30	27,6	59,74	Itabirito compacto silicoso
Amostra 31	35,7	46,09	Itabirito compacto silicoso
Amostra 32	24,4	62,76	Quartzito ferruginoso

FONTE: Elaborada pelo autor

Ademais, em seguida, a figura 22 representa os resultados entre a análise química e algumas das respostas dos sensores. A título de exemplo, apenas nove amostras foram abordadas abaixo, mas todas as 60 rochas passaram pelo mesmo estudo.

Figura 22: Resultados entre a análise química e algumas das respostas dos sensores

Identificação da Amostra	Litologia	Fe(%)	SiO ₂ (%)	MD	pixel area	Max Laserbrightness	ARGOS-Max Phase
AMOSTRA 24	Itabirito compacto hematítico	36,3	46,99	0,92	808	8	4955
AMOSTRA 25	Itabirito compacto silicoso	21,9	66,91	0,97	727	52	4685
AMOSTRA 26	Itabirito compacto silicoso	37,8	44,1	0,84	911	56	4921
AMOSTRA 27	Itabirito compacto silicoso	33,6	50,7	0,94	711	53	4900
AMOSTRA 28	Itabirito compacto silicoso	35,5	48,05	0,71	1060	58	4964
AMOSTRA 29	Itabirito compacto silicoso	19	72,37	0,99	564	30	4977
AMOSTRA 30	Itabirito compacto silicoso	27,6	59,74	0,96	429	28	4934
AMOSTRA 31	Itabirito compacto silicoso	35,7	46,09	0,92	436	36	4910
AMOSTRA 32	Quartzito ferruginoso	24,4	62,76	0,97	716	40	4949

FONTE: Elaborada pelo autor

É possível perceber uma relação direta entre altos teores de SiO₂ e os valores do MD (*minimum density* – valor mínimo de densidade, onde o valor 1 representa a menor densidade e o valor 0 representa a maior densidade) destacados em vermelho. Tanto a criação das configurações e das curvas de separabilidade, quanto os ensaios destrutivos de todas as amostras, foram feitas de forma individual. Por fim, a quarta e última fase entende-se pelas avaliações qualitativas, criação de 3 cenários hipotéticos e as devidas conclusões.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico foi dividido em quatro partes. Cada seção representa resultados gerados de acordo com a metodologia de testes *Rock by Rock*. No final do capítulo, são apresentados 3 cenários distintos, simulando possíveis realidades do minério de ferro e a aplicação da tecnologia de separação por sensores.

5.1. RESPOSTA DOS SENSORES AOS SCANS

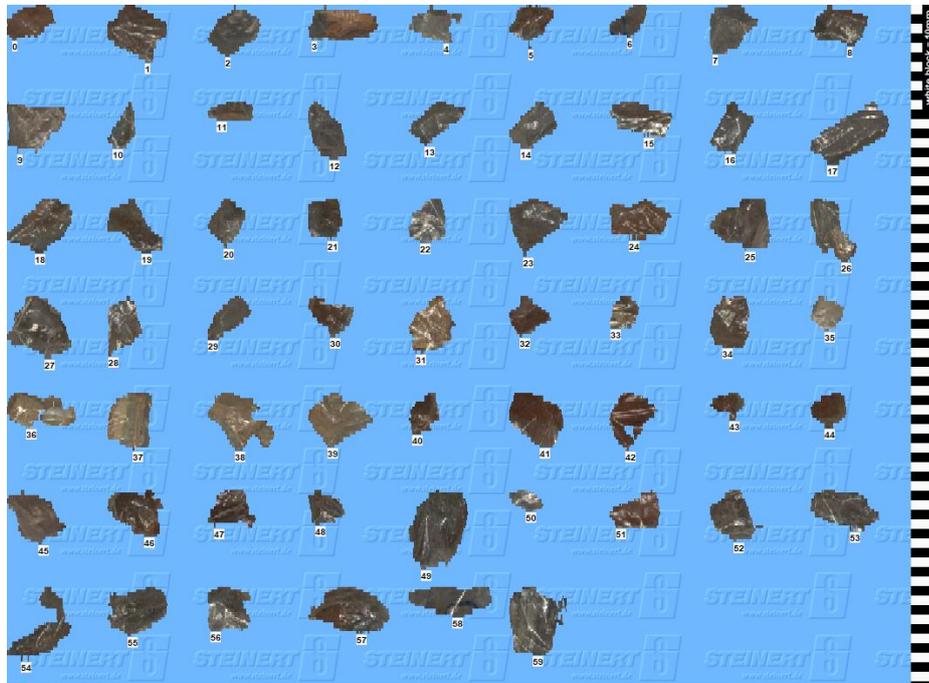
Cada uma das 60 amostras foram escaneadas utilizando-se os quatro sensores presentes no KSS XT CLI: Cor, Laser 3D, ARGOS e XRT. É importante destacar que nas figuras apresentadas a seguir, as amostras estão enumeradas de 0 a 59, obedecendo a mesma ordem que foram numeradas inicialmente, de 1 a 60.

Essas imagens e respostas geradas servem de auxílio para realização de uma primeira análise do material em estudo. Nesse primeiro momento é possível ter uma noção inicial de cada característica/critério que mais se destaca, para a aplicação da

tecnologia de separação por sensores.

A figura 23 traduz a resposta das partículas em relação ao sensor óptico de cor:

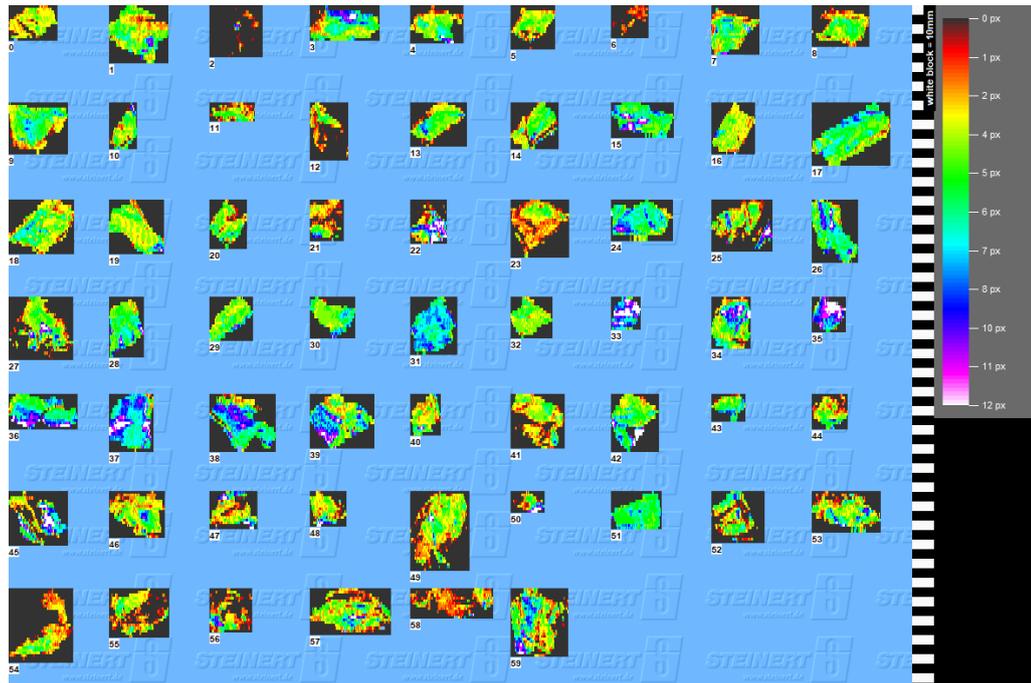
Figura 23: Resposta das 60 amostras ao Sensor de Cor



FONTE: Elaborada pelo autor

A figura 24 consiste na resposta das partículas em relação ao sensor Laser 3D:

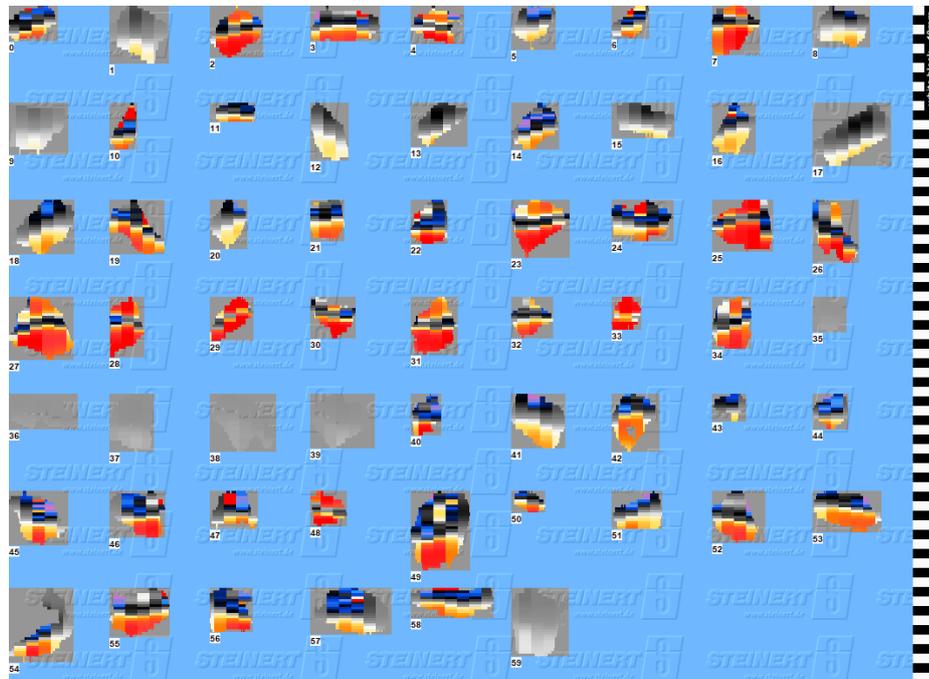
Figura 24: Resposta das 60 amostras ao Sensor Laser 3D



FONTE: Elaborada pelo autor

A figura 25 representa a resposta das partículas em relação ao sensor ARGOS:

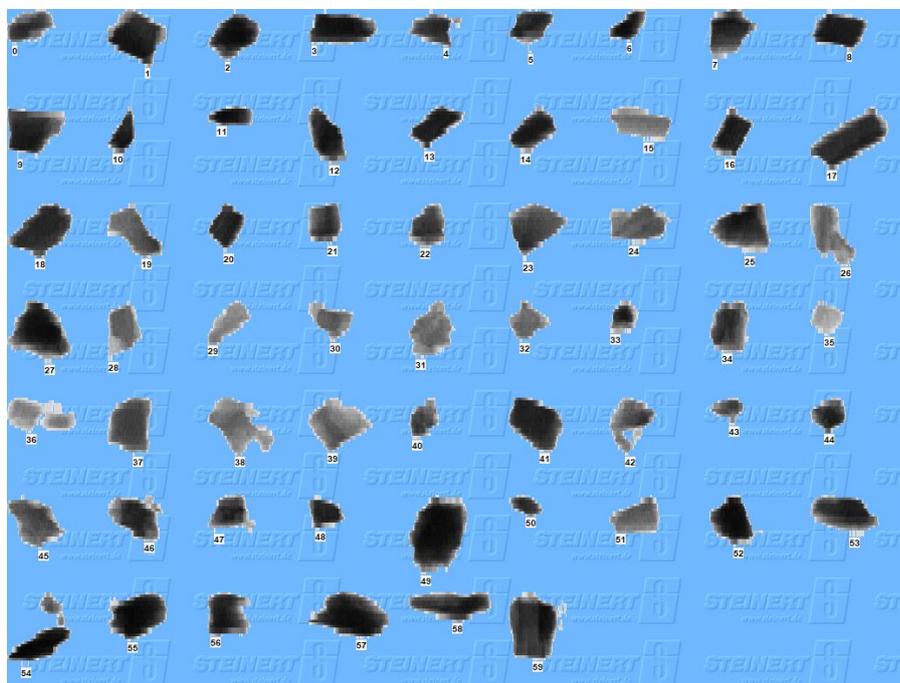
Figura 25 Resposta das 60 amostras ao Sensor ARGOS



FONTE: Elaborada pelo autor

A figura 26 representa a resposta das partículas em relação ao sensor XRT:

Figura 26: Resposta das 60 amostras ao Sensor XRT



FONTE: Elaborada pelo autor

Nota-se que, cada partícula possui um formato único, distinto, singular, com cores parecidas. Sinais aleatórios para o sensor indutivo e uma boa diferenciação para densidade atômica. Dessa maneira, utilizar como recurso apenas a aplicação de sensores ópticos, para aplicar a tecnologia de separação por sensores, não seria recomendado. Pois, o equipamento não iria diferenciar e separar corretamente as amostras em questão. Os dados gerados por esses sensores, tornam as amostras muito parecidas, homogêneas entre si, dificultando o critério e a separação. A capacidade de separação do equipamento mostra-se ineficaz.

Contudo, tal sensor (Laser 3D e/ou Cor) auxilia na localização da posição exata de cada partícula na correia, facilitando a futura ejeção. Portanto, combinado a outros sensores, como, por exemplo, o XRT, configura-se uma combinação de fatores e recursos mais assertiva. Ademais, ressalta-se, a importância da associação dessas respostas com os resultados das análises químicas. Isso porque, é esse ensaio destrutivo que comprova qual característica física está melhor associado à determinadas partículas que possuem os maiores teores de ferro.

5.2. CURVAS DE ALTA E DE BAIXA DENSIDADE

Foram desenvolvidas duas curvas de separação: baixa densidade (figura 27) e alta densidade (figura 28).

Figura 27: Curva de baixa densidade



FONTE: Elaborada pelo autor

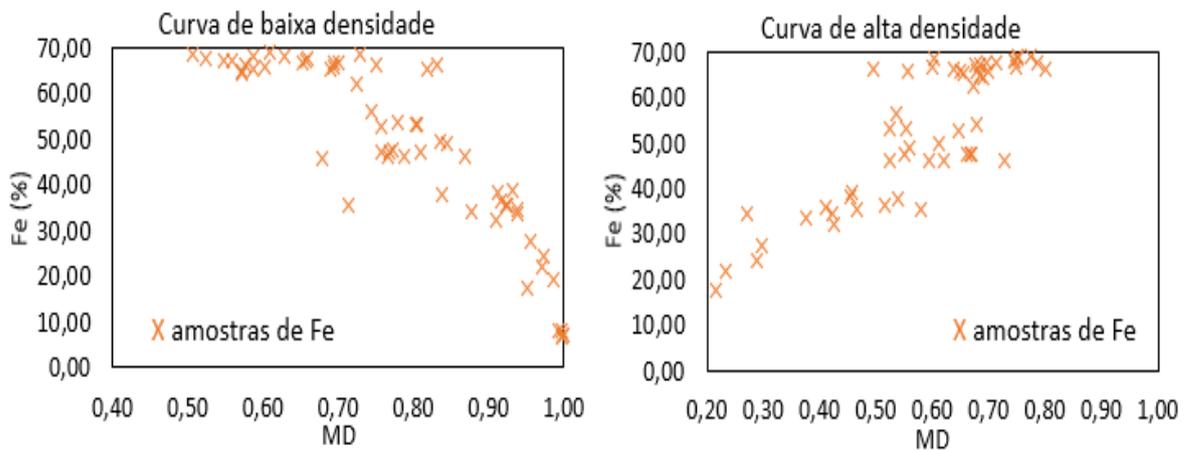
Figura 28: Curva de alta densidade



FONTE: Elaborada pelo autor

Após realizar as devidas simulações no software da Steinert Latinoamericana, chegou-se à conclusão de que a curva de baixa densidade foi a mais adequada para a realização da separação das partículas analisadas. A curva de baixa densidade está mais seletiva, principalmente para partículas com teores mais altos (produto). Os gráficos abaixo, figura 29, apresentam essa comparação entre as curvas:

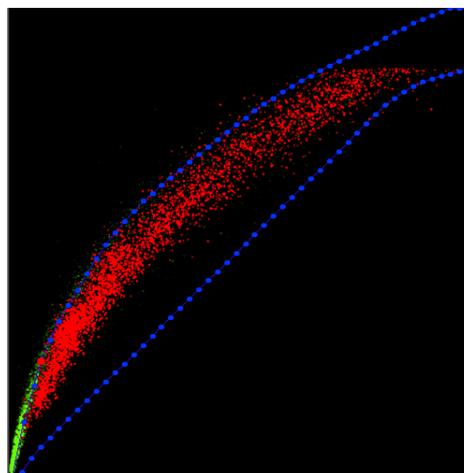
Figura 29: Resultados das curvas de baixa e alta densidade



FONTE: Elaborada pelo autor

No eixo X encontra-se os de máxima densidade, por partícula e no eixo Y os respectivos teores de ferro de cada partícula. Em conclusão, a figura 30 representa a curva selecionada, sua configuração e a separação entre partículas de ferro de alta densidade (verde) e as partículas de ferro com baixa densidade (vermelho).

Figura 30: Aplicação da configuração da curva de baixa densidade



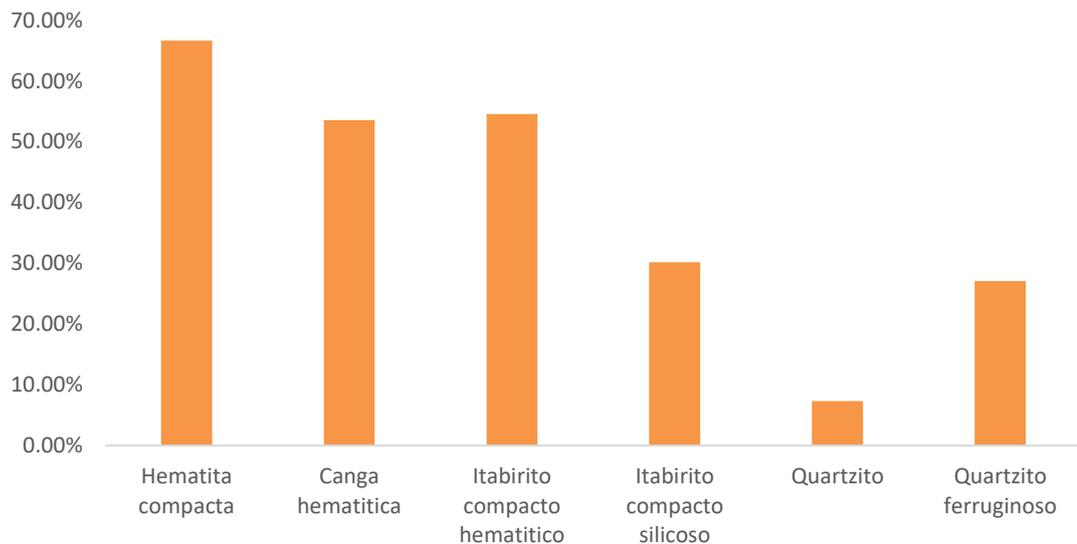
FONTE: Elaborada pelo autor

5.3. GRÁFICOS

Em um grupo populacional onde 18% das amostras são hematitas compactas, 15% canga hematítica, 40% itabirito compacto hematítico, 12% itabirito compacto silicoso

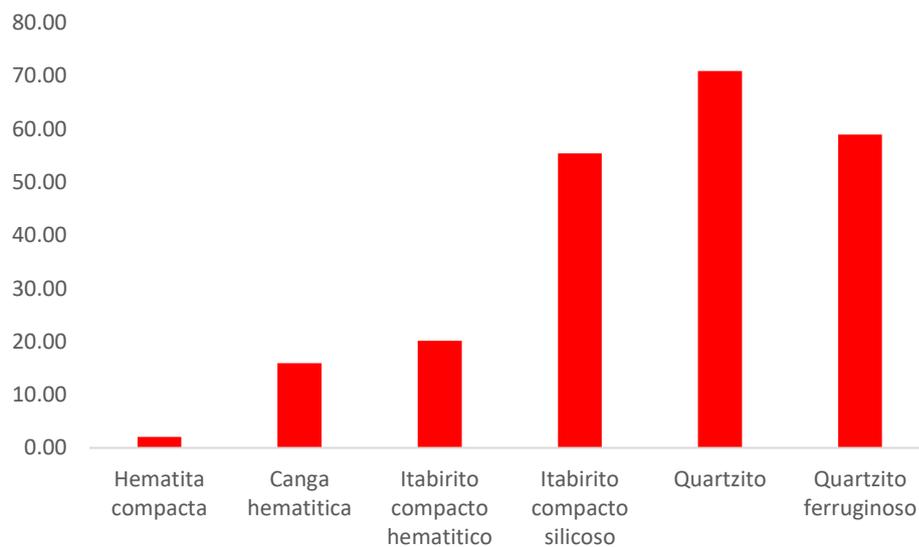
e 15% quartzito, os gráficos a seguir estão relacionados com as litologias das amostras estudadas, os teores de cada litologia, tanto para o ferro quanto para o SiO₂ e a distribuição dos teores de ferro e as partículas em questão:

Figura 31: Teor médio de Fe por litologia



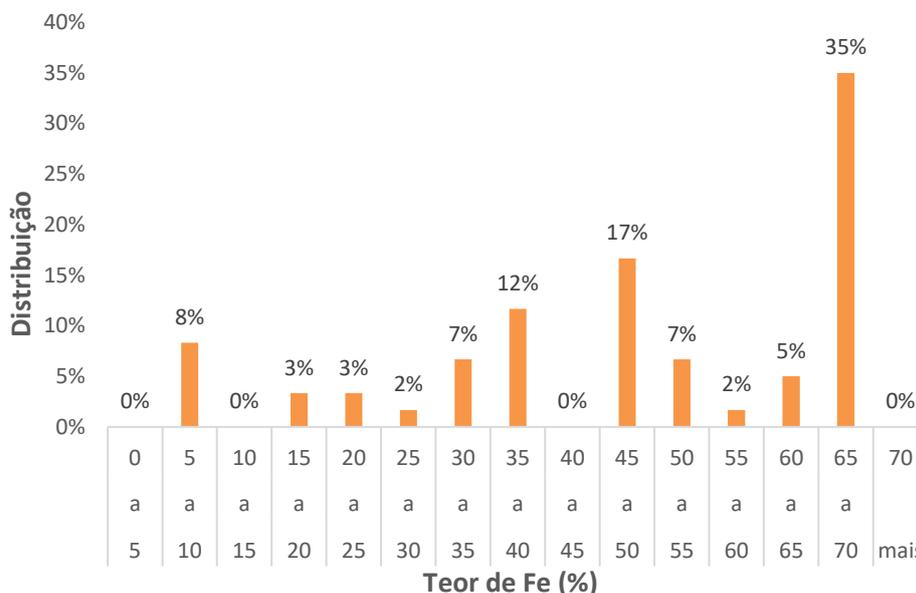
FONTE: Elaborada pelo autor

Figura 32: Teor médio de SiO₂ por litologia



FONTE: Elaborada pelo autor

Figura 33: Distribuição do teor de Fe (%)



FONTE: Elaborada pelo autor

Como era de se esperar, as amostras como hematita compacta e itabirito compacto hematítico apresentaram os maiores teores de ferro. Além disso, os quartzitos apresentaram teores inferiores a 35% de ferro. Nota-se também que 42% das amostras totais possuem teores maiores ou iguais a 55% e que 35% das amostras possuem teores inferiores a 35%.

5.4. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Após apresentar, analisar e discutir todos os dados expostos foram executadas 3 simulações (cenários) distintos, cada cenário apresenta outros 3 casos. Para o exercício a seguir, foram levados em consideração as seguintes características: foi utilizada a mesma curva de baixa densidade usada para a análise de dados deste trabalho e todos os cenários estão ejetando rejeito

No cenário 1, a distribuição de cada litologia foi exatamente igual à distribuição das amostras do teste *Rock by Rock* executado (tabela 3):

Tabela 3: Distribuição das litologias para o Cenário 1

Litologia	Distribuição
Hematita compacta	18%
Canga hematítica	15%
Itabirito compacto hematítico	40%
Itabirito compacto silicoso	12%
Quartzito	15%
Teor Alimentação	48%

FONTE: Elaborada pelo autor

Em seguida, foram definidos os cortes de massa para a realização da simulação. A figura 34 demonstra como foi criada tal relação:

Figura 34: Relação Ejeção Mássica, MD e Caso Amostra 1

	Caso	MD	Ejeção Massica (%)
Cenários 1, 2 e 3	Caso 1	0,91	30
	Caso 2	0,76	40
	Caso 3	0,65	50

FONTE: Elaborada pelo autor

Para atingir um corte de 30% de ejeção mássica (Caso 1), foi feito a relação com o MD = 0,91. De forma análoga, foram executados para o Caso 2 e o Caso 3. Vale ressaltar que essa mesma relação foi estabelecida para o Cenário 2 e o Cenário 3. Após definir a ejeção mássica e os valores do MD, foi calculado a recuperação mássica para cada litologia, de acordo com cada MD. Calculou-se ainda o teor médio de Fe para cada litologia e o teor médio de SiO₂ (figura 35).

Figura 35: Relação Ejeção Mássica, MD e Cenário 1

	Litologias	Distribuição	Recuperação Mássica			Teor Médio	
			MD 0,91	MD 0,76	MD 0,65	Fe	SiO ₂
Cenário 1	Hematita compacta	18%	100,0	90,9	54,5	66,65%	2,08%
	Canga hematítica	15%	100,0	22,2	0,0	53,55%	15,97%
	Itabirito compacto hematítico	40%	79,2	50,0	25,0	54,56%	20,16%
	Itabirito compacto silicoso	12%	28,6	14,3	0,0	30,18%	55,42%
	Quartzito	15%	11,1	0,0	0,0	15,52%	61,25%

FONTE: Elaborada pelo autor

Por fim, obteve-se o resultado final para a simulação do Cenário 1, apresentado na figura 36, com a recuperação mássica global, teor do produto e do rejeito para cada caso.

Figura 36: Recuperação mássica para os 3 casos do Cenário 1

Cenário 1	Rec Massica		
	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Hematita compacta	18,33	16,67	10,00
Canga hematítica	15,00	3,33	0,00
Itabirito compacto hematítico	31,67	20,00	10,00
Itabirito compacto silicoso	3,33	1,67	0,00
Quartzito	1,67	0,00	0,00
Rec mássica global	70,0	41,7	20,0
Teor produto	55%	58%	61%
Teor rejeito	17%	14%	11%

FONTE: Elaborada pelo autor

De forma semelhante, foram realizadas as simulações dos cenários 2 e 3. Para o Cenário 2, a distribuição litológica foi feita da seguinte maneira:

Tabela 4: Distribuição das litologias para o Cenário 2

Litologia	Distribuição
Hematita compacta	30%
Canga hematítica	5%
Itabirito compacto hematítico	10%
Itabirito compacto silicoso	5%
Quartzito	50%
Teor Alimentação	37%

FONTE: Elaborada pelo autor

Sua recuperação mássica para cada litologia, de acordo com cada MD, teor médio de Fe para cada litologia e o teor médio de SiO₂ foram:

Figura 37: Relação Ejeção Mássica, MD e Cenário 2

	Litologia	Distribuição	Recuperação Mássica			Teor Médio	
			MD 0,91	MD 0,76	MD 0,65	Fe	SiO2
Cenário 2	Hematita compacta	30%	100,0	90,9	54,5	66,65%	2,08%
	Canga hematitica	5%	100,0	22,2	0,0	53,55%	15,97%
	Itabirito compacto hematitico	10%	79,2	50,0	25,0	54,56%	20,16%
	Itabirito compacto silicoso	5%	28,6	14,3	0,0	30,18%	55,42%
	Quartzito	50%	11,1	0,0	0,0	15,52%	61,25%

FONTE: Elaborada pelo autor

E o resultado final para a simulação do Cenário 2 é apresentado na figura 38.

Figura 38: Recuperação mássica para os 3 casos do Cenário 2

Cenário 2	Rec Massica		
	Case 1	Case 2	Case 3
Hematita compacta	30,00	27,27	16,36
Canga hematitica	5,00	1,11	0,00
Itabirito compacto hematitico	7,92	5,00	2,50
Itabirito compacto silicoso	1,43	0,71	0,00
Quartzito	5,56	0,00	0,00
Rec mássica global	49,9	34,1	18,9
Teor produto	57%	64%	65%
Teor rejeito	14%	6%	4%

FONTE: Elaborada pelo autor

Para o Cenário 3, a distribuição litológica foi feita da seguinte maneira:

Tabela 5: Distribuição das litologias para o Cenário 3

Litologia	Distribuição
Hematita compacta	5%
Canga hematítica	15%
Itabirito compacto hematitico	15%
Itabirito compacto silicoso	55%
Quartzito	10%
Teor Alimentação	38%

FONTE: Elaborada pelo autor

Sua recuperação mássica para cada litologia, de acordo com cada MD, teor médio de Fe para cada litologia e o teor médio de SiO₂ foram:

Figura 39: Relação Ejeção Mássica, MD e Cenário 2

	Litologia	Distribuição	Recuperação Mássica			Teor Médio	
			MD 0,91	MD 0,76	MD 0,65	Fe	SiO ₂
Cenário 3	Hematita compacta	5%	100,0	90,9	54,5	66,65%	2,08%
	Canga hematitica	15%	100,0	22,2	0,0	53,55%	15,97%
	Itabirito compacto hematitico	15%	79,2	50,0	25,0	54,56%	20,16%
	Itabirito compacto silicoso	55%	28,6	14,3	0,0	30,18%	55,42%
	Quartzito	10%	11,1	0,0	0,0	15,52%	61,25%

FONTE: Elaborada pelo autor

E o resultado final para a simulação do Cenário 3 é apresentado na figura 40:

Figura 40: Recuperação mássica para os 3 casos do Cenário 3

Cenário 3	Rec Massica		
	Case 1	Case 2	Case 3
Hematita compacta	5,00	4,55	2,73
Canga hematitica	15,00	3,33	0,00
Itabirito compacto hematitico	11,88	7,50	3,75
Itabirito compacto silicoso	15,71	7,86	0,00
Quartzito	1,11	0,00	0,00
Rec mássica global	48,7	23,2	6,5
Teor produto	47%	49%	60%
Teor rejeito	29%	28%	13%

FONTE: Elaborada pelo autor

6. CONCLUSÕES

- A partir do teste *Rock by Rock* no KSS XT CLI realizado e dos resultados gerados indica-se a possibilidade de aplicação da tecnologia *Sensor Based Sorting* (SBS) para as 60 amostras analisadas, identificadas e estudadas.
- Os quatro sensores do equipamento KSS XT CLI geraram respostas

para as partículas estudadas. Verificou-se que o sensor XRT combinado com o sensor laser apresentaram os melhores resultados. Em razão da diferença de densidade (heterogeneidade das amostras e essa característica), além do fato do sensor Laser auxiliar na localização e detecção das amostras.

- Foram geradas duas curvas de separabilidade: uma de baixa e outra de alta densidade. Após as simulações feitas no software da STL e avaliar as análises químicas, concluiu-se que a curva de baixa densidade foi a mais adequada para o estudo em questão.
- Ao analisar os três cenários simulados, nota-se que é possível elevar os teores de minérios de ferro após aplicar a tecnologia SBS.
- Para o Cenário 1, com um teor de alimentação de 48% de Fe foi alcançado um teor de ferro de 58% (possível produto) - para uma recuperação mássica total de 41,7%; um teor de 61% de ferro - para uma recuperação mássica de 20%.
- Para o Cenário 2, para um teor de alimentação de 37% foi alcançado um teor de ferro de 64% (possível produto) - para uma recuperação mássica total de 34,1%; um teor de 65% de Fe - para uma recuperação mássica de 18,9% (Possível produto Premium).
- Para o Cenário 3, para um teor de alimentação de 38% foi alcançado um teor de ferro de 49% - para uma recuperação mássica total de 23,2%; um teor de 60% de ferro - para uma recuperação mássica de 6,5%.
- É notável a influência que o teor de alimentação possui, perante a aplicação da tecnologia de separação por sensores.
- De forma semelhante, a heterogeneidade e a homogeneidade das amostras também é um fator relevante para a aplicação da tecnologia de separação por sensores.
- Mesmo com teores de alimentação semelhantes, a aplicação de SBS para o Cenário 2 é mais adequado que para o Cenário 3. Isso acontece porque quando se tem partículas muito homogêneas, tal como é o caso do Cenário 3, apenas itabirito, dentro de uma mesma faixa de teor, por consequência não vai haver uma maneira de separação. O equipamento

não diferencia e analisa considerando que não há diferença.

- Quando se tem heterogeneidade, tal como é o caso do Cenário 2 – presença de quartzito e hematita, o equipamento consegue diferenciar tais partículas, separando umas das outras. A hematita é juntada e, por conseguinte, eleva-se o teor do seu produto. Essa questão causa um efeito muito significativo na parte econômica de um empreendimento.
- A continuidade deste estudo é primordial para a possível comprovação da tecnologia SBS para o minério de ferro do QF. Dessa maneira, sugere-se a continuidade deste estudo com amostras de outras regiões do Quadrilátero Ferrífero e/ou a realização de um *Feasibility test* ou um teste *Bulk*.

7. REFERÊNCIAS

COSTA, Iago Sousa Lima; DA SILVA, Guilherme Ferreira; FERREIRA, Marcos Vinicius. Application of Zipf's law to estimate undiscovered Gold endowment in the Quadrilátero Ferrífero Province, Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil* vol 2, nº 3, 165-172, Dezembro 2019. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br>. Acesso em: 21 dez. 2021.

CUMENA, Jacinto Tchipa Daniel. Desenvolvimento de software para amostragem de materiais particulados. Orientador: Prof. Dr. José Aurélio M. da Luz. 2021. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

DORR, John Van Nostrand. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. US Government Printing Office, 1969.

DUARTE, Hélio A. et al. Ferro – um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. *Quim. Nova*, Vol. 42, No. 10, p.1146-1153, novembro 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170443>. Acesso em: 21 dez. 2021

ESTEVEZ, P. et al. Application of sensor-based-sorting technology at pilot plants in South America. p. 1–13, 2020.

FARINA F., Albert C., Martinez Dopico C.I., Aguilar Gil C., Moreira H., Hippertt J.P., Cutts K., Alkmim F.F., Lana C. The Archean - Paleoproterozoic evolution of the Quadrilatero Ferrifero (Brazil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, p.4-21, julho 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.015>. Acesso em: 21 dez. 2021.

LESSARD, J., Sweetser, W., Bartram, K., Figueroa, J., & McHugh, L. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit. 2016. *Minerals Engineering*, 91, p.92–99. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.019>. Acesso em: 19 dez. 2021.

PSL CARVALHO, MM Silva, MAR Rocio, J Moszkowicz. Minério de Ferro. BNDES

Setorial 39, p. 197-234. 2014. Disponível em: bndes.gov.br. Acesso em: 20 dez. 2021

ROBBEN, C., & Wotruba, H. Sensor-based ore sorting technology in mining—past, present and future. *Minerals*, 9(9), p.1–25, 2019 Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min9090523>. Acesso em: 20 dez. 2021

ROESER, Hubert Matthias Peter; ROESER, Patricia Angelika. O quadrilátero ferrífero-mg, brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Geonomos*, 2010.

SOUTO, V. et al. Sensor-based particle sorting : Technical and economic evaluation of the applicability in a zinc ore mine. *AusIMM*, p.1–22, 2020.

STEINERT LATINOAMERICANA. Relatórios internos de desenvolvimento: “Guia para Testes de Ore Sorting”. Belo Horizonte, 2021. 4 p.

STEINERT LATINOAMERICANA. Relatórios internos de desenvolvimento: “Rock by Rock Protocol”. Belo Horizonte, 2021. 5 p.

STEINERT LATINOAMERICANA. Relatórios internos de desenvolvimento: “Feasibility Test Protocol”. Belo Horizonte, 2021. 4 p.

STEINERT LATINOAMERICANA. Relatórios internos de desenvolvimento: “Bulk Test Protocol”. Belo Horizonte, 2021. 3 p.

STEINERT LATINOAMERICANA. Relatórios internos de desenvolvimento: “Test work technical report”. Belo Horizonte, 2020.

VON KETELHODT, L.; BERGMANN, C.. Dual energy X-ray transmission sorting of coal. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, Johannesburg , v. 110, n. 7, p. 371-378, julho 2010. Disponível em: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532010000700007&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 19 dez. 2021.