

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

EVANDRO GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS SENSORES ÓPTICO E POR
TRANSMITÂNCIA DE RAIOS-X NO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DE
CALCÁRIO EM MINA DE CAÇAPAVA DO SUL/RS**

Caçapava do Sul

2018

EVANDRO GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS SENSORES ÓPTICO E POR
TRANSMITÂNCIA DE RAIOS-X NO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DE
CALCÁRIO EM MINA DE CAÇAPAVA DO SUL/RS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Régis Sebben Paranhos

Caçapava do Sul

2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

d722a dos Santos, Evandro Gomes

Análise da performance dos sensores óptico e por
transmitância de raios-x no processo de classificação de
calcário em mina de Caçapava do Sul/RS / Evandro Gomes dos
Santos.

101 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM TECNOLOGIA MINERAL, 2018.

"Orientação: Régis Sebben Paranhos".

1. Separação baseada em sensores. 2. Sorting. 3. Calcário.
4. Performance. 5. Gráfico ROC. I. Título.

EVANDRO GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS SENSORES ÓPTICO E POR
TRANSMITÂNCIA DE RAIOS-X NO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DE
CALCÁRIO EM MINA DE CAÇAPAVA DO SUL/RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

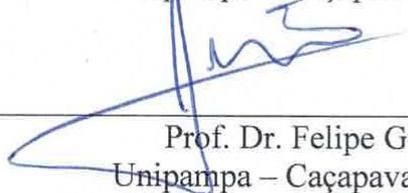
Área de concentração: Tecnologia Mineral

Dissertação defendida e aprovada em: 26 de setembro de 2018.

Banca examinadora:



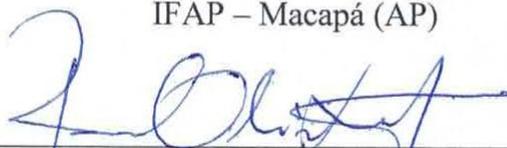
Prof. Dr. Regis Sebben Paranhos
Orientador
Unipampa – Caçapava do Sul (RS)



Prof. Dr. Felipe Guadagnin
Unipampa – Caçapava do Sul (RS)



Prof. Dr. Moacir Medeiros Veras
IFAP – Macapá (AP)



Dr. Raul Oliveira Neto
Minerar Consultoria – Porto Alegre (RS)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e incentivo incondicionais;

À Universidade Federal do Pampa e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Mineral, por oferecer ensino e estrutura de qualidade;

Ao Prof. Dr. Régis Sebben Paranhos, pela dedicação e atenção desprendidas como orientador;

À Empresa Dagoberto Barcellos S/A, nas pessoas dos diretores Dagoberto Barcellos Neto e Carlos André Barcellos e dos ex-diretores Oldair Barcellos e Dalvi Dias (*in memoriam*), pela oportunidade e incentivo;

Aos colaboradores do Laboratório da Empresa Dagoberto Barcellos S/A, Delma Camargo, Leonardo Soares e Daiane Calderon, pelo apoio na realização das análises químicas;

Ao Laboratório de Processamento Mineral - Laprom, do Centro de Tecnologia da UFRGS, em especial ao Prof. Dr. Carlos Otávio Petter, por viabilizar de forma solícita o acesso ao *sorter*, tornando possível a realização do presente estudo;

Ao Prof. Dr. Moacir Medeiros Veras, pela sua solicitude, paciência e disponibilidade em coordenar o manuseio e operação do *sorter*;

Ao Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios - Latram, da Unipampa, em especial à Tng.^a de Minas Ângela Cristina Fleck e à aluna de tecnologia em mineração Bruna Oliveira, pelo apoio na preparação das amostras;

À doutoranda e Tng.^a de Minas Taís Cordeiro de Oliveira, pela colaboração na moagem das amostras;

Aos Profs. Drs. Felipe Guadagnin e Ítalo Gonçalves, da Unipampa, pela cedência do VANT, dos *softwares* de processamento de imagens e de seus relevantes conhecimentos na área, com tanta solicitude, junto ao aluno de geologia Giovanni Pasetto;

A todas as pessoas não citadas nesta relação que, de alguma forma, contribuíram com o êxito deste estudo e

A Deus, que tornou tudo isto possível.

“Quando paramos de aprender e de progredir,
começamos a morrer realmente”.

Carlos Torres Pastorino

RESUMO

A tecnologia automatizada de seleção de materiais tem suas primeiras pesquisas datadas da década de 1930 (SALTER & WYATT, 1991; NIENHAUS et al., 2014). No entanto, somente a partir da década de 1980 é que se tornou possível sua utilização na prática (PRETZ, 2012). O presente estudo teve por meta avaliar a performance da tecnologia de separação baseada em sensores na classificação do calcário ROM de mina de Caçapava do Sul, como alternativa ao processo de cata manual atualmente empregado. Estes mármores dolomíticos, assim como suas encaixantes singenéticas, estão enquadrados no Complexo Passo Feio (HOERLLE et al. 2010; FABRIS, 2015; CPRM, 2017). As características de formação das ocorrências de calcário na região de Caçapava do Sul são bastante particulares, tornando a lavra complexa, em razão da série de litotipos encontrados e a forma como estes se dispõem. Como principais tipos de estereis estão intercalações pelíticas singenéticas, intrusões máficas e apófises graníticas. Na metodologia, a amostragem foi realizada com auxílio de *drone*, contemplando todas as variantes de minério e estéril existentes na jazida. Nas análises em equipamento de *sorting*, testaram-se três granulometrias (-25+9,5mm, -50+25 mm, -70+50 mm) e três condições do material (sujo-seco, limpo-úmido e limpo-seco). Na análise dos resultados foram utilizados índices de recuperação mássica e metalúrgica e outros indicadores como: acurácia, sensibilidade, especificidade. Como resultados, a amostragem com auxílio de *drone* gerou modelo virtual de afloramento que serviu de base à coleta de amostras representativas. Nos testes de *sorting*, com sensor óptico, os valores de recuperação metalúrgica ficaram entre 35 e 85% na menor faixa granulométrica e entre 91 e 98% na faixa maior. A acurácia teve valores entre 43 e 85% na menor faixa e 97 e 98% na maior, o que também ocorreu com o comportamento dos gráficos ROC, que teve separações melhores ao passo que se aumentou a granulometria. Concluiu-se que o sensor de raios-X não demonstrou afinidade para classificar os materiais em teste. O sensor óptico se mostrou aplicável em todas as situações testadas, apresentando recuperações entre 35% e 98%, de acordo com a condição e a granulometria da alimentação. A granulometria foi o fator que mais teve influência na performance de separação, implicando em variações de até 30% nos índices de acurácia e afetando diretamente o posicionamento dos pontos nos gráficos ROC (característica de operação do receptor), onde a maior faixa granulométrica teve os melhores resultados, independentemente da simulação realizada.

Palavras-chave: separação baseada em sensores; *sorting*; calcário; performance, gráfico ROC.

ABSTRACT

The automated material selection technology has its first researches dating back to the 1930s (SALTER & WYATT, 1991; NIENHAUS et al., 2014). However, only from the 1980s, with the development of larger processors, has it become possible to use it in practice (PRETZ, 2012). The objective of this study was to evaluate the performance of the sensor - based separation technology in the classification of the limestone ROM of Caçapava do Sul mine, as an alternative to the manual selection process currently employed. These dolomite marbles, as well as their syngeneic casts, are framed in the Passo Feio Complex (HOERLLE et al., 2010, FABRIS, 2015, CPRM, 2017). The formation characteristics of limestone occurrences in the region of Caçapava do Sul are quite particular, making the mining process very complex, due to the series of lithotypes found and the way in which they are organized. As main types of sterile are syngeneic pelitic intercalations, mafic intrusions and granitic apophyses. In the methodology, the sampling was carried out with the help of drone, contemplating all the variants of ore and sterile existing in the deposit. Three granulometry (-25 + 9.5mm, -50 + 25mm, -70 + 50mm) and three material conditions were tested (dirty-dry, clean-wet and clean-dry). In the analysis of results were used massic recovery and metallurgical recovery indices and other indicators such as: accuracy, sensitivity, specificity. As results, the drone-assisted sampling generated an outcrop virtual model that served as the basis for the collection of representative samples. In the sorting tests with optical sensor, metallurgical recovery values were between 35 and 85% in the lowest sieve range and between 91 and 98% in the larger range. The accuracy had values between 43 and 85% in the lowest mesh and 97 and 98% in the largest, which also occurred with the behavior of the ROC graphs, which had better separations while increasing the particle size. It was concluded that the X-ray sensor showed no affinity to classify the materials under test. The optical sensor was shown to be applicable in all tested situations, with metallurgical recoveries between 35% and 98%, depending on the condition and grain size of the feed. The granulometry was the major factor influencing the separation performance, implying variations of up to 30% in the accuracy indexes and directly affecting the positioning of the points in the ROC graphs (receiver operating characteristic), where the largest grain size range had the best results, regardless of the simulation performed.

Keywords: sensor-based separation; sorting; limestone; performance, ROC graph.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: mapa de localização geográfica da área de estudo.....	23
Figura 2: mapa geológico da área de estudo.....	24
Figura 3: variações na coloração do calcário encontrado na área de estudo, vendo-se, da esquerda para direita, as cores branca, branca com tons esverdeados, rosa e cinza.....	25
Figura 4: layout de equipamento de separação genérico, mostrando sensores que podem ser utilizados e os principais componentes da máquina.....	33
Figura 5: conversão das imagens obtidas nas duas intensidades do DE-XRT à imagem em falsas-cores.	34
Figura 6: layout de câmera CCD.....	35
Figura 7: equipamento de separação por câmera com seus componentes básicos.....	37
Figura 8: esquema do método de quarteamento por pilha cônica.	40
Figura 9: fluxograma das etapas de realização do estudo.	44
Figura 10: interface do <i>software</i> Pix4D, demonstrando o plano de voo das 19 linhas Leste-Oeste, os pontos em vermelho representam os 3 locais de pouso/decolagem do equipo durante a realização dos voos.	46
Figura 11: interface do <i>software</i> Pix4D, demonstrando o plano de voo das 5 linhas norte-sul, o ponto em vermelho representam os local de pouso/decolagem do equipo. A janela mostrada no canto inferior direito ilustra a trajetória do <i>drone</i> em relação ao terreno imageado.	47
Figura 12: interface do <i>software</i> Agisoft Photoscan durante a geração da nuvem de pontos densa.....	47
Figura 13: britador de mandíbulas utilizado na britagem das amostras.....	50
Figura 14: peneiramento do material britado, mostrando-se as quatro malhas de peneiras utilizadas.....	51
Figura 15: vista superior do <i>sorter</i> , instalado no LAPROM, UFRGS, com detalhe dos componentes.....	52
Figura 16: condições do material alimentado nas três rodagens realizadas.....	53
Figura 17: exemplo de amostra de calcário cinza antes (A) e após (B) a lavagem.....	53
Figura 18: esquema que demonstra os principais passos da calibração do sensor de raios-X: A) amostras no interior do equipamento, B) imagem em escala de cinza gerada pelo <i>software</i> , onde zonas mais claras são mais densas, C) análise das características produto vs. rejeito, vê-se histogramas de cada produto à direita, D) ajuste da faixa de densidade a ser descartada/recuperada (<i>threshold</i>).....	54

Figura 19: esquema que demonstra os principais passos da calibração da câmera CCD. A) amostras no interior do equipamento, B) imagem captada pelo sensor, mostrando as amostras por sobre a correia transportadora e o ajuste do background, C) geração e análise do comportamento dos histogramas de reflectância dos espectros do vermelho, verde e azul. D) janela de calibração dos parâmetros de RGB para separação (<i>threshold</i>).....	55
Figura 20: exemplo da coleta do material remetido a cada uma das caixas do equipamento e sua segregação conforme as classes estabelecidas, sendo produto a caixa A e rejeito a caixa B. Quanto à segregação, da esquerda para direita, tem-se CB, CC, CR, E2 e E1.	56
Figura 21: exemplo de gráfico ROC.	59
Figura 22: modelo virtual de afloramento mostrando a cava compreendida no presente estudo.	61
Figura 23: análise dos dados do ROM no sensor de raios-X: à esquerda histograma das amostras de minério, à direita histograma das amostras de estéril.....	63
Figura 24: imagem das amostras geradas na etapa de calibração do sensor óptico: sendo à esquerda estéril (retângulo vermelho) e minério (retângulo verde) e a direita seus respectivos histogramas.....	65
Figura 25: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material sujo-seco em cada classe na granulometria -25+9,5 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	68
Figura 26: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material sujo-seco em cada classe na granulometria -50+25 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	69
Figura 27: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material sujo-seco em cada classe na granulometria -70+50 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	69
Figura 28: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-úmido em cada classe na granulometria -25+9,5 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	72
Figura 29: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-úmido em cada classe na granulometria -50+25 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita).	

Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	72
Figura 30: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-úmido em cada classe na granulometria -70+50 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	73
Figura 31: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-seco em cada classe na granulometria -25+9,5 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	75
Figura 32: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-seco em cada classe na granulometria -50+25 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	75
Figura 33: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-seco em cada classe na granulometria -70+50 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.	76
Figura 34: valores de PN para a alimentação e as frações produto e rejeito, nas três condições testadas.	79
Figura 35: valores de PN para a alimentação e as frações produto e rejeito, para as três faixas granulométricas testadas.	80
Figura 36: gráfico demonstrativo das recuperações metalúrgicas de minério obtidas em cada uma das condições testadas.	81
Figura 37: gráfico demonstrativo da variação da recuperação metalúrgica quando se modificou a granulometria de alimentação.	81
Figura 38: valores de razão de enriquecimento para cada condição testada, nas três granulometrias.	82
Figura 39: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos nos testes considerando as três condições do material, nas três faixas granulométricas.	85
Figura 40: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos na simulação de separação de cada classe de minério individualmente, para a granulometria -25+9,5 mm.	86
Figura 41: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos na simulação de separação de cada classe de minério individualmente, para a granulometria -50+25 mm.	86

Figura 42: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos na simulação de separação de cada classe de minério individualmente, para a granulometria -70+50 mm.	87
Figura 43: gráfico demonstrativo da variação nos valores de acurácia quando se modificou a granulometria e a condição da alimentação.....	88
Figura 44: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada condição testada nas três granulometrias.	89
Figura 45: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada classe de minério testada nas três condições, na granulometria -25+9,5 mm.	90
Figura 46: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada classe de minério testada nas três condições, na granulometria -50+25 mm.	91
Figura 47: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada classe de minério testada nas três condições, na granulometria -70+50 mm.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: quantidade e localização de equipamentos de <i>automatic sorting</i> em operação, na década de 1990.	29
Tabela 2: garantias mínimas exigidas aos corretivos de acidez do solo (valores mínimos). ...	42
Tabela 3: valores de ordem química exigidos à produção de cal virgem, onde CV-E: cal virgem especial; CV-C: cal virgem comum e CV-P: cal virgem em pedra.	42
Tabela 4: valores de ordem química para cada um dos tipos de cal hidratada.	43
Tabela 5: parâmetros adotados para definição das classes de minério e estéril nas zonas iluminadas.	48
Tabela 6: parâmetros adotados para definição das classes de minério e estéril nas zonas não iluminadas.	49
Tabela 7: demonstrativo das faixas granulométricas da amostra e suas respectivas massas. ..	50
Tabela 8: lista numerada dos principais itens que compõem o <i>sorter</i>	52
Tabela 9: matriz de confusão.	59
Tabela 10: proporções para minério e estéril na composição da amostra do ROM.	62
Tabela 11: balanço de massa do material sujo-seco (-25+9,5 mm), após submissão ao sensor óptico.	66
Tabela 12: balanço de massa do material sujo-seco (-50+25 mm), após submissão ao sensor óptico.	67
Tabela 13: balanço de massa do material sujo-seco (-70+50 mm), após submissão ao sensor óptico.	67
Tabela 14: balanço de massa do material limpo-úmido (-25+9,5 mm), após submissão ao sensor óptico.	70
Tabela 15: balanço de massa do material limpo-úmido (-50+25 mm), após submissão ao sensor óptico.	71
Tabela 16: balanço de massa do material limpo-úmido (-70+50 mm), após submissão ao sensor óptico.	71
Tabela 17: balanço de massa do material limpo-seco (-25+9,5 mm), após submissão ao sensor óptico.	73
Tabela 18: balanço de massa do material limpo-seco (-50+25 mm), após submissão ao sensor óptico.	74
Tabela 19: balanço de massa do material limpo-seco (-70+50 mm), após submissão ao sensor óptico.	74

Tabela 20: balanço metalúrgico do material na condição sujo-seco, nas três granulometrias testadas.	77
Tabela 21: balanço metalúrgico do material na condição limpo-úmido, nas três granulometrias testadas.	77
Tabela 22: balanço metalúrgico do material na condição limpo-seco, nas três granulometrias testadas.	78
Tabela 23: matriz de confusão para a condição sujo-seco, contemplando as três granulometrias testadas, onde calcário = CB+CC+CR e estéril = E1+E2 (valores em gramas).	83
Tabela 24: matriz de confusão para a condição limpo-úmido, contemplando as três granulometrias testadas, onde calcário = CB+CC+CR e estéril = E1+E2.	83
Tabela 25: matriz de confusão para a condição limpo-seco, contemplando as três granulometrias testadas, onde calcário = CB+CC+CR e estéril = E1+E2.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Abertura do queixo do britador na posição aberto
APF	Abertura do queixo do martelo na posição fechado
CB	Calcário branco
CC	Calcário cinza
CCD	Dispositivo de carga acoplada
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CR	Calcário rosa
CRQ-RS	Conselho Regional de Química do Rio Grande do Sul
DE-XRT	Transmissão de raios-X de dupla energia
E1	Estéril 1
E2	Estéril 2
ESM	<i>Electric Sorting Machine Company</i>
ETR	Elementos de terras raras
FN	<i>False negative</i> (falso-negativo)
FP	<i>False positive</i> (falso-positivo)
<i>FPr</i>	<i>False positive rating</i> (índice de falsos-positivos)
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico, unidade de densidade
GSD	<i>Ground surface distance</i> (distância da superfície do solo)
LAPROM	Laboratório de Processamento Mineral (UFRGS)
LATRAM	Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios (Unipampa)
LS	Material limpo-seco

LU	Material limpo-úmido
Ma	Milhões de anos
MDE	Modelo digital de elevação
MVA	Modelo virtual de afloramento
nm	Nanômetro
PN	Poder de neutralização
PRNT	Poder relativo de neutralização total
RGB	<i>Red, green and blue</i> (vermelho, verde e azul, sistema aditivo ternário de cores)
ROC	Receiver operating characteristics (característica de operação do receptor)
ROM	<i>Run of mine</i> (material direto da mina)
SBS	Separação baseada em sensores (<i>sensor-based separation/sorting</i>)
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (sistema de referência de elevação concebido pela NASA no ano 2000)
SS	Material sujo-seco
t	Tonelada métrica
t/h	Toneladas por hora
TN	<i>True negative</i> (verdadeiro-negativo)
TP	<i>True positive</i> (verdadeiro-positivo)
<i>TPr</i>	<i>True positive rating</i> (índice de verdadeiros-positivos)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VANT	Veículo aéreo não tripulado (<i>drone</i>)
VIS	<i>Visual image sensors</i> [sensores que trabalham na faixa de comprimento de onda do visível (390-780nm)]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Meta	22
1.1.1	Objetivo geral	22
1.1.2	Objetivos específicos	22
1.2	Justificativa	22
2	ESTUDO DE CASO	23
2.1	Localização da área de estudo	23
2.2	Contexto geológico da área.....	23
2.3	Considerações sobre os processos de lavra e produção	26
3	REFERENCIAL TEÓRICO	28
3.1	Estado da arte	28
3.1.1	Breve histórico da utilização da SBS	28
3.1.2	A separação baseada em sensores	30
3.2	Sensores	32
3.2.1	Sensor de raios-X	33
3.2.2	Sensor óptico	35
3.2.3	Análise da performance	37
3.3	Amostragem.....	38
3.3.1	Amostras representativas	38
3.4	Emprego de <i>drone</i> em atividades geológico-mineiras.....	40
3.5	O calcário.....	41
3.5.1	Considerações gerais	41
3.5.2	Principais aplicações.....	41
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	Etapa I - Amostragem	44

4.1.1	Amostragem do ROM	44
4.2	Etapa II - Preparação das amostras	49
4.2.1	Amostras do ROM.....	49
4.3	Etapa III - Testes de separação	51
4.3.1	Calibração dos sensores.....	52
4.3.2	Realização dos testes	55
4.4	Etapa IV - Caracterização	56
4.4.1	Cálculo do poder de neutralização (PN).....	56
4.5	Etapa V - Análise dos resultados	58
4.5.1	Balanço metalúrgico	58
4.5.2	Análise da performance de separação	58
5	RESULTADOS E ANÁLISE	61
5.1	Amostra representativa das classes.....	61
5.1.1	Modelo 3D das frentes de lavra (MVA).....	61
5.1.2	Composição da amostra.....	62
5.2	Sensor de raios-X (DE-XRT)	63
5.2.1	Calibração.....	63
5.3	Sensor óptico (câmera CCD)	64
5.3.1	Calibração.....	64
5.3.2	Testes de separação	65
5.3.3	Balanço metalúrgico	76
5.3.4	Análise da performance do sensor.....	82
6	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

A mineração cumpre importante papel no cenário econômico nacional, envolvendo etapas que vão desde a exploração de novos depósitos até a lavra, beneficiamento e comercialização, tanto no mercado interno, quanto em forma de exportação. Este é um setor que compreende cerca de 4% do Produto Interno Bruto, com aproximadamente 1 milhão de empregos diretos (MME, 2011). Somente no primeiro trimestre de 2015, a balança comercial do setor mineral apresentou um saldo positivo de US\$ 4,2 bilhões. No mesmo período, as exportações do setor mineral somaram quase US\$ 11 bilhões, com participação de 25% do total das exportações brasileiras (MME, 2018).

No tocante à mineração de calcário, esta ocorre em quase todos os estados brasileiros, e tem crescido mais de 20% nos últimos anos, atingindo, em 2008, um total estimado de 107 milhões de toneladas produzidas, gerando, aproximadamente, 12 mil empregos (MME, 2009). Como forma de produção, prepondera o calcário beneficiado (aproximadamente 80%) (MME, 2009). Entretanto, ainda segundo o mesmo autor, os investimentos nas minas e usinas de beneficiamento de calcário no Brasil são tímidos (cerca de R\$ 1,00 por tonelada, em 2005).

A mineração de calcário no município de Caçapava do Sul teve seu início em meados do século XX e hoje representa uma das mais importantes atividades industriais da região sul do Brasil. Conforme citado por SAMPAIO & ALMEIDA (2005) estas rochas podem ter, de acordo com sua composição, aplicação numa grande gama de produtos, indo desde a construção civil e agricultura até a indústria de plásticos, ornamentos, tintas, vidros etc. Sendo a cal, segundo INMETRO (2004), o produto manufaturado mais antigo da humanidade.

A utilização do minério extraído em Caçapava do Sul se restringia, inicialmente, à fabricação de cal para construção civil, tendo um processo de lavra completamente manual. O início do processo de modernização/mecanização dos processos se deu a partir da década de 1950, com a difusão do emprego de calcário moído como corretivo de acidez do solo e o aumento da demanda por matéria prima à realização de grandes obras civis. Isto fez com que os processos de extração e beneficiamento tivessem um grande incremento de mecanização durante a década de 1970.

Embora, segundo MME (2009), a indústria estudada responda por 70% da produção de calcário corretivo de solo e 25% do mercado estadual da cal, processos manuais ainda integram a rota de processos do beneficiamento. Devido às características geológicas das

jazidas da região, a cata manual ainda tem relevante papel na garantia de qualidade dos produtos finais, pois, ainda que exista um criterioso processo de seleção nas frentes de lavra, o material ROM (*rum of mine*) que chega ao britador ainda possui percentual de contaminantes.

Este tipo de processo de seleção, segundo PRETZ (2012), é o mais antigo processo de triagem para purificar matérias-primas de que se tem notícia. Porém, as altas exigências dos processos industriais, os grandes volumes de produção e a demanda por níveis elevados de qualidade, fazem da catação manual um método cada vez mais limitado. Neste sentido, o advento de novas tecnologias que tenham viabilidade econômica de utilização no beneficiamento de minérios de baixo valor agregado, como o calcário, vem ao encontro das necessidades do setor.

A tecnologia automatizada para seleção de materiais tem suas primeiras pesquisas datadas da década de 1930 (SALTER & WYATT, 1991; NIENHAUS et al., 2014). No entanto, somente a partir da década de 1980, com o desenvolvimento de processadores de maior monta, é que se tornou possível sua utilização na prática (PRETZ, 2012). Hoje, métodos de seleção através de sensores são utilizados para classificar diversos tipos de materiais, utilizando sistemas de medição que reconhecem contrastes entre cor, forma, densidade etc.

Quanto a estudos em calcário, KOLACZ (2012) cita a possibilidade de emprego de sensor óptico para a separação de partículas brancas de partículas cinza e pretas, visando alcançar um aumento de alvura do produto final, obtendo incremento de pureza da ordem de 35%. GÜLCAN & GÜLSOY (2017), testaram a separação de magnesita de cor branca de um rejeito de cor escura, também apontando bons resultados. No entanto, observaram uma redução na assertividade do método ao passo que a taxa de alimentação foi aumentada.

Segundo MANOUCHEHRI (2006), os separadores ópticos são os mais comumente utilizados, através do desenvolvimento acelerado da tecnologia de computação, e dos grandes avanços no reconhecimento e quantificação da superfície de partículas, tendo tido o custo de capital substancialmente reduzido nos últimos tempos. Citando alternativas, FEIERABEND et al. (2014) fala da possibilidade de emprego de métodos de medição que avaliam os materiais com base na sua estrutura molecular ou atômica, em casos mais específicos de classificação. NELSON (2005), por sua vez, cita ainda a possibilidade de utilização de sensores de odor, aumentando o leque de possibilidades de aplicação da separação baseada em sensores (SBS), dando à tecnologia um caráter cada vez mais abrangente.

1.1 Meta

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem por meta avaliar, através de ensaios e análises, a performance da tecnologia de separação baseada em sensores na classificação do calcário ROM de mina de Caçapava do Sul, como alternativa ao processo de cata manual atualmente empregado.

1.1.2 Objetivos específicos

Para tanto, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- ✓ coletar amostras do ROM que representem as variedades de minério e estéril, utilizando *drone* como ferramenta de planejamento;
- ✓ preparar estas amostras em três faixas granulométricas;
- ✓ realizar, com equipamento de SBS (*sensor-based sorting*), ensaios de separação em laboratório em escala semi-piloto, com sensores de transmitância de raios-X e óptico;
- ✓ testar a influência das condições do material alimentado na separação por sensores;
- ✓ analisar a performance do sensor óptico na seleção do minério, através de indicadores como recuperação (mássica e metalúrgica), acurácia, dentre outros.

1.2 Justificativa

A necessidade permanente de modernização nos sistemas de produção é questão cada vez mais presente no cotidiano das empresas em geral, de forma que a realização de estudos que desenvolvam ou aprimorem tecnologias se torna fator chave ao atendimento de um mercado cada vez mais exigente. Assim, técnicas essencialmente dependentes da mão humana vêm, inevitavelmente, perdendo espaço.

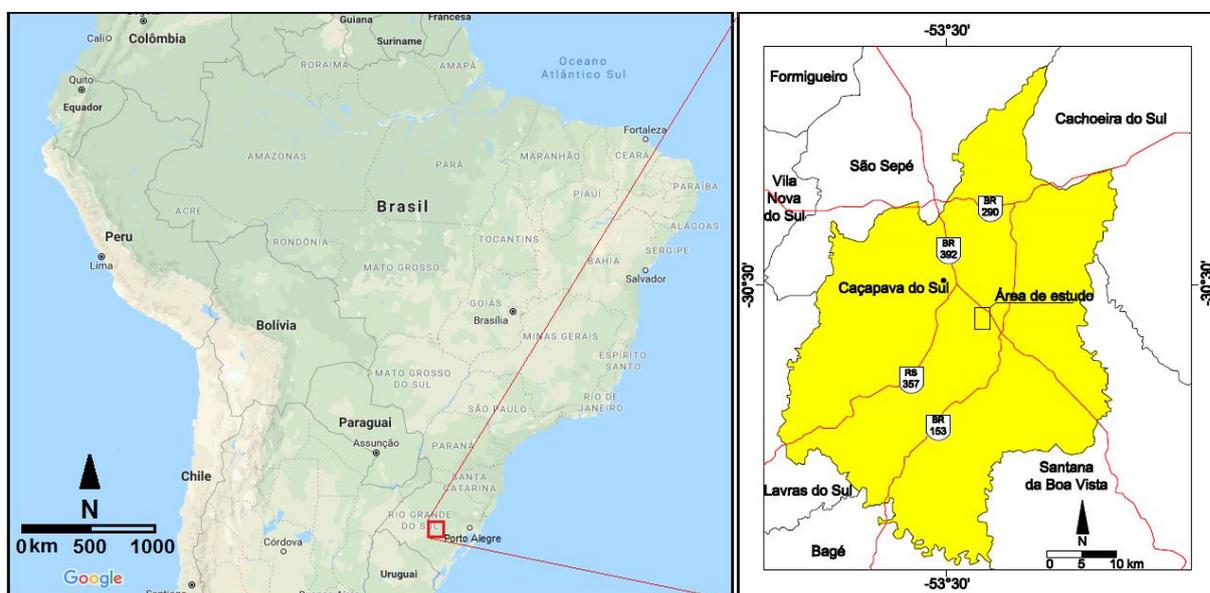
A tecnologia de *automatic sorting*, cada vez mais difundida mundialmente nos ramos da mineração, dos alimentos e da reciclagem, vem ao encontro deste cenário, já sendo alternativa comprovada à otimização do processamento de vários bens minerais. Ao passo que novos limites de complexidade são experimentados com o avanço da lavra de calcário na empresa estudada, a possibilidade de emprego do método pode surgir como uma opção a ser considerada na garantia de manutenção ou incremento dos índices de qualidade dos produtos finais.

2 ESTUDO DE CASO

2.1 Localização da área de estudo

A empresa Dagoberto Barcellos S/A, tema do presente estudo, está localizada na cidade de Caçapava do Sul, região central do Rio Grande do Sul (RS), a, aproximadamente, 270 km a oeste da capital Porto Alegre. Quanto ao acesso, a área está localizada às margens da BR-392, no km 252,5, 30 km a sul do entroncamento com a BR-290, e a cerca de 10 km a norte da BR-153. A distância aproximada para a sede do município de Caçapava do Sul é de 10 km (Figura 1).

Figura 1: mapa de localização geográfica da área de estudo.



Fonte: modificado de GOOGLE (2018) e DAER (2017).

2.2 Contexto geológico da área

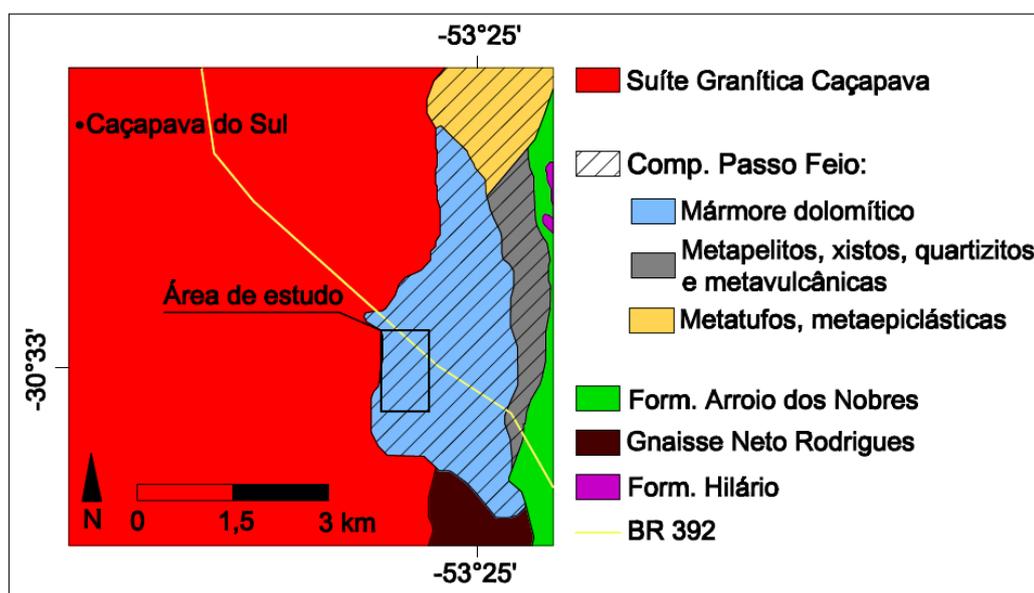
A região de Caçapava do Sul, historicamente, é alvo de exaustivos estudos geológicos voltados, principalmente, à classificação e investigação de ocorrências minerais. Ainda na década de 1960, o trabalho apresentado por RIBEIRO et al. (1966) trouxe uma compilação do que se tinha até o momento sobre a geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, trazendo um aprofundamento do conhecimento de jazimentos já em processo de lavra (calcário de Caieiras, cobre de Minas do Camaquã) e apontando zonas potenciais.

Apesar de ser usual o emprego do termo calcário (também adotado no presente trabalho), as jazidas carbonáticas da região são, em verdade, constituídas por mármore dolomíticos. Estes mármore, assim como suas encaixantes singenéticas, estão enquadrados por vários autores no (Super) Complexo Vacacaí. Trabalhos mais modernos, como

HOERLLE et al. (2010), FABRIS (2015) e outros, por sua vez, já denominam o referido complexo como Passo Feio, o que é ratificado em CPRM (2017).

Conforme se pode visualizar na Figura 2, estas rochas localizam-se margeando a Suíte Granítica Caçapava e são datadas, tanto por BORTOLOTTTO (1987) quanto por BORBA (2006), como pertencentes ao pré-cambriano superior, ou seja, cerca de 750 Ma (milhões de anos). A Suíte Granítica Caçapava do Sul, mais recente, é datada por CPRM (2000, 2017) em cerca de 580 Ma. Como principais tipos de estereis estão intercalações pelíticas singenéticas, intrusões máficas e apófises graníticas.

Figura 2: mapa geológico da área de estudo.



Fonte: adaptado de CPRM (2017).

As características de formação das ocorrências de calcário na região de Caçapava do Sul são bastante particulares, devido à grande gama de processos geológicos a que foram submetidas. Este fator torna os processos de lavra uma tarefa complexa, tendo em vista a série de litotipos encontrados e a forma intercalada como estes se dispõem. Segundo RIBEIRO et al. (1966), na região de Caieiras figuram os mármore, havendo o desenvolvimento de produtos de metamorfismo de contato, citando-se: silicatos de cálcio e magnésio (diopsídio, hornblenda, plagioclásio etc.) e quartzo a partir de calcários ou margas.

A análise detalhada através de lâminas petrográficas e difratometria de Raios-X, realizada por BORTOLOTTTO (1987), identificou como principal componente dos mármore da região de Caieiras a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). O mesmo estudo, corroborando a citação anterior, apontou como principais componentes associados minerais silicatados, como os do

grupo do anfibólio (principalmente hornblenda: $K_2(Mg,Fe,Al)_5(OH)_2[(Si,Al)_4O_{11}]_2$), piroxênio ($(Ca,Mg,Fe)_2Si_2O_6$) (em amostras próximas ao granito) flogopita ($KMg_3Al(OH)Si_4O_{10}$), olivina ($(Mg,Fe)_2SiO_4$), serpentinitos ($H_4Mg_3Si_2O_9$) e talco ($Mg_3(OH)_2(Si_2O_5)_2$). Outra constatação foi a de estes minerais estarem contidos em bandamentos, quase não havendo dispersão de forma aleatória na rocha.

Quanto à coloração, estes calcários ocorrem em tons de branco, cinza e rosa, com a presença (em maior ou menor grau) destes contaminantes silicáticos supracitados, na forma de bandamentos predominantemente esverdeadas. ALANO (1974) cita a presença de mineralizações cupríferas na região, tendo o Sistema de Falhas Irapuá como responsável pela orientação destas mineralizações. Outrossim, não é raro evidenciar-se a presença de mineralizações metálicas isoladas, associadas à falhamentos e fraturas do calcário, sendo também vinculada a estas zonas a pigmentação rosada da rocha carbonática, atribuída à presença de traços de ferro [hematita (Fe_2O_3)] (HOERLLE et al., 2010).

Figura 3: variações na coloração do calcário encontrado na área de estudo, vendo-se, da esquerda para direita, as cores branca, branca com tons esverdeados, rosa e cinza.



Fonte: autor.

Ainda no mesmo tema, a grande variação na coloração dos calcários, devido à presença destas pigmentações, é tema de discussão antiga e recorrente no cotidiano das indústrias da região de estudo. A vinculação da qualidade do calcário agrícola e da cal à cor branca, e a consequente resistência do mercado às colorações diferentes, já trouxe dificuldades às mineradoras, no entanto este paradigma parece cada vez mais próximo de ser superado. Vale ressaltar o estudo recente, publicado por FABRIS (2015), que traz uma análise comparativa da qualidade dos calcários de diferentes colorações, buscando, “desmitificar” o conceito de que apenas os mármores de coloração branca apresentam aptidão para produção de cal e calcário agrícola.

No que tange as características das rochas encaixantes, em síntese do já exposto, estas podem ser divididas em magmáticas e metamórficas, epigenéticas e singenéticas, respectivamente. O grupo das magmáticas está composto, em sua maioria, de apófises graníticas e diques e *sills* de diabásio, enquanto o grupo das metamórficas constitui-se, predominantemente, de xistos, incluídos em várias subclasses. Em ambas estas litologias, minerais silicatados são seus principais constituintes.

Levando em conta a grande gama de litologias ocorrentes na área em estudo e que as classificações e nomenclaturas adotadas para cada uma destas diferem de acordo com seu tipo (ígneas ou metamórficas), não se realizou uma discriminação mineralógica individualizada destas rochas. Todavia, em uma classificação simplificada considerando-se a coloração, estas rochas encaixantes apresentam-se em tons avermelhados e em tons escuros (com destaque para o cinza, cinza-esverdeado e preto). Na primeira classe incluem-se a maior parte das rochas graníticas somadas a algumas variedades de diabásio e, na segunda classificação, a maioria das variedades de diabásio, os xistos, as metamargas e uma fração das rochas graníticas menos félsica, rica em micas.

Fazendo-se um paralelo das variações de coloração supracitadas com a composição química destas litologias, se poderia dizer que no grupo das rochas avermelhadas tem-se preponderância de minerais silicatados ricos em sódio (Na), silício [em forma de quartzo (SiO_2)], potássio (K) e/ou ferro oxidado (FeO_2). Quanto ao grupo das rochas escuras/esverdeadas, se teria silicatos compostos com ferro (Fe), magnésio (Mg) e cálcio (Ca).

2.3 Considerações sobre os processos de lavra e produção

A empresa Dagoberto Barcellos S/A atua a mais de 100 anos no ramo da mineração de calcário, tendo iniciado suas operações no ano 1918, de forma essencialmente manual. Hoje, dispondo de eficiente processo produtivo, a empresa possui em seu portfólio quatro produtos finais: cal, calcário agrícola, argamassa e fertilizante. Considerando o processo fabril, os dois últimos produtos são fabricados a partir dos dois primeiros, respectivamente. Ou seja, a argamassa é fabricada a partir da cal e o fertilizante fabricado a partir do calcário agrícola. Neste sentido, serão considerados no presente estudo os parâmetros exigidos para cal e calcário agrícola.

Tendo em conta estes dois produtos, correlatos, mas diferentes em seu processo produtivo e nas exigências legais, o ROM que alimenta a britagem deve ser adequado à produção de cada um. Segundo a empresa, o parâmetro utilizado na seleção do minério nas

frentes de lavra é o poder de neutralização (PN), sendo empregadas na fabricação de cal rochas com PN superior a 100% e na fabricação de calcário agrícola rochas com PN entre 70 e 100% (considerando blendagem). Rochas com PN inferior são descartadas como estéril ou aproveitadas como subprodutos. A metodologia de cálculo deste parâmetro é trazida em detalhe no item 4.4.1.

Falando-se das características gerais dos jazimentos da região, há um claro alinhamento dos corpos de minério no sentido N-S, margeando a Suíte Granítica Caçapava. Tanto RIBEIRO et al. (1966), quanto BORTOLOTTI (1987) e outros autores citados, trazem a relação existente entre a contaminação encontrada nos calcários e a referida intrusão granítica, sendo esta responsável pela formação de minerais silicatados como diopsídio e outros.

Esta presença de minerais silicatados, somada às apófises graníticas e outras intrusões básicas (diabásio) e às demais intercalações singenéticas (diversos tipos de xistos citados nas bibliografias) tornam o processo de lavra destes calcários uma tarefa complexa, se comparada aos conceitos gerais de extração de calcários geologicamente bem comportados. Logo, a adoção de um processo de lavra seletiva e de constantes investimentos no aprimoramento dos processos de classificação se torna indispensável, de forma a se atenuar a diluição do minério nas frentes de lavra, garantir níveis aceitáveis de recuperação e assegurar o atendimento aos padrões de qualidade exigidos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Estado da arte

3.1.1 Breve histórico da utilização da SBS

Embora a utilização de separadores totalmente automatizados, principalmente no setor mineral, tenha ganhando espaço somente a partir da década de 1990, os registros das primeiras utilizações destes sistemas remontam a meados do século XX. A criação do primeiro separador automático, utilizado na separação de batatas através da atenuação de raios-X, é atribuída à renomada cientista polonesa Madame Curie, no entanto, essa atribuição não é consenso (SALTER & WYATT, 1991; VERAS, 2018).

O surgimento do primeiro separador utilizado comercialmente ocorreu no início da década de 1930, fabricado pela empresa americana *Electric Sorting Machine Company* (ESM) e empregado na separação de ervilhas. Todavia, falando-se no setor mineral, essa tecnologia só viria aparecer na década de 1960, atendendo à crescente necessidade de alternativas que melhorassem a recuperação de jazidas com teores cada vez mais baixos (SALTER & WYATT, 1991; NIENHAUS et al., 2014).

Por outro lado, conforme KOBZEV (2014), o engenheiro soviético chamado Bogoslovsky teria sido o responsável pelo desenvolvimento, em 1936, do primeiro tipo de classificador de luminescência de raios-X para a recuperação de diamantes. Nestes estudos, até 1990, laboratórios, em colaboração com várias empresas de prospecção geológica, obtiveram uma grande quantidade de dados a partir de vários depósitos minerais russos, permitindo que se desenvolvessem parâmetros de classificação baseados em sensores para vários tipos de minérios, carvão e minerais industriais.

Voltando a falar da ESM, tem-se como data de implantação da primeira unidade comercial de *automatic sorting* o ano de 1946, quando teria entrado em operação, no Canadá, o pioneiro separador radiométrico, baseado na concentração radioativa natural dos materiais (SALTER & WYATT, 1991). Quanto a separadores ópticos, os mesmos autores registram o surgimento de um modelo de separador fotométrico monocromático em 1952, utilizado na separação de carvão, no Reino Unido (NEWMAN & WHELAN, 1952 *apud* SALTER & WYATT, 1991).

Kelly e Hutter (K+H) foram os responsáveis pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento da técnica de separação óptica, produzindo as máquinas chamadas K+H, amplamente

conhecidas à época como modelo M6. Equipamento deste tipo operou, com lucratividade, por vários anos em mina de urânio, na Austrália (SALTER & WYATT, 1991). Da mesma forma, na década de 1970, BUTLER (1972) cita a existência de quatro separadores K+H em operação na Usina Nuclear de Eldorado (Beaverlodge – Canadá), separando minério de Urânio na faixa +3”-6” com bons resultados econômicos.

Voltando a dar crédito a SALTER & WYATT (1991), estes citam o desenvolvimento de novos separadores na década de 1980, porém com êxito questionável, em virtude da resistência à utilização da técnica e da recessão vivida pela indústria no período. Entretanto, vale destacar a inovação trazida por equipamento de separação através de micro-ondas, empregado na classificação kimberlitos, utilizando sistema de água pulsada para o descarte de partículas.

Chegando-se à década de 1990, a tecnologia de *automatic sorting* já havia conquistado espaço em quase todos os continentes, totalizando em torno de 35 máquinas em atividade ao redor do mundo. Os dados da época são apresentados na tabela abaixo (Tabela 1).

Tabela 1: quantidade e localização de equipamentos de *automatic sorting* em operação, na década de 1990.

Continente	Nº de equipamentos	Material
África	< 8	Vários tipos de rocha
América do Sul	0	-
Australásia	0	-
Ásia	1	Cobre
América do Norte	< 3	Calcário
Europa	< 12	Calcário e magnesita
URSS	5	Vários tipos de rocha
Não especificado	2-3	Sucata

Fonte: SALTER & WYATT, 1991; VERAS, 2018.

Atualmente, existem aproximadamente 775 equipamentos em operação em todo o mundo, sendo as 5 maiores empresas: TOMRA, Steinert, Redwave, Mogensen e Comex (ambas europeias), respondendo juntas por 80% do total de *sorters*. Falando no Brasil, se conhecem 10 equipamentos operando, sendo 9 na indústria mineira e 1 na indústria madeireira (COMUNICAÇÃO PESSOAL COMEX, 2018 *apud* VERAS, 2018). Neste sentido, a tecnologia de SBS surge como aprimoramento da cata manual, representando uma nova alternativa, tendo em comum o método de análise individual dos objetos, mas com capacidade de atender altas produções. Sua aplicação vai desde a pré-seleção de materiais até utilizações em controle de qualidade (NIENHAUS et al., 2014).

3.1.2 A separação baseada em sensores

A tecnologia de separação baseada em sensores ou *sensor-based separation*, vem se destacando no cenário nacional e internacional como alternativa à pré-concentração em plantas de beneficiamento, com grande potencial para redução de custos nos processos subsequentes. WOTRUBA (2006), em seu artigo “*Sensor Sorting Technology - is the Minerals Industry Missing a Chance?*”, aponta a SBS como um potencial ainda pouco aproveitado na indústria mineira.

O autor citava que a utilização de SBS em processos de reciclagem já era uma realidade, no entanto, havia muito que ser feito para aproveitar seu potencial no processamento mineral, especialmente no tocante à limitação no consumo de água e tamanho das instalações. Ainda na primeira década de 2000, atribuía a uma união entre empresas fabricantes de equipamentos, indústrias de mineração e instituições de pesquisa o desenvolvimento de classificadores e sensores para aplicações na indústria mineira.

O mesmo potencial já era apontado na década de 1990, onde SALTER & WYATT (1991) pontuaram que a utilização da Separação Baseada em Sensores (SBS) poderia resultar em diversos benefícios, como a redução de custos de capital operacional e de transporte, aumento da recuperação no beneficiamento etc. Não obstante, os autores citavam que pouco havia sido feito pelo desenvolvimento da tecnologia no período, seja isto devido a desinteresse ou a falta de sensibilidade por parte dos interessados.

MANOUCHEHRI (2003), diz que embora os novos sistemas ópticos sejam mais refinados e estejam disponíveis melhores tecnologias de mídia para reconhecimento de cores com precisão, ainda existem problemas de detecção de materiais, especialmente se há interferência no meio (poeira, por exemplo). O autor também refere que, apesar da disponibilidade de fontes de luz de alta intensidade, podem surgir problemas na distinção de pequenas diferenças de brilho, cor, matiz etc., de acordo com a posição da partícula em relação ao sensor e ao fato de apenas um lado ser visível.

Pesquisas recentes, onde se pode citar NIENHAUS et al. (2014), trazem resultados concretos de avanço da aplicabilidade desta tecnologia na mineração, apontando que, de maneira geral, estes processos tem viabilidade econômica para partículas entre 10 e 20 mm, podendo chegar até 300 mm como limite máximo. Quanto à produção, dependendo das densidades das partículas, esta pode alcançar até 300 t/h (COMEX, 2018), com consumo médio de energia de 1 a 3 kWh/t (NIENHAUS et al., 2014).

Para YOUNG et al. (2016), a SBS pode ser utilizada com grande eficácia para melhorar o beneficiamento gravimétrico através da separação seletiva ou pré-concentração do minério (ROM). Entretanto, a SBS não é um substituto para o processo de beneficiamento gravimétrico. Logo, a capacidade de classificar efetivamente o material depende do quão eficaz e rápida a análise do material pode ser feita.

A utilização da separação baseada em sensores na pré-concentração de minérios de ferro e zinco, foi testada em recente trabalho realizado por YOUNG (2017) demonstrando ser possível aumento nos teores de ambos os metais analisados. No caso do ferro, o concentrado atingiu percentual de 60% de Fe, tornando aproveitáveis 46% da alimentação que era considerada rejeito pela empresa estudada. No caso do zinco, foi possível elevar o teor do metal a valores acima dos 27%, com recuperação de 93% do minério alimentado.

VERAS (2018) analisou a afinidade dos sensores óptico e de raios-X à detecção de minério portador de elementos de terras raras (xenotima). O autor cita em seu estudo restrições à aplicação do sensor óptico, no entanto define o sensor de raios-X (DE-XRT) como de forte afinidade a detectar elementos de terras raras (ETR), para o caso investigado. O estudo analisa a aplicação de uma rotina de separação dividida em vários estágios, obtendo, ao fim do processo, recuperações metalúrgicas da ordem de 94% para ETR leves e 96% para ETR pesados.

Publicação de DOS SANTOS et al. (2017) trouxe uma análise preliminar da aplicabilidade dos sensores de Raios-X e câmera CCD à seleção de minério de calcário da região de Caçapava do Sul. O estudo, embora realizado em um universo limitado de amostras, apresentou resultados positivos, principalmente no que tange ao emprego do sensor óptico, onde houve 100% de eficiência na separação minério vs. estéril. Todavia, a utilização de Raios-X mostrou-se com pouca afinidade para o minério em estudo.

No mesmo sentido, a pesquisa realizada por KUERTEN (2017) testou a utilização do DE-XRT na pré-concentração de carvão mineral em Moçambique, como alternativa à otimização da jigagem. O estudo testou várias hipóteses, como a influência do posicionamento do material na correia transportadora, a interferência da forma na classificação, entre outras. O estudo concluiu haver possibilidade de redução da ordem de 10% no teor de cinzas do ROM.

Quanto à análise de desempenho ou performance de separadores, o estudo realizado por GÜLCAN & GÜLSOY (2017), traz importantes considerações acerca do tema. Tendo realizado simulações de separação contemplando vários tipos de minério, os autores exploram os diferentes graus de contraste entre cada um destes minérios e suas respectivas gangas e a influência da granulometria da alimentação e da variação nos níveis de tonelagem horária alimentada. Os parâmetros utilizados pelos autores para análise da performance, no entanto, foram estabelecidos por FAWCETT (2006) e OOMS et al. (2010).

3.2 Sensores

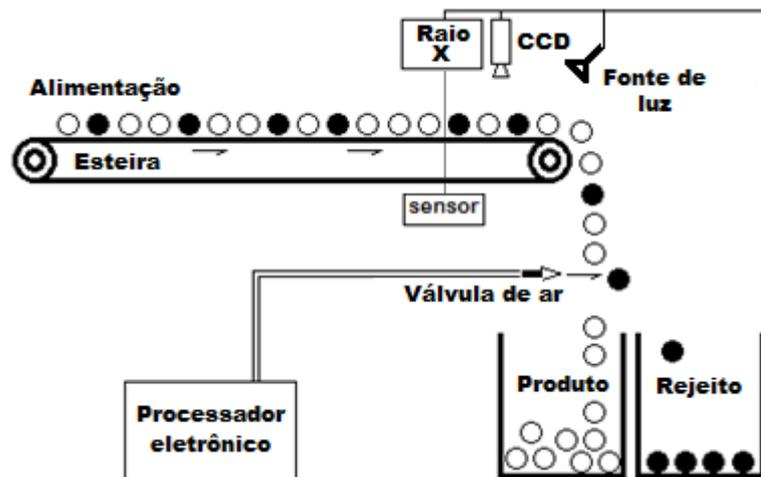
Vários são os tipos de sensores empregados nos mais diversos sistemas de separação, somente NIENHAUS et al. (2014) cita sensores de raios-X, laser, ópticos, imagem térmica, radar etc. A escolha do sensor a ser aplicado, por sua vez, depende das características de contraste a serem exploradas, ou seja, o critério que irá diferenciar minério de estéril, produto de rejeito, respectivamente. Neste sentido, SALTER & WYATT (1991) definem dois critérios a serem atendidos para que seja possível a classificação binária:

- I) a fração produto deve ser suficientemente liberável da fração rejeito em tamanho ainda apto a ser tratado pela máquina classificadora e
- II) ambas as frações devem ser confiavelmente identificáveis por algum meio (sensor), dentro do tempo disponível para exame pela máquina.

Assim, a resposta do material pode se manifestar através de um ou de muitos dos diferentes tipos de captosres utilizáveis. Falando-se de captosres que utilizam radiação, dependendo do minério a ser processado, alguns espectros de onda são mais eficazes em distinguir características do material do que outros.

Logo, se tem equipamentos de triagem que usam frequências que vão dos raios-X à luz visível e podem ser aplicados à maioria dos minerais e metais atualmente conhecidos (YOUNG e al., 2016). Citando equipamentos de laboratório, COMEX (2018) apresenta possibilidade dos sensores de raios-X, câmeras 3D, óptica, infravermelho e ultravioleta e magnético equipando um mesmo *sorter*. A ilustração abaixo (Figura 4) demonstra o esboço básico de funcionamento de um *sorter* genérico, dotado de dois sensores.

Figura 4: layout de equipamento de separação genérico, mostrando sensores que podem ser utilizados e os principais componentes da máquina.



Fonte: autor.

Vale destacar que, conforme já apontado por YOUNG et al. (2016), a rigor, estes métodos tem potencial para servirem como importantes ferramentas de pré-concentração, reduzindo volumes de rejeito inseridos em processo subsequentes e, conseqüentemente, seus custos. Entretanto, não devem ser considerados como seus substitutos.

3.2.1 Sensor de raios-X

A tecnologia de separação baseada na análise da densidade atômica, através de sensores de transmitância de raios-X de dupla energia (DE-XRT), vem se tornando cada vez mais viável (YOUNG et al., 2016). Através da utilização de radiações, as tecnologias de SBS operam sem contato direto com os objetos, portanto não são destrutivas. Este fato traz vantagens de como a dispensa de contato sensor-alimentação e a possibilidade de análise de vários objetos simultaneamente (NIENHAUS et al., 2014).

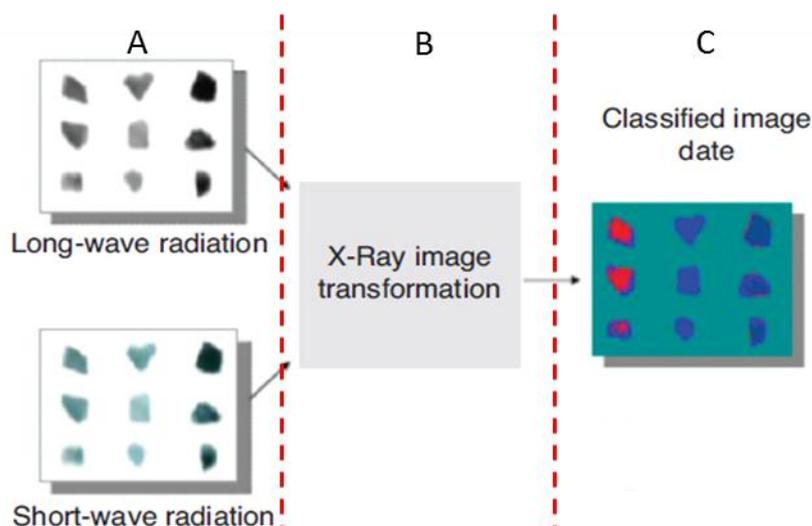
Ainda segundo o mesmo autor, um sensor pode ser representado por um conjunto de componentes, que pode ser chamado de unidade sensora, composta de um emissor (fonte de radiação) e de um detector. Para poderem adequadamente coletar e conduzir a radiação, emissores e detectores são geralmente equipados com lentes, espelhos e filtros.

Como citado, a radiação parte de um emissor diretamente para um objeto e, após a interação, a emissão resultante é medida pelo detector. Detectores medem a intensidade ou a variação de intensidade, bem como a distribuição espacial das emissões (NIENHAUS et al., 2014).

A transmissão de raios-X de dupla energia ou DE-XRT é um método capaz de identificar informações de composição interna de objetos, diferindo da maioria dos métodos que analisam características superficiais. Com a capacidade de combinar medições em dois níveis de energia distintos simultaneamente (ondas curtas e longas), permite diferenciar partículas com diferentes densidades atômicas (RIEDEL & DEHLER, 2010).

Assim, o sistema sensor DE-XRT registra a interação da radiação com o material através de dois canais, de diferentes intensidades de radiação (alta e baixa energia) [Figura 5 (A)], desta maneira são geradas imagens em escala de cinza, onde cores escuras representam zonas mais densas e cores claras zonas menos densas. Posteriormente, através de softwares específicos, estas imagens são processadas [Figura 5 (B)] gerando uma única imagem em uma escala de cores hierárquica (falsa-cor) [Figura 5 (C)] (KETELHODT & BERGMAN, 2010).

Figura 5: conversão das imagens obtidas nas duas intensidades do DE-XRT à imagem em falsas-cores.



Fonte: adaptado de KETELHODT & BERGMAN, 2010.

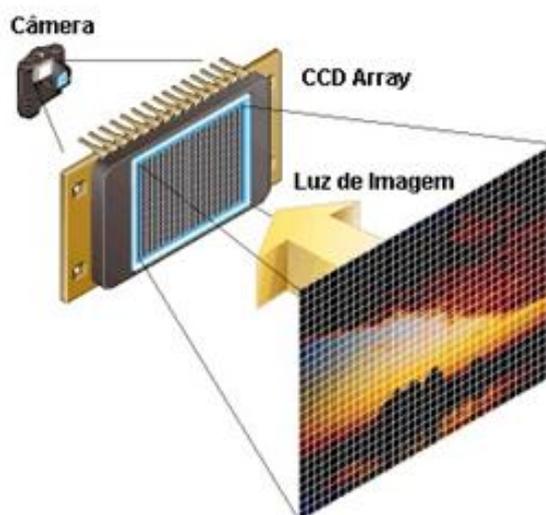
A utilização de sensores de raios-X na separação dos mais diversos materiais pode ser encontrada. Apesar de nos últimos anos o desenvolvimento de várias tecnologias de beneficiamento a seco, tais como jiques e separações em leito fluidizado terem se mostrado eficientes na otimização dos processos de beneficiamento de carvão, a evolução do setor de SBS, segundo NIENHAUS et al. (2014), adicionou uma oportunidade para beneficiamento eficiente deste produto. Noutro estudo, SHEMYAKIN et al. (2015), demonstrou que a utilização de raios-X na separação bauxita/calcário se se mostrou bastante eficiente, tendo sido estudadas várias faixas granulométricas.

3.2.2 Sensor óptico

A tecnologia de sensores visuais (VIS – *visual image sensors*) trabalha dentro da faixa de onda do espectro sensível à visão ao olho humano (visível) (390-780nm). Provido de uma área foto-sensitiva, ao interagir com as diferentes intensidades de luz refletidas por um determinado objeto, o sensor gera sinais elétricos mensuráveis. A partir destes sinais elétricos, adequadamente temporizados, é gerada uma imagem discretizada. Tais dispositivos, que operam em combinação com os sistemas ópticos, são denominados câmeras digitais (NIENHAUS et al. 2014).

Estas câmeras utilizam um dispositivo chamado CCD (*charge coupled device* – dispositivo de carga acoplada) que atua como se fosse o filme fotográfico (Figura 6). Alcançam resoluções de 640x480 até milhares de pixels. Atualmente, já existem câmeras dotadas de tecnologia CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) como sensores. Este sistema adota a mesma tecnologia de outros semicondutores usuais, tornando os custos menores (SCURI, 2002).

Figura 6: layout de câmera CCD.



Fonte: UFJF, 2018.

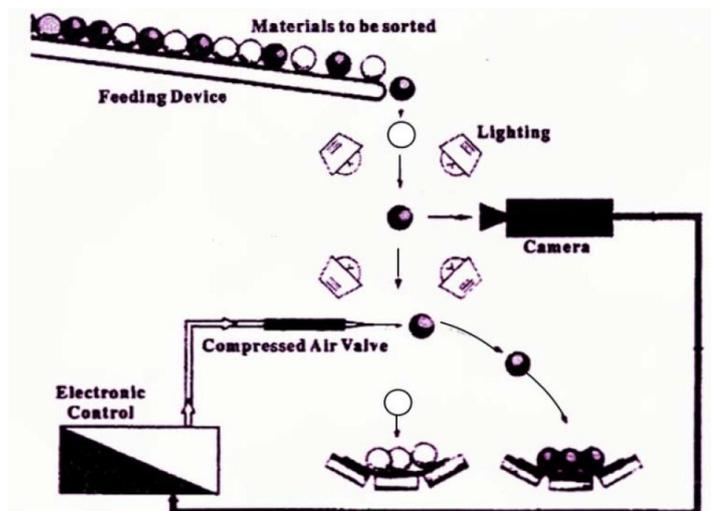
Segundo YOUNG et al. (2016), a câmera CCD tem se mostrado um dos sensores mais amplamente empregados na SBS, tendo aplicabilidade a uma vasta gama de minérios. As imagens geradas são compostas de um modelo de cores, sendo o RGB (*red, green and blue*) o modelo mais comumente utilizado. Este sistema é composto das três cores primárias: vermelho, verde e azul.

Essas cores são responsáveis pela visão aditiva, onde a intensidade total é aumentada pela adição de cores. Assim, quando são somadas estas três cores primárias tem-se o branco como cor resultante, enquanto na ausência destas se tem o preto (NIENHAUS et al., 2014). No que se refere à interpretação destas informações por sistemas computadorizados, estes equipamentos somente são capazes de armazenarem *bits*, ou seja, informações individualizadas/discretizadas que podem ter valor igual a 0 ou 1. Segundo SCURI (2002), cada cor pode ser armazenada na memória do computador como um conjunto de 8 *bits*, que equivale a 1 *byte*. Assim, cada cor pode assumir 2^8 ou 256 valores diferentes de intensidade, variando de 0 a 255.

Conforme ERGÜN et al.(2014), dependendo da natureza do depósito, a classificação óptica pode ser utilizada para pré-concentração ou para obtenção de um produto final de qualidade para muitos minerais, tais como: magnesita, calcário, quartzo, feldspato, carvão, bário, cobre etc. A aplicação de sistemas de classificação desta natureza, sem qualquer dúvida, traz uma série de vantagens possíveis em muitas operações de mineração. Nos últimos anos, houve uma série de publicações que cobrem este tema (BOSLING et al., 2014).

Quanto ao funcionamento do equipamento, segundo ERGÜN et al., (2014), um classificador tem quatro componentes básicos: um sistema de apresentação de alimentação, um sistema sensor, um sistema de computação e um sistema de separação de material (Figura 7). Aplicações e estudos mostram que a aplicabilidade de classificação óptica depende dos fatores de tamanho de partícula, da condição da superfície, da alimentação correta, da fonte luminosa etc. Normalmente, a proporção da diferença entre a partícula maior e a menor deve ser de, no máximo, 3:1.

Figura 7: equipamento de separação por câmera com seus componentes básicos.



Fonte: ERGÜN et al. (2014).

Outra importante questão, conforme KOLACZ (2014), é o condicionamento do material antes da alimentação para o SBS, que deve estar o mais livre possível de impurezas em sua superfície. A lavagem é o método mais tradicional de limpeza destes materiais, entretanto, isto pode ser um problema se houver restrições à umidade em processos subsequentes ou mesmo se o material não puder ser molhado por questões intrínsecas a este.

Em cada caso, ainda citando o mesmo autor, o classificador é apenas uma única parte de uma solução econômica completa. Em primeiro lugar o material de alimentação tem de ser analisado e descrito em detalhe. Isso vai trazer a primeira ideia quanto ao tipo apropriado de classificador a ser utilizado e como aplicá-lo. Sem esta análise, nem mesmo estimativas aproximadas de qualidades de produtos ou valores de recuperação podem ser feitos.

3.2.3 Análise da performance

Quanto à análise da performance de separadores, os conceitos utilizados para representação gráfica destes índices são descritos em detalhe nas publicações de FAWCETT (2006) e OOMS et al. (2010), que demonstram a possibilidade de utilização de técnicas já empregadas noutras classificações binárias para a análise de desempenho de separações por sensores. Dentre estes índices figuram: acurácia, precisão, especificidade, sensibilidade, verdadeiros/falsos-positivos/negativos, dentre outros. É digno de nota, dando crédito aos mesmos autores, que estes indicadores estão relacionados à chamada matriz de confusão, que, nada mais é do que uma forma de representação do balanço de massas obtido na separação.

Falando-se dos índices de especificidade e sensibilidade, vale destacar que estes são os indicadores utilizados na construção do chamado gráfico ROC (*receiver operating characteristics* ou, em tradução livre, característica de operação do receptor). Segundo GÜLCAN & GÜLSOY (2017) esta é uma ferramenta frequentemente utilizada na análise de desempenho de classificadores binários, através de representações gráficas, seja para testarem-se classificadores diferentes ou a eficácia de uma única separação.

GÜLCAN & GÜLSOY (2017), empregaram estes indicadores na análise de desempenho de separação de magnesita, quartzo, lignita, hematita, minério de cobre e amostras de minério de ouro. Foram simulados cenários de separação em diversas faixas granulométricas, indo desde -50+9,5 mm até -150+18 mm, tendo ainda sido simuladas variações nos níveis de tonelage horária alimentada. Como principais conclusões, os autores citaram que as amostras de maior contraste minério vs. rejeito (ex. magnesita e quartzo) tiveram melhores resultados do que amostras de contraste moderado (lignita e hematita) ou baixo (cobre e ouro). Outra constatação foi a redução na eficiência de classificação ao passo que a taxa de alimentação foi aumentada.

3.3 Amostragem

3.3.1 Amostras representativas

O processo de amostragem, como parte dos mais variados estudos, apresenta-se como etapa muito importante, uma vez que a representatividade de todo o trabalho dispendido posteriormente e seus resultados dependem desta etapa. Neste sentido, GOES et al. (1991), p. 4, conceitua:

”Amostra é uma quantidade representativa do universo que se deseja amostrar. O método de retirada da amostra deve garantir que ela seja representativa desse universo, no que diz respeito ao(s) parâmetro(s) de interesse. Normalmente uma amostra deve ser composta pelo maior número possível de incrementos”.

A garantia da representatividade de uma determinada amostra torna-se ainda mais difícil quando tratamos de grandes populações, como é o caso da mineração, onde se costuma tratar de milhões de toneladas. Conforme SILVA (2014), o desenvolvimento de um protocolo amostral é indispensável quando se objetiva a obtenção de uma amostra representativa com massa substancialmente inferior à da população a ser estuda.

Num conceito generalista, NAPIER-MUNN (1996) estabeleceu que uma amostra pode ser considerada representativa quando todos os componentes da população a ser representada têm a mesma chance de serem selecionados para compô-la. A decisão pelo tamanho desta amostra, por sua vez, está ligada às questões econômicas (custos de coleta e processamento da amostra) e o nível de confiabilidade exigido.

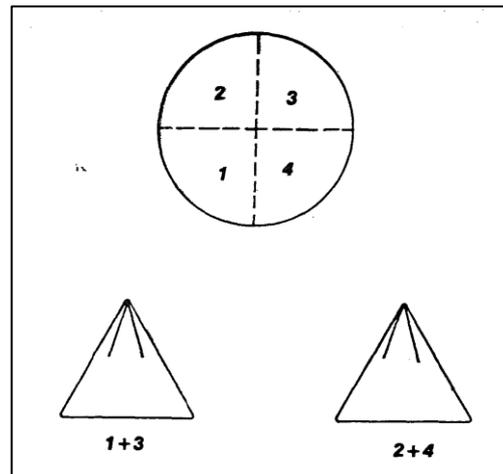
Uma das metodologias de cálculo da representatividade de uma amostra foi proposta por Pierre Gy e exige uma alta disponibilidade de informações, podendo falhar, caso a variabilidade não siga uma distribuição normal, ou se for erradamente estimada a partir de poucas informações (GOES et al., 1991). Neste contexto, o mesmo autor cita a utilização de métodos alternativos, como a Tabela de Richards, que podem se usados em situações de amostragem onde se tem poucas informações acerca da população a ser representada.

A Norma Mercosur NM 26:2009 (ANM, 2009), traz diretrizes para amostragem de agregados, indicando medidas para amostragem em pilhas de agregados para construção civil. Segundo a norma, na amostragem em pilhas é muito difícil assegurar a obtenção de amostras representativas devido à ocorrência de segregação do material mais grosso que permanece na face exterior da pilha, sendo necessário estabelecimento de um plano de amostragem para cada caso específico.

Conforme NAPIER-MUNN (1996), para materiais grossos, a massa de amostra necessária determinada por métodos estatísticos se torna impraticável, fazendo com que métodos alternativos tenham que ser utilizados. Neste sentido, estudo realizado por SILVA (2014) analisou a granulometria de ROM de minério de ferro, com auxílio de softwares de imagem. Como amostra do material desmontado em frente de lavra, a autora se valeu do material carregado aleatoriamente na caçamba de um caminhão fora de estrada, que, após ser basculado em área segura, teve o conteúdo da carga manejado e quarteado com o uso de retroescavadeira.

O processo de homogeneização e o quarteamento de amostras, para GOES et al. (1991), é imprescindível, devendo ser observado em qualquer programa de amostragem. A forma de quarteamento mais citada é o método da pilha cônica, onde se prepara uma pilha de material em forma de tronco de cume e divide-se em quatro setores iguais. O quarteamento é feito formando-se duas pilhas cônicas (Figura 8), tomando-se para a primeira os setores 1 e 3, e para a segunda, os setores 2 e 4. Caso seja necessário dividir ainda mais a amostra, toma-se uma destas pilhas e repete-se a operação (GOES et al., 1991).

Figura 8: esquema do método de quartejamento por pilha cônica.



Fonte: GOES et al., 1991.

3.4 Emprego de *drone* em atividades geológico-mineiras

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT), amplamente conhecidos como *drones*, vem se tornando cada vez mais comum na rotina das atividades de geologia e mineração. Neste contexto, a revista MINÉRIOS & MINERALES (2018), em seu Editorial, cita caso de mineradora que teve grande sucesso na utilização destes equipamentos como ferramenta às medições topográficas, monitoramento de operações, inspeções sobre plantas etc.

Ainda no mesmo sentido, J. MENDES (2018) fala das vantagens em termos de tempo e segurança obtidas com a utilização de *drones*, citando uma vasta gama de aplicações do equipamento dentro da topografia de mina. Como produtos, o mesmo autor aponta a obtenção de ortofotos, nuvem de pontos e modelos digitais de superfície de alta qualidade.

GUADAGNIN et al. (2017) situa o emprego de *drone* como alternativa ao estudo de geologia estrutural e tectônica, demonstrando a utilização da técnica de modelagem virtual de afloramento (MVA) em pedreira de rochas sedimentares. Segundo o mesmo autor, a ferramenta permite que se visualize, digitalize e descreva aspectos geométricos e cinemáticos de estruturas geológicas detectadas, bem como a interpretação dos mecanismos que atuaram na deformação.

3.5 O calcário

3.5.1 Considerações gerais

As rochas carbonáticas podem ser classificadas de várias formas, de acordo com sua composição. Segundo DOMINGUES (2011), as principais metodologias de classificação de rochas carbonatadas foram propostas por FOLK (1959), DUNHAM (1962), EMBRY e KLOVAN (1971), LUCIA (1983) e RIDING (2002).

Estes métodos são baseados tanto em parâmetros de formação quanto composicionais e estruturais das rochas, levando em conta metodologias extensas que contemplam o preenchimento de tabelas, a análise de diagramas etc. Para a região de Caçapava do Sul, vários trabalhos existentes empregam o termo genérico calcário para designar o minério extraído dos depósitos (MME, 2009; DOS SANTOS, 2017; DAGOBERTO BARCELLOS, 2016; BAPTISTA et al., 2014; entre outros), apesar de estes se tratarem de mármore.

O calcário, segundo SAMPAIO & ALMEIDA (2005), possui uma vasta gama de aplicações, indo desde utilizações na construção civil e agricultura, até usos na purificação do ar, tratamento de esgotos, fabricação de vidros, tintas, cerâmicas etc. Entretanto, embora calcita e dolomita tenham utilização semelhante em vários processos, suas características devem ser consideradas. Neste sentido, a composição química da rocha para cada aplicação deve levar em conta os teores de: CaCO_3 , MgCO_3 e a quantidade máxima de impurezas que pode ser tolerada (SAMPALIO & ALMEIDA, 2005).

3.5.2 Principais aplicações

Tratando-se de calcário para produção de corretivo de acidez do solo, a Instrução Normativa nº 35/2006, da Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário (BRASIL, 2006), traz as garantias físicas e químicas que devem ser observadas na produção de corretivos de acidez. Quanto à natureza física, estes produtos deverão apresentar-se em pó, caracterizado como produto constituído de partículas que devem passar 100% em peneira de 2 mm (ABNT nº 10), no mínimo 70% em peneira de 0,84 mm (ABNT nº 20) e no mínimo 50% em peneira de 0,3 mm (ABNT nº 50).

No que tange a natureza química, os valores mínimos a serem obedecidos, segundo a mesma Instrução, são apresentados na Tabela 2. Vale ressaltar que, dos produtos listados na tabela, apenas calcário agrícola é produzido pela empresa estudo.

Tabela 2: garantias mínimas exigidas aos corretivos de acidez do solo (valores mínimos).

Corretivo de acidez	PN (%E CaCO₃)	%CaO + %MgO	PRNT
Calcário agrícola	67	38	45
Calcário agrícola calcinado	80	43	54
Cal hidratada agrícola	94	50	90
Cal virgem agrícola	125	68	120

Fonte: adaptado de BRASIL (2006).

Quanto aos conceitos, poder de neutralização (PN) expressa a capacidade potencial do corretivo em neutralizar solução ácida de HCl 0,5 M, a quente, sendo a capacidade obtida expressa em teor de neutralizante equivalente ao carbonato de cálcio (% ECaCO₃) presente na amostra (ALCARDE & RODELLA, 1996). O poder relativo de neutralização total (PRNT), por sua vez, representa o conteúdo de neutralizantes presentes em corretivo de acidez, expresso em equivalente de Carbonato de Cálcio puro (% ECaCO₃), que reagem com o solo no prazo de 3 meses (BRASIL, 2006).

No que diz respeito à produção de cales para construção civil, as normas ABNT NBR 6453:2003 e ABNT NBR 7175:2003 estabelecem, respectivamente, requisitos para cal virgem e cal hidratada. Os valores são apresentados nas tabelas abaixo (Tabela 3 e Tabela 4), sendo considerados, por serem produzidos na empresa, cal virgem comum (CV-C) e cal hidratada CH-II.

Tabela 3: valores de ordem química exigidos à produção de cal virgem, onde CV-E: cal virgem especial; CV-C: cal virgem comum e CV-P: cal virgem em pedra.

Compostos	CV-E	CV-C
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 6,0%	≤ 12,0%
Óxidos totais na base não volátil (CaO _{total} +MgO _{total})	≥ 90,0%	≥ 88,0%
Água combinada	≤ 3,0%	≤ 3,5%

Fonte: ABNT NBR 6453:2003.

Quanto à cal hidratada temos:

Tabela 4: valores de ordem química para cada um dos tipos de cal hidratada.

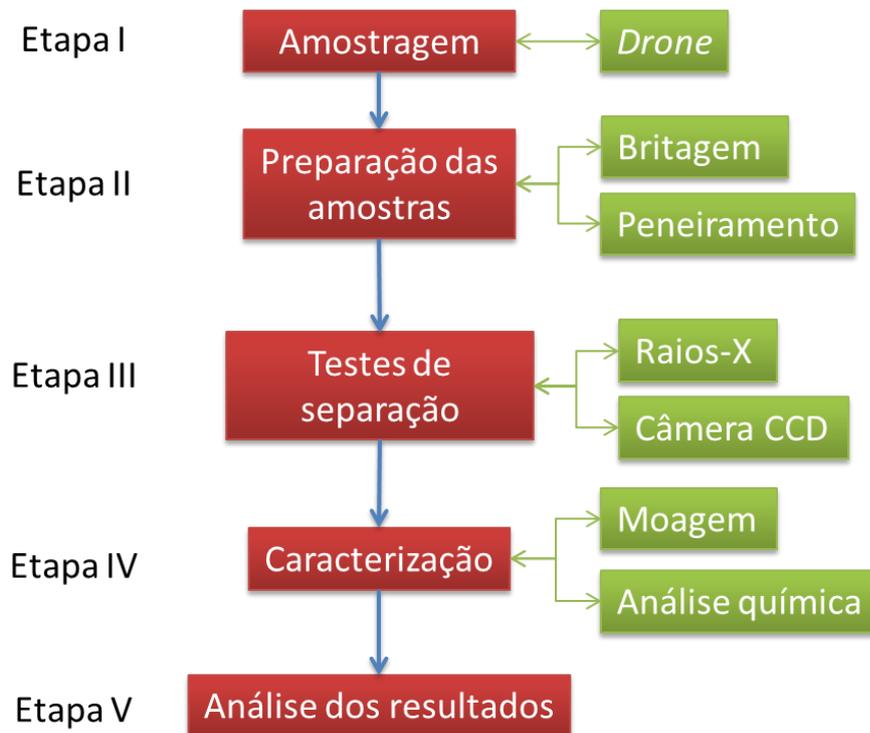
Compostos	CH-I	CH-II
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 5,0%	≤ 5,0%
CaO+MgO não hidratado calculado	≤ 10,0%	≤ 15,0%
Óxidos totais na base não volátil (CaO _{total} +MgO _{total})	≥ 90,0%	≥ 88,0%

Fonte: ABNT NBR 7175:2003

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Quanto à rotina de execução, o presente estudo foi subdividido em seis etapas, indo desde a amostragem do material até a análise dos resultados do sistema de SBS. Estas etapas podem ser observadas em detalhe no fluxograma abaixo (Figura 9).

Figura 9: fluxograma das etapas de realização do estudo.



Fonte: autor.

4.1 Etapa I - Amostragem

4.1.1 Amostragem do ROM

No contexto do presente estudo, com vistas à realização de uma análise representativa da tecnologia de SBS, considerou-se a necessidade de coleta de amostra que contemplasse todas as variantes de minério e estéril, obedecendo as suas respectivas proporções. Logo, considerando o exposto nos itens 2.2 e 2.3, este cenário consiste num universo de três classes de minério e duas de estéril, tendo a coloração como critério. Este universo, em síntese, consiste na divisão do material considerado minério em calcário branco (CB), calcário cinza (CC) e calcário rosa (CR) e do estéril em estéril-1 (E1) e estéril-2 (E2).

Frente a esta heterogeneidade do depósito, a adoção da metodologia tradicional de coleta de amostras de ROM na saída do britador foi considerada insegura, uma vez não havia

garantia de que todas as variedades de minério e estéril conhecidas nas frentes de lavra estivessem presentes. Isto se deve ao fato de ser operacionalmente impraticável a realização do carregamento simultâneo de todas as classes de minério num mesmo momento, devido à disposição espacial destas na jazida. Assim, nos tópicos a seguir, apresentar-se-á a metodologia amostral adotada para tal situação.

4.1.1.1 Determinação das proporções de minério e estéril no ROM

Seguindo o objetivo de se ter uma amostra de ROM que contemplasse todas as variantes de minério e estéril e suas proporções na jazida, esta tarefa, em primeira impressão, se resumiria na análise dos volumes de cada um dos litotipos determinados nas estimativas de recursos e reservas da empresa. Porém, estas estimativas por si só não se mostraram suficientes, uma vez os modelos até então existentes consideravam um rótulo único para minério, considerando teores, mas não levando em conta as variações de coloração.

Neste cenário, sendo estas variantes identificáveis diretamente nas frentes de lavra, viu-se como alternativa a realização de uma modelagem de imagens em 3D, também denominada MVA (modelo virtual de afloramento). Esta tarefa foi viabilizada com apoio de uma equipe composta de dois professores dos cursos de geologia e tecnologia em mineração, e de aluno de graduação do curso de geologia, ambos da Unipampa, da forma como se apresenta nos tópicos abaixo.

4.1.1.1.1 Coleta de imagens

Visando a obtenção do modelo tridimensional das frentes de lavra (ou MVA), foram realizadas duas aquisições de fotografias aéreas distintas, através de *drone* DJI, modelo Phantom 4, com câmera FC330 (3.61mm) acoplada. O planejamento dos voos, em ambas as aquisições, foi realizado através do software Pix4D, que permite o ajuste das linhas de voo de acordo com a variação da superfície do terreno, mantendo assim a resolução (GSD - *Ground surface distance*) homogênea em todo o modelo.

A primeira aquisição, gerada com menor resolução/menor altura de voo, foi realizada com o objetivo de se obter um modelo digital de elevação (MDE) preliminar, para ser utilizado como base na segunda coleta de imagens. Assim, nessa etapa, foi utilizado MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 m.

Na segunda etapa, a partir do MDE gerado na primeira aquisição, procedeu-se a aquisição de fotografias aéreas de maior resolução. Para tanto, a aquisição foi realizada ao

longo de 19 linhas de voo na direção Leste-Oeste (Figura 10) e 5 linhas de voo na direção norte-sul (Figura 11). O primeiro conjunto de linhas foi subdividido em 3 etapas de voo individuais, enquanto o segundo foi realizado em 1 único plano. Os parâmetros de aquisição utilizados foram:

- ✓ GSD (Ground surface distance) = 1,5 cm;
- ✓ Velocidade=3,5 m/s;
- ✓ Sobreposição dos estereopares¹ na direção da linha de voo=80%;
- ✓ Sobreposição dos estereopares entre as linhas de voo=50%;
- ✓ Ângulo da câmera=45° e
- ✓ Altura de voo=35 m.

Figura 10: interface do *software* Pix4D, demonstrando o plano de voo das 19 linhas Leste-Oeste, os pontos em vermelho representam os 3 locais de pouso/decolagem do equipamento durante a realização dos voos.



Fonte: autor.

¹ Dupla de imagens (geralmente aérea) onde a mesma área é retratada em diferentes perspectivas através de sobreposição.

Figura 11: interface do software Pix4D, demonstrando o plano de voo das 5 linhas norte-sul, o ponto em vermelho representam os local de pouso/decolagem do equipo. A janela mostrada no canto inferior direito ilustra a trajetória do *drone* em relação ao terreno imageado.

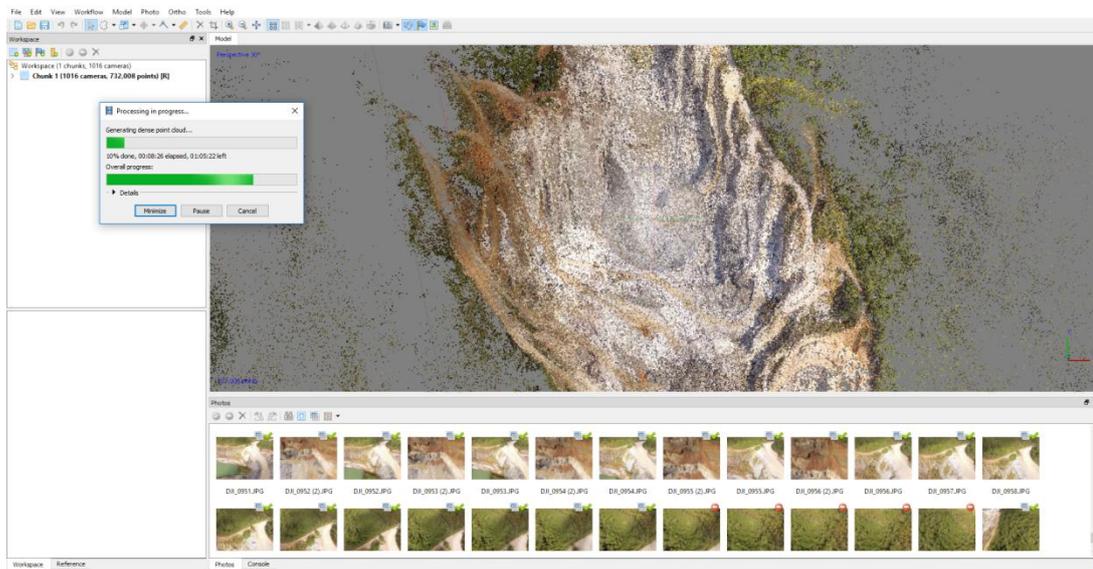


Fonte: autor.

4.1.1.1.2 Obtenção do modelo 3D (MVA)

O MVA das frentes de lavra foi construído utilizando o *software* Agisoft Photoscan, a partir das imagens coletadas conforme descrição acima. Esta construção se deu em 5 etapas básicas, utilizando as ferramentas do *software* com parâmetros *default*: geração de (1) nuvem de pontos esparsa (nuvem de amarração); (2) nuvem de pontos densa (Figura 12); (3) superfície triangulada texturizada; (4) ortofotomosaico; (5) modelo digital de elevação (MDE). Vale ressaltar que cada um dos pontos que compõem estas nuvens tem consigo informações de geoposicionamento e valores de RGB.

Figura 12: interface do *software* Agisoft Photoscan durante a geração da nuvem de pontos densa.



Fonte: autor.

4.1.1.1.3 Determinação das proporções dos componentes do ROM

Após a construção do modelo 3D da área em análise, a determinação das proporções poderia ser realizada de duas formas: manualmente (pela demarcação manual das áreas das frentes de lavra pertencentes a cada classe diretamente no modelo e o cálculo dos percentuais atinentes) ou automaticamente (através da contagem automática dos pontos que se enquadrassem classes previamente estabelecidas).

Logo, seja por questões de repetibilidade ou pela própria proposta do presente estudo, fez-se opção pela determinação automática dos percentuais, o que se deu através da ferramenta de classificação por cor, disponível no software Agisoft Photoscan. Para realização desta contagem, foi levada em conta a informação RGB que cada um dos pontos gerados traz consigo, considerando a associação das informações do modelo texturizado e as informações obtidas em campo.

Antes que se passasse à etapa de classificação dos pontos, no entanto, identificou-se a necessidade de exclusão de áreas que não apresentavam rocha exposta, sob a pena de se gerar valores distorcidos para cada classe. Este procedimento teve de ser realizado manualmente, através da ferramenta de seleção do *software*, removendo do modelo estruturas como: estradas de acesso, locais com material desmontado, áreas com acúmulo de musgos, praças de trabalho etc. Vale destaque o fato de ter sido criada uma subclassificação para as zonas onde havia sombra, de forma a aumentar-se o total de pontos classificados. As classes foram definidas conforme as tabelas abaixo (Tabela 5 e Tabela 6):

Tabela 5: parâmetros adotados para definição das classes de minério e estéril nas zonas iluminadas.

Litologia	Red	Green	Blue	Tolerância	Pontos	%
Calcário rosa (CR)	217	182	174	8	14.574	0,97
Estéril-1 (E1)	115	103	90	9	134.665	8,93
Calcário branco (CB)	221	207	199	15	714.289	47,38
Calcário cinza (CC)	180	169	172	20	644.193	42,73
Total					7.074.208	
Total classificados					1.507.721	

Fonte: autor.

Tabela 6: parâmetros adotados para definição das classes de minério e estéril nas zonas não iluminadas.

Litologia	Red	Green	Blue	Tolerância	Pontos	%
Calcário branco (CB)	138	128	139	15	332.670	63,34
Estéril-2 (E2)	114	92	94	12	93.903	17,88
Estéril-1 (E1)	77	68	66	7	98.620	18,78
Total					2.254.498	
Total classificados					525.193	

Fonte: autor.

Versando sobre a classificação dos estéreis, como se pode ver acima, foram criados dois grandes grupos, tendo a coloração como critério: Estéril-1 e Estéril-2. O primeiro, denominado Estéril-1, contempla tonalidades escuras (cinza, cinza-esverdeado, preto) e abrange a maior parte das variedades de diabásio, uma fração das rochas graníticas menos félsica e rica em micas e os demais estéreis singenéticos como xistos e metamargas; o segundo, denominado Estéril-2, abrange tons rosa/avermelhados, onde se incluem a maior parte das rochas graníticas e algumas variedades de diabásio.

4.1.1.2 Coleta de amostras do ROM

A coleta das amostras foi realizada de forma manual, diretamente no material desmontado, orientada pelas zonas delimitadas nas frentes de lavra através do modelo 3D. Considerando a heterogeneidade do depósito, já abordada anteriormente, a existência de variações na composição da rocha em um mesmo desmonte é intrínseca ao processo. Logo, buscou-se realizar a coleta das amostras da forma mais coerente possível, abrangendo toda a área do desmonte e suas variações, visando garantir a representatividade de cada uma das classes de minério e estéril amostradas.

4.2 Etapa II - Preparação das amostras

4.2.1 Amostras do ROM

Considerando o objetivo de se simular o comportamento do processo de separação em diferentes situações de granulometria, limpeza da superfície e umidade do material, estabeleceu-se, por orientação da equipe técnica responsável pelo *sorter*, as faixas granulométricas e as massas requeridas para cada uma destas. Vale destacar que, devido ao número de partículas por unidade de massa ser inversamente proporcional à granulometria, foram consideradas massas menores de amostra para as granulometrias mais finas. Estes dados são apresentados na Tabela 7:

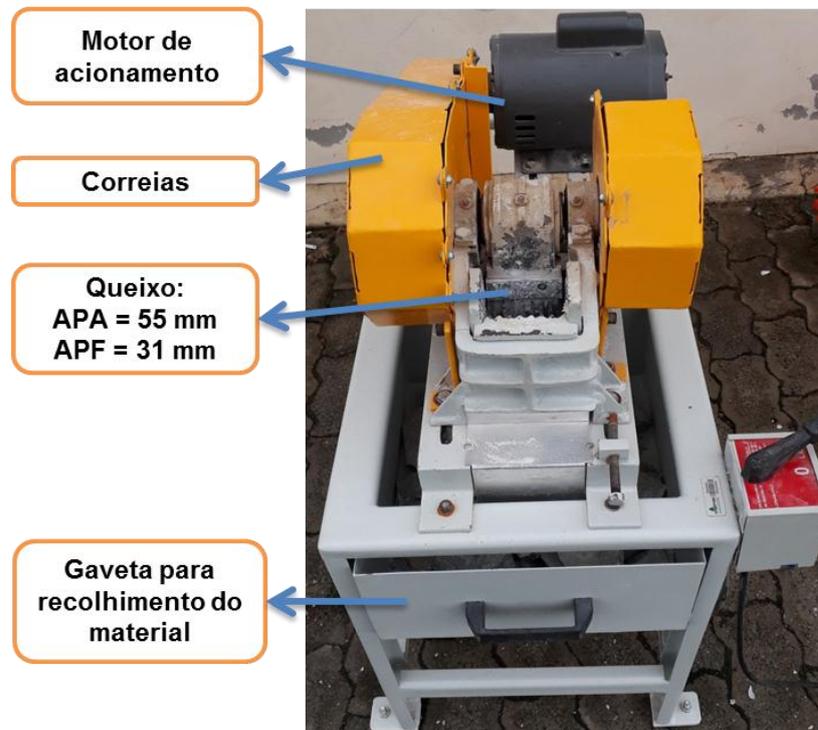
Tabela 7: demonstrativo das faixas granulométricas da amostra e suas respectivas massas.

Granulometria (mm)	Massa (kg)
-70 +50	20
-50 +25	15
-25 +9,5	5
Total	40

Fonte: autor.

O material coletado nas frentes de lavra, acondicionado em sacos devidamente identificados, foi conduzido até o LATRAM, nas dependências da Unipampa, onde passou por britagem. O equipamento utilizado foi britador de mandíbulas Solab, modelo SL – 800, regulado conforme se mostra na Figura 13.

Figura 13: britador de mandíbulas utilizado na britagem das amostras.

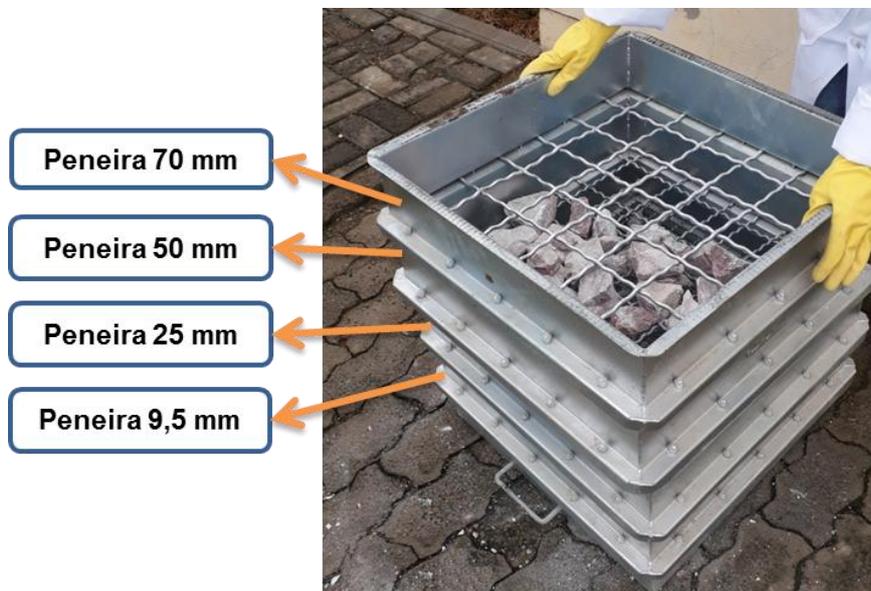


Fonte: autor.

Depois de britadas, as amostras foram classificadas em peneiras de malha de aço, através das aberturas decrescentes de 70mm, 50mm, 25mm e 9,5mm, conforme se demonstra na Figura 14. O processo foi realizado para cada uma das classes de minério e estéril citadas na Tabela 5, fazendo com que se tivesse massa suficiente de cada uma destas classes em cada faixa granulométrica estabelecida. Em seguida, conforme os percentuais definidos para composição da amostra do ROM (apresentados no item 5.1.2, Tabela 10), cada uma destas faixas e classes teve o peso ajustado até que se obtivesse uma amostra com as massas

requeridas. Os volumes restantes de cada uma destas faixas foram reservados como duplicatas.

Figura 14: peneiramento do material britado, mostrando-se as quatro malhas de peneiras utilizadas.



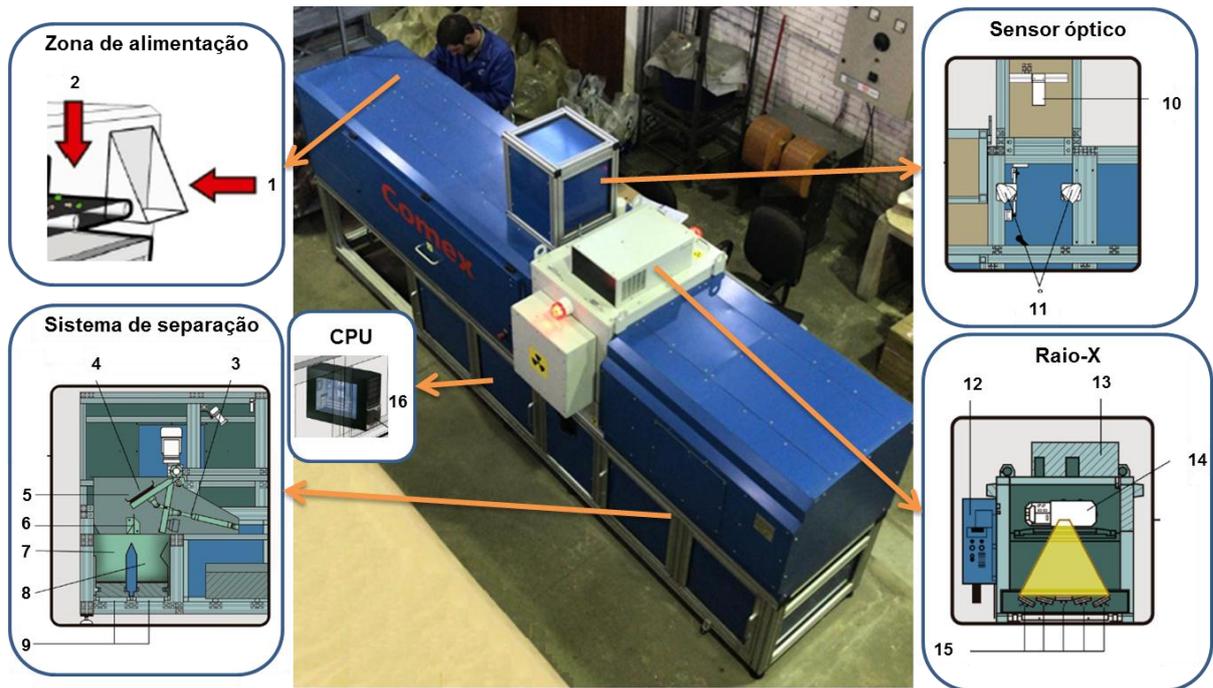
Fonte: autor.

4.3 Etapa III - Testes de separação

Seguindo o fluxograma mostrado anteriormente na Figura 9, a realização dos testes com equipamento de SBS compreende a etapa III da metodologia. O equipamento de separação (*sorter*) utilizado, este é de fabricação polonesa, fornecido pela empresa Comex (Comex Polska Sp.), modelo COMEX *Lab-Sorter* MSX-400-VL-XR-3D[®] e encontra-se instalado nas dependências do LAPROM, no Centro de Tecnologia da UFRGS (Figura 15). Vale destaque o fato de este ser o único equipamento de *automatic sorting* disponível para estudos acadêmicos, atualmente, no Brasil, aliás, um dos poucos disponíveis no mundo.

São três os tipos de sensores que equipam o *sorter*: laser, câmera CCD e transmitância de raios-X (DE-XRT). No entanto, considerando que o objetivo do presente estudo não levou em conta a separação por forma, adotaram-se somente os sensores de raios-X e óptico. A lista dos principais itens que compõem o equipamento pode ser vista na Tabela 8.

Figura 15: vista superior do *sorter*, instalado no LAPROM, UFRGS, com detalhe dos componentes.



Fonte: autor; adaptado de YOUNG (2017).

Tabela 8: lista numerada dos principais itens que compõem o *sorter*.

Item	Descrição	Item	Descrição
1	Porta de alimentação	9	Balanças
2	Esteira transportadora	10	Câmera CCD
3	Sistema pneumático	11	Luzes de LED
4	Flap para rejeição	12	Central elétrica
5	Capa de borracha	13	Condicionador de ar
6	Placa divisora	14	Fonte de raios-X
7	Caixa de rejeito	15	Detectores de varredura de raios-X
8	Caixa de produto	16	Central de processamento de dados

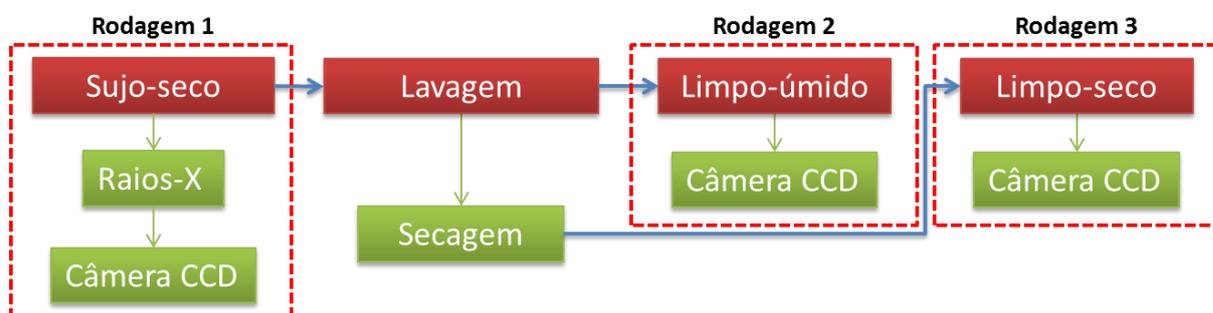
Fonte: adaptado de YOUNG (2017).

4.3.1 Calibração dos sensores

Na utilização de qualquer um destes sensores, a etapa de calibração é indispensável, sendo nesta onde são definidos os parâmetros para seleção minério vs. rejeito. Neste intento, foram escolhidos espécimes de cada uma das variantes de minério e estéril que compõem a amostra do ROM, nas três faixas granulométricas estudadas. Estas amostras foram posicionadas no interior do *sorter*, sobre a esteira de alimentação, conduzidas até a zona de detecção e analisadas através de *software* próprio do equipamento. Desta forma, definiram-se os parâmetros para produto e rejeito.

Conforme a Figura 16, a análise foi feita, inicialmente, no material sujo-seco (SS), testando-se os sensores de raios-X e câmera CCD. Após esta primeira rodagem, o material foi lavado e repetiu-se o teste com o sensor óptico para o material limpo-úmido (LU) e o material limpo-seco (LS). A opção pela adoção destas três diferentes condições de alimentação se deu visando mensurar sua influência no processo de separação. Ainda com relação à Figura 16, o porquê da realização dos testes com sensor DE-XRT ter ocorrido apenas na primeira rodagem é exposto em detalhe na seção 5.2.

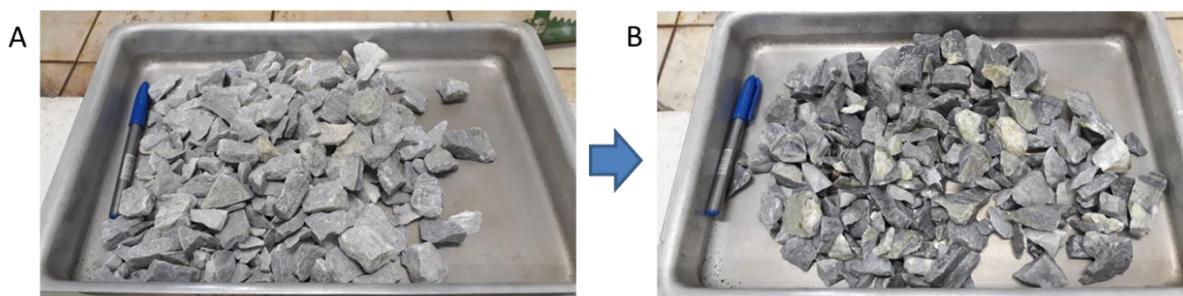
Figura 16: condições do material alimentado nas três rodagens realizadas.



Fonte: autor.

Como se tinha amostras em duplicata para cada faixa granulométrica, conforme definido no item 4.1.1, ambas foram lavadas em água corrente, com o cuidado de se eliminar da forma mais coerente possível os resíduos superficiais (Figura 17). Após esta etapa, enquanto uma das frações foi levada para secagem em estufa por 12h, à temperatura de 40°C, a outra fração ainda úmida foi testada no *sorter*.

Figura 17: exemplo de amostra de calcário cinza antes (A) e após (B) a lavagem.



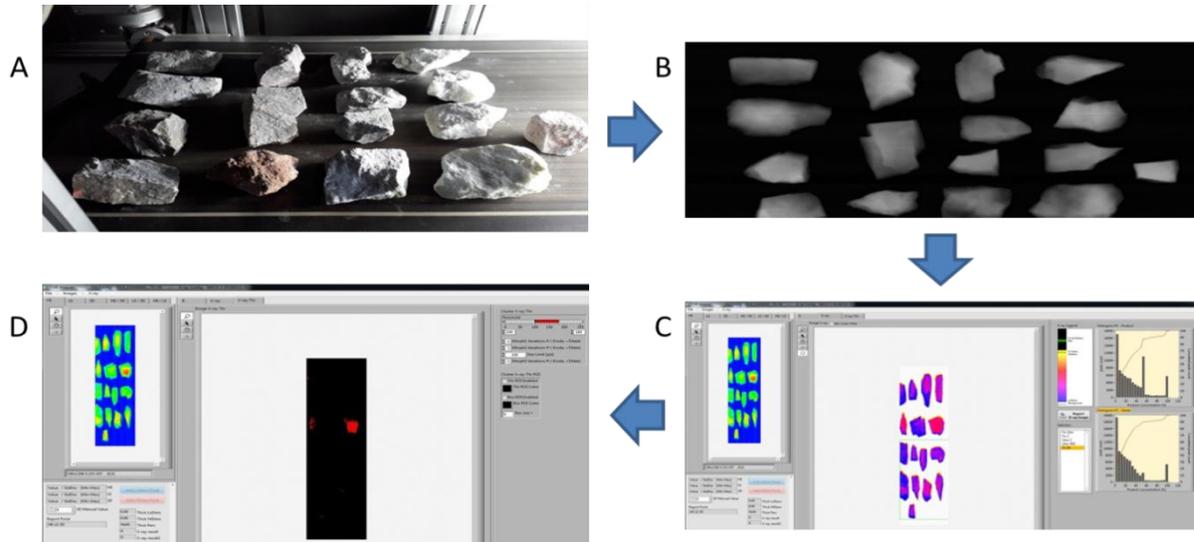
Fonte: autor.

4.3.1.1 Calibração do sensor de raios-X (DE-XRT)

A identificação das amostras através do captor de raios-X se deu pelo reconhecimento da densidade atômica das partículas, partindo-se do princípio estabelecido por JONG & DALMIJN (2003) de que diferentes densidades representam diferentes classes de materiais a

serem separadas. Assim, a calibração do sensor de raios-X para os testes foi procedida de acordo com o esquema abaixo (Figura 18):

Figura 18: esquema que demonstra os principais passos da calibração do sensor de raios-X: A) amostras no interior do equipamento, B) imagem em escala de cinza gerada pelo software, onde zonas mais claras são mais densas, C) análise das características produto vs. rejeito, vê-se histogramas de cada produto à direita, D) ajuste da faixa de densidade a ser descartada/recuperada (*threshold*).



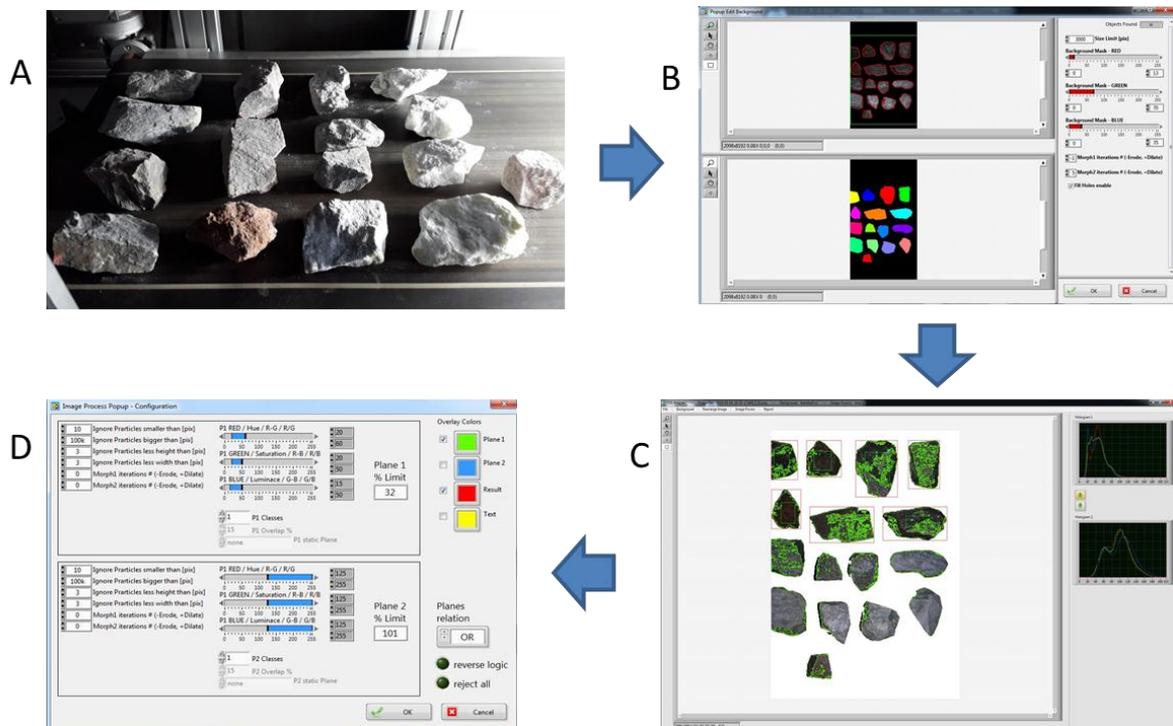
Fonte: autor.

Conforme citado anteriormente, se pode observar na imagem A da figura acima, as amostras posicionadas no interior do *sorter*. Após a leitura no sensor de raios-X, foi gerada a segunda imagem (B), onde se vê as mesmas amostras em escala de cinza, por densidade. A partir desta imagem, mediante a aplicação de efeitos de falsa-cor, foi feita a geração e análise dos histogramas (C), que serviram de base à definição da faixa de densidade de separação adotada na etapa D, denominada *threshold*.

4.3.1.2 Calibração do sensor óptico (câmera CCD)

O sensor óptico trabalha dentro da faixa do visível (comprimentos de onda entre 390 e 780 nm). Este sensor converte as intensidades de luz captadas em sinais mensuráveis eletronicamente (HOLST & LOMHEIM, 2011). Em se tratando do equipamento utilizado no presente estudo, a calibração do sensor foi realizada, basicamente, através da análise e ajuste da assinatura obtida nas cores RGB.

Figura 19: esquema que demonstra os principais passos da calibração da câmera CCD. A) amostras no interior do equipamento, B) imagem captada pelo sensor, mostrando as amostras por sobre a correia transportadora e o ajuste do background, C) geração e análise do comportamento dos histogramas de reflectância dos espectros do vermelho, verde e azul. D) janela de calibração dos parâmetros de RGB para separação (*threshold*).



Fonte: autor.

Conforme demonstrado acima, após a captura da imagem e o ajuste do *background* (B), foi feita a análise da imagem gerada a partir das amostras (imagem C), utilizando os histogramas de RGB construídos para a fração rejeito e a fração produto. Após esta análise, se fez a definição dos critérios de separação (*threshold*) através da interface do *software* demonstrada na imagem D.

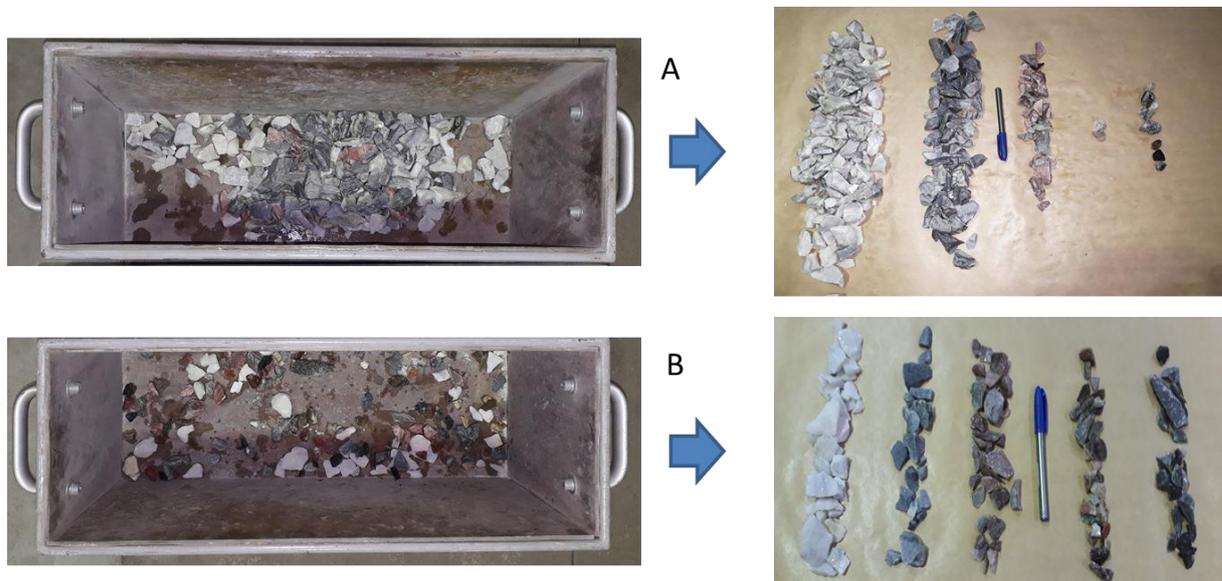
4.3.2 Realização dos testes

Para realização dos testes, depois de feita a calibração do sensor, as amostras foram inseridas uma-a-uma, na zona de alimentação do equipamento, considerando que o *sorter* possui um único atuador mecânico (*flap*) para descarte da fração rejeito, tendo-se o cuidado de dispor os espécimes da forma mais uniforme possível na região central da esteira. Conforme o proposto, de analisar-se a separação nas condições SS, LU e LS, o processo de teste foi dividido nestas três etapas.

Após a submissão de cada material ao *sorter*, as frações produto e rejeito foram coletadas das respectivas caixas do equipamento e segregadas visualmente. Logo em seguida,

foi feita a pesagem para determinar a massa de cada classe presente. O processo pode ser observado na Figura 20.

Figura 20: exemplo da coleta do material remetido a cada uma das caixas do equipamento e sua segregação conforme as classes estabelecidas, sendo produto a caixa A e rejeito a caixa B. Quanto à segregação, da esquerda para direita, tem-se CB, CC, CR, E2 e E1.



Fonte: autor.

4.4 Etapa IV - Caracterização

Um dos desafios da análise da tecnologia de SBS é o fato de ter-se a necessidade de manutenção das amostras intactas, ou seja, não ser possível a realização de uma análise dos teores dos materiais antes da classificação no equipamento. Assim, somente após a realização dos testes no *sorter*, as amostras classificadas puderam ser analisadas quanto aos teores. Igualmente, obedecendo aos parâmetros citados no item 2.3, foram consideradas como minério amostras com PN igual ou superior a 70% e como rejeito amostras com PN aquém deste valor. As análises transcorreram de acordo com o item abaixo.

4.4.1 Cálculo do poder de neutralização (PN)

De acordo com o citado por ALCARDE & RODELLA (1996) e BRASIL (2014), PN é dissolução de uma massa de corretivo de acidez numa quantidade conhecida e em excesso de solução de ácido clorídrico padronizada, fazendo com que o corretivo neutralize uma parte do ácido. O excesso de ácido será quantificado por alcalimetria, obtendo-se, indiretamente, quanto do ácido foi neutralizado pelo corretivo, por titulação com indicador.

4.4.1.1 Preparação das amostras

Após classificação macroscópica e a realização dos testes de *sorting* as amostras de cada classe, nas três granulometrias testadas, foram britadas em britador de mandíbulas marca Plangg S.A. (modelo J58), com APA (abertura na posição aberto) mínima. Em seguida, as amostras foram rebritadas em rebritador de rolo, marca Maqbrit, com APA de 1 cm e quarteadas, até que se obtivesse uma massa de aproximadamente 500g. Logo após, os materiais foram pulverizados em pulverizador marca Fritsch (modelo Pulverisette 5) durante 20 minutos cada um.

Já cominuidas, as amostras foram peneiradas em peneira de malha 50, por 5 min, de forma a se ter a granulometria requerida para análise do PN. O processo de análise é descrito em detalhe a seguir.

4.4.1.2 Determinação do PN por titulação

Após a etapa de preparação das amostras, apresentada anteriormente, as alíquotas obtidas foram analisadas na empresa tema do estudo, em laboratório próprio, licenciado pelo CRQ-RS. O procedimento foi realizado com apoio da equipe técnica responsável, obedecendo às diretrizes de BRASIL (2014).

4.4.1.3 Procedimento de titulação para cálculo do PN (BRASIL, 2014)

- I) Pesou-se, em balança de precisão, uma massa da amostra de 1 g de calcário, tomando a parte da amostra que foi secada, moída e passada em peneira de 0,30 mm (50#). Esta massa de amostra foi identificada nos cálculos como G;
- II) Transferiu-se para Erlenmeyer de 250 ml, adicionou-se 50 ml de solução de HCl 0,5 molL⁻¹ padronizada, cobriu-se com vidro de relógio e ferveu-se suavemente por 5 minutos. Esfriou-se, transferiu-se para balão de 100 ml e completou-se o volume com água. Homogeneizou-se e filtrou-se em papel filtro de porosidade média, para um recipiente seco;
- III) Pipetou-se 50 ml e transferiu-se para Erlenmeyer de 125 ml;
- IV) Acrescentou-se 5 gotas de solução de fenolftaleína e titulou-se o excesso do ácido com solução padronizada de NaOH 0,25 molL⁻¹, até o aparecimento de uma leve cor rosada do indicador. Anotou-se o volume gasto (V_b).
- V) Calculou-se o poder de neutralização (PN) do material, em percentagem em massa de CaCO₃ equivalente (%ECaCO₃), pela equação 1:

$$PN\% = 10 \left[\frac{(25 M_1) - (V_b M_2)}{G} \right] \quad (1)$$

Onde:

M_1 = concentração da solução de HCl, em molL⁻¹;

V_b = volume (ml) da solução de NaOH gasto na titulação;

M_2 = concentração da solução de NaOH, em molL⁻¹;

G = massa inicial da amostra, em gramas.

4.5 Etapa V - Análise dos resultados

4.5.1 Balanço metalúrgico

Para os cálculos relativos ao balanço metalúrgico, utilizou-se planilha eletrônica Excel, sendo usada para obtenção dos valores de recuperação do calcário no concentrado a equação 2 (PARANHOS, 2010; SILVA, 2012). Onde C=massa do concentrado, c=teor de calcário no concentrado, A=massa da alimentação e a = teor de calcário na alimentação.

$$Rec_{calcário} = \frac{C \cdot c}{A \cdot a} \quad (2)$$

Para o cálculo da razão de enriquecimento (R_e), ainda citando os mesmos autores, utilizou-se a equação 3. Onde c=teor de calcário no concentrado e a=teor de calcário na alimentação.

$$R_e = \frac{c}{a} \quad (3)$$

Quanto aos valores de PN, para cada material analisado no *sorter*, estes foram estabelecidos através de média dos valores obtidos para cada classe em cada granulometria, ponderada pela proporção de cada classe na alimentação. Os valores de PN foram obtidos conforme apresentado no tópico 4.4.1.

4.5.2 Análise da performance de separação

Seguindo o proposto por FAWCETT (2006) e OOMS et al. (2010) (item 3.2.3), a matriz de confusão apresentada na Tabela 9 traz as noções de verdadeiros-positivos (TP) e falsos-positivos (FP) e verdadeiros-negativos (TN) e falsos-negativos (FN). Por conseguinte, o somatório das parcelas TP e FP representa o total classificado como produto, enquanto TN somado à FN representa a fração rejeito.

Tabela 9: matriz de confusão.

Alimentação	Produto	Rejeito
Fração positiva	Verdadeiros-positivos (TP)	Falsos-negativos (FN)
Fração negativa	Falsos-positivos (FP)	Verdadeiros negativos (TN)
Σ	Fração produto (P)	Fração rejeito (N)

Fonte: OOMS et al., 2010; FAWCETT, 2006.

Nesta linha, através de planilha eletrônica Excel construiu-se gráficos e simulações considerando acurácia, especificidade e sensibilidade, sendo apresentadas abaixo as equações utilizadas. Vale dizer que as variáveis utilizadas nos cálculos foram extraídas da matriz de confusão.

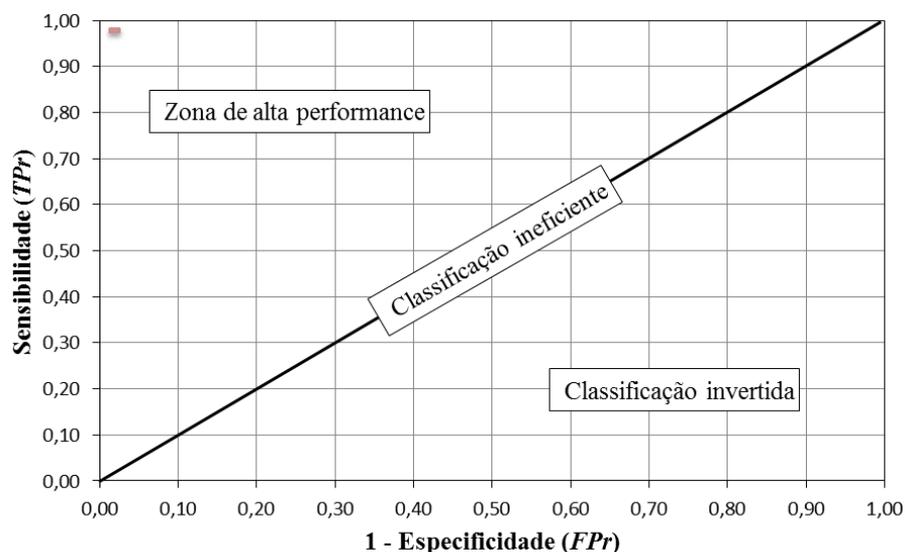
$$\text{Acurácia} = \frac{TP + TN}{P + N} \quad (4)$$

$$\text{Especificidade} = \frac{TN}{FP + TN} = \frac{TN}{N} = 1 - FPr \quad (5)$$

$$\text{Sensibilidade} = \frac{TP}{FN + TP} = \frac{TP}{P} = TPr \quad (6)$$

Conforme já citado no item 3.2.3, os dois últimos parâmetros (eq. 5 e 6), são os indicadores utilizados na construção do gráfico ROC. O gráfico foi construído de forma que se teve, no eixo das ordenadas, os valores de sensibilidade variando entre 0 e 1, sendo representativos do índice de verdadeiros-positivos (TPr). Enquanto isso, no eixo das abscissas representam-se os valores do índice de falsos-positivos (FPr), obtido por 1 – especificidade.

Figura 21: exemplo de gráfico ROC.



Fonte: adaptado de GÜLCAN & GÜLSOY (2017).

No que se refere à interpretação dos resultados, o gráfico ROC pode ser dividido em três zonas, como se vê na Figura 21. A zona superior à linha diagonal, denominada de alta performance, é onde se posicionam classificações eficientes, sendo melhores quanto mais próximas ao extremo noroeste do gráfico, onde se teria um classificador perfeito (ponto 1,0). A linha diagonal é denominada, também, de zona aleatória ou randômica, onde se situam classificações que se comportam de forma ineficiente. A zona inferior a esta linha, por sua vez, caracteriza um processo de separação onde se tem informações úteis, mas estas estão sendo empregadas de forma inadequada ou invertidas (FLACH & WU, 2003 apud FAWCETT, 2006).

5 RESULTADOS E ANÁLISE

5.1 Amostra representativa das classes

5.1.1 Modelo 3D das frentes de lavra (MVA)

Considerando as etapas citadas na metodologia, a segunda captura de imagens realizada teve como base a primeira, fazendo com que se tivessem subsídios para construção do modelo virtual de afloramento (MVA) de alta resolução. Após os voos, obteve-se um banco de dados composto de 1016 imagens, que foram processadas para obtenção do modelo apresentado na Figura 22. O modelo ficou constituído da seguinte forma:

- ✓ Nuvem de pontos esparsa: 441.467 pontos;
- ✓ Nuvem de pontos densa: 23.756.454 pontos;
- ✓ Superfície triangulada texturizada: 4.751.290 faces;
- ✓ Ortofotomosaico: 3,13 cm/pixel e
- ✓ MDE: 50 cm/pixel.

Figura 22: modelo virtual de afloramento mostrando a cava compreendida no presente estudo.



Fonte: autor.

5.1.2 Composição da amostra

Conforme já abordado anteriormente, considerando o âmbito do presente estudo, a adoção da metodologia tradicional de coleta de amostras de ROM na saída do britador foi considerada insegura, uma vez que não havia garantia de que todas as variedades de minério e estéril conhecidas nas frentes de lavra estivessem presentes. Isto se deve ao fato de ser operacionalmente impraticável a realização do carregamento simultâneo de todas as classes de minério, devido à disposição espacial destas na jazida.

Logo, através do agrupamento dos pontos afins realizado no modelo 3D, conforme descrito no item 4.1.1.1, foi possível a determinação da proporção que cada classe de minério e estéril representa na composição geral das frentes de lavra, proporção a ser seguida na alimentação do *sorter*. Vale destacar, que no método utilizado se considerou exclusivamente a face exposta dos taludes, sendo desconsideradas praças, bermas e vias de acesso. A tabela a seguir demonstra as proporções obtidas:

Tabela 10: proporções para minério e estéril na composição da amostra do ROM.

Classe	Nº pontos	%
Calcário branco	1.046.959	52
Calcário cinza	644.193	32
Calcário rosa	14.574	1
Estéril-1	233.285	11
Estéril-2	93.903	5
Total	2.032.914	100

Fonte: autor.

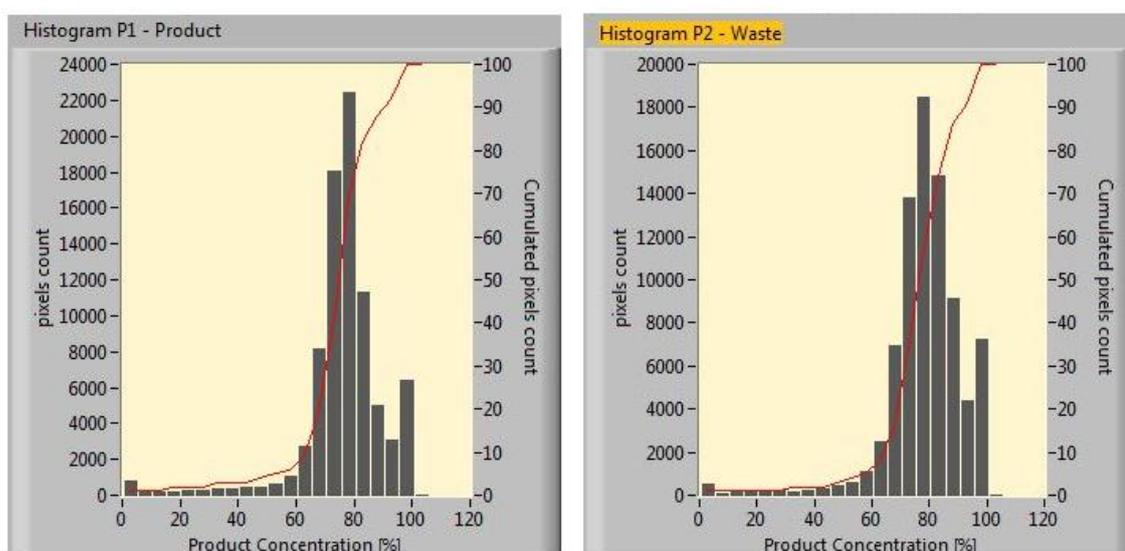
Fazendo-se um comparativo do total de pontos contido no modelo 3D vs. o número de pontos classificados, nota-se, de acordo com os valores apresentados acima, que os parâmetros adotados na metodologia conseguiram classificar 20% do total de pontos do modelo entre as classes estabelecidas. Este valor, apesar de parecer relativamente baixo, se mostrou satisfatório após a análise de várias hipóteses. Isto porque, sempre que se flexibilizava os critérios das classes, de forma a se abranger maior número de pontos, se gerava sobreposição das fases, não obstante, a adoção de uma rigidez excessiva nos parâmetros tornava a contagem de pontos ainda inferior à atual.

5.2 Sensor de raios-X (DE-XRT)

5.2.1 Calibração

Durante a etapa de calibração, realizada conforme apresentado no item 4.3.1, os primeiros resultados quanto à resposta do material ante o sensor de DE-XRT são os histogramas. O *software* do equipamento permite a geração simultânea destes dados para produto (*product*) e rejeito (*waste*) (Figura 23), de modo a que se estabeleça o parâmetro de densidade que caracteriza cada um.

Figura 23: análise dos dados do ROM no sensor de raios-X: à esquerda histograma das amostras de minério, à direita histograma das amostras de estéril.



Fonte: autor.

Considerando que o eixo horizontal dos histogramas representa a densidade relativa do material em percentual e o eixo vertical o número de pixels contabilizado, se pode perceber facilmente que a densidade dos dois materiais analisados é muito semelhante, notando-se a maior concentração dos pixels de produto e rejeito na faixa de densidade em torno de 80%. Outras ferramentas do *software* do equipamento foram empregadas na tentativa de obter-se algum incremento no contraste, entretanto, em todos os casos testados, a distribuição das frequências se deu de forma praticamente idêntica. Com isto, ficou evidente a inexistência de contraste que possibilitasse a separação das fases calcário-rejeito com o uso do sensor DE-XRT, no caso em xequ.

Apesar de não se ter realizado análises para determinação da densidade dos materiais em estudo, ao se considerarem valores teóricos estabelecidos por vários autores (ALIGARH MUSLIM UNIVERSITY, 2018; BRITANITE, 2018; SAMPAIO & TAVARES, 2005) essa

dificuldade de separação é explicável. Considerando a média dos valores encontrados nas bibliografias, a densidade do minério seria de, aproximadamente, $2,8 \text{ g/cm}^3$, enquanto os estéreis ficariam em $2,7 \text{ g/cm}^3$.

Neste mesmo sentido, trabalho de análise preliminar publicado por DOS SANTOS et al. (2017), realizado na mesma área de estudo, já havia relatado dificuldades na separação utilizando DE-XRT para o ROM, constatando um descarte bastante significativo de produto junto à fração rejeito. Sendo assim, levando em conta que o princípio básico para que se consiga realizar a separação entre dois produtos é a existência de contraste, não foi possível realizar a calibração do sensor DE-XRT, demonstrando sua inaptidão de uso para o caso em voga.

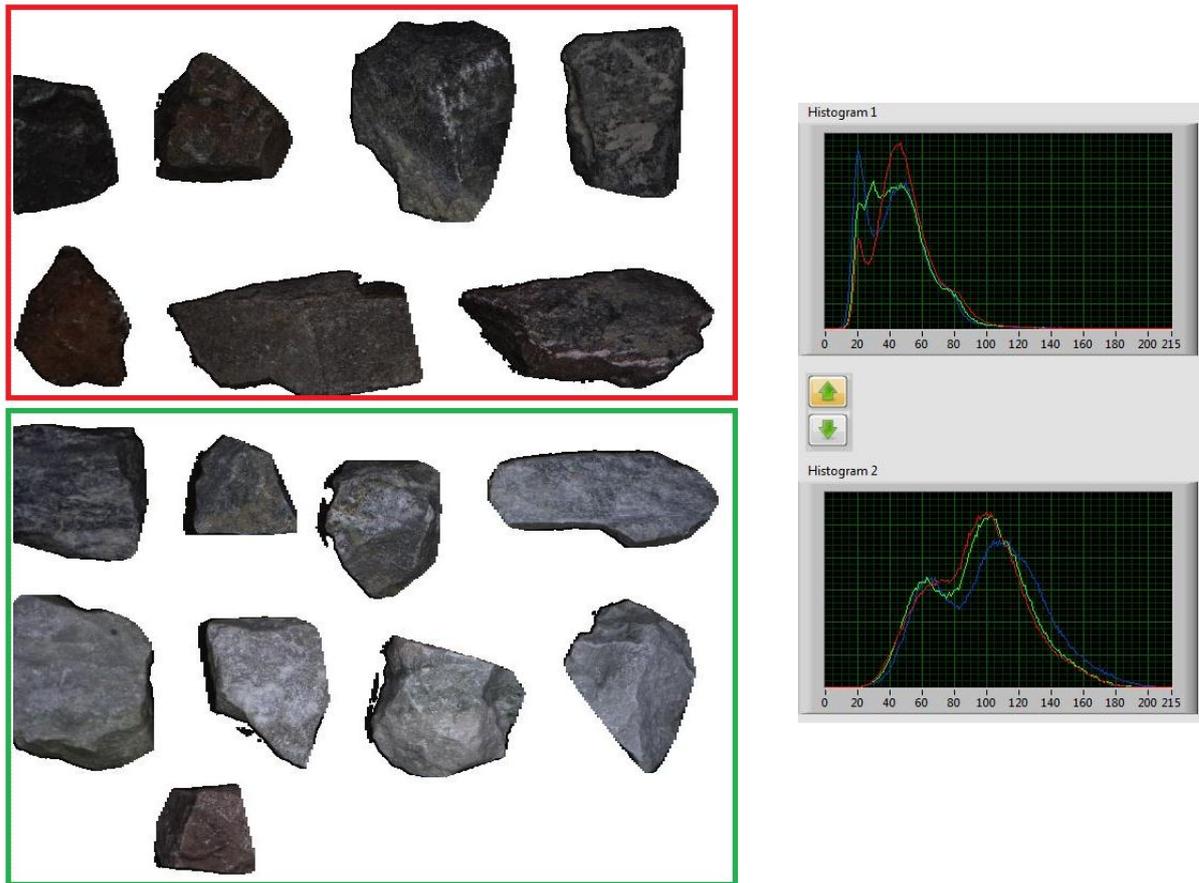
5.3 Sensor óptico (câmera CCD)

Após a apresentação dos resultados acima, denotando a incompatibilidade do sensor DE-XRT à separação objetivada, demonstrar-se-á neste tópico a etapa de calibração e os resultados obtidos nos testes realizados com o sensor óptico.

5.3.1 Calibração

Como primeiros resultados dos testes com o sensor óptico, a Figura 24 ilustra as imagens obtidas durante o processo de calibração. Diferentemente do que se viu durante a tentativa de calibração do sensor de raios-X (item 5.2.1), nota-se que nos histogramas apresentados na figura abaixo há uma clara diferença no posicionamento das curvas. Considerando que os valores apresentados retratam a resposta de reflectância das amostras quanto aos parâmetros de RGB, denotam-se os picos do material estéril localizados na zona de até 60 de intensidade de cor, enquanto os picos de reflectância do minério situam-se na zona próxima aos 100.

Figura 24: imagem das amostras geradas na etapa de calibração do sensor óptico: sendo à esquerda estéril (retângulo vermelho) e minério (retângulo verde) e a direita seus respectivos histogramas.



Fonte: autor.

5.3.2 Testes de separação

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos após a submissão das amostras ao *sorter*, trazendo-se os balanços de massa obtidos para cada uma das três faixas granulométricas testadas. Os testes foram divididos em três etapas, conforme exposto no item 4.3.1, variando-se a condição das amostras, sendo a primeira com material sujo-seco (SS), a segunda com material limpo-úmido (LU) e a terceira com material limpo-seco (LS).

5.3.2.1 Material sujo-seco (SS)

No que tange os testes com material SS, apresentam-se abaixo os balanços de massas obtidos para cada faixa granulométrica. Vale ressaltar que, nesta etapa, as amostras foram introduzidas no *sorter* da forma como foram coletadas em campo, visando simular os efeitos da separação do ROM dispensando-se o processo de lavagem da alimentação. É importante que se ressalte, todavia, que o material considerado como sujo-seco nos presentes testes, apesar de ter sido colhido diretamente nas frentes de lavra, não representa necessariamente o

ROM não lavado real da mina, pois este pode estar sujeito a uma série de variáveis praticamente incomensuráveis.

Tabela 11: balanço de massa do material sujo-seco (-25+9,5 mm), após submissão ao sensor óptico.

-25 +9,5 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	2.842,6	53,2%	2.252,3	74,9%	590,3	25,3%
Cálc. cinza	1.668,5	31,2%	622,8	20,7%	1.045,7	44,7%
Cálc. rosa	54,4	1,0%	14,4	0,5%	40,0	1,7%
Estéril-1	534,5	10,0%	55,5	1,8%	479,0	20,5%
Estéril-2	245,9	4,6%	63,3	2,1%	182,6	7,8%
∑	5.345,9	100,0%	3.008,3	100,0%	2.337,6	100,0%
%	100,0%		56,3%		43,7%	

Fonte: autor.

Como se pode identificar na Tabela 11, o *sorter* foi alimentado com amostra constituída pelas cinco variedades de materiais que compõem o ROM, neste caso, testando-se a menor faixa granulométrica (-25+9,5 mm). Note-se que na alimentação, considerando as três primeiras classes que compõem o minério de interesse, estas representam 85,4% da massa total da amostra, enquanto as duas últimas classes, que representam o estéril, somam 14,6%. Após a submissão dos materiais ao *sorting*, da massa total alimentada, 56,3% foi separada com produto e 43,7% como rejeito.

Fazendo-se uma análise mais detalhada do comportamento por cada classe, nota-se que as maiores discrepâncias ocorreram com calcário cinza e rosa, onde mais da metade destes produtos foi considerada rejeito. Por outro lado, analisando-se a fração produto é possível perceber que esta é composta por menos de 4% de material estéril.

A próxima rodagem realizada submeteu ao *sorter* materiais na faixa granulométrica intermediária (-50+25 mm), também contemplando todas as classes de minério e estéril. Os resultados são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 12: balanço de massa do material sujo-seco (-50+25 mm), após submissão ao sensor óptico.

-50 +25 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	7.858,7	40,0%	7.828,4	60,8%	30,3	0,4%
Cálc. cinza	9.120,6	46,4%	4.199,6	32,6%	4.921,0	72,9%
Cálc. rosa	153,8	0,8%	153,8	1,2%	0,0	0,0%
Estéril-1	1.698,7	8,7%	485,4	3,8%	1.213,3	18,0%
Estéril-2	804,6	4,1%	218,0	1,7%	586,6	8,7%
∑	19.636,4	100,0%	12.885,2	100,0%	6.751,2	100,0%
%	100,0%		65,6%		34,4%	

Fonte: autor.

Observando-se a coluna alimentação, na tabela apresentada acima, tem-se a amostra composta por 87,2% de produto e 12,8% de estéril. Na última linha, onde se mostram os percentuais separados relativos ao total alimentado, nota-se que há uma discrepância menor nos valores gerais, mas a diferença comparada aos valores esperados ainda é significativa. No entanto, dando-se atenção à composição das frações produto e rejeito, se percebe que a principal influência nesta diferença está na classe calcário cinza, onde se teve praticamente 50% de sua massa remetida ao rejeito.

Passando-se a terceira faixa granulométrica testada (-70+50 mm), são apresentados na Tabela 13 os resultados do *sorting*. Buscando seguir as proporções pré-estabelecidas, a alimentação seguiu, basicamente, os mesmos percentuais das faixas granulométricas anteriores, sendo a amostra composta por 82,4% de minério e 17,6% de estéril, sendo estas pequenas variações de proporções na composição da amostra justificadas pela granulometria do material, conforme já abordado na metodologia.

Tabela 13: balanço de massa do material sujo-seco (-70+50 mm), após submissão ao sensor óptico.

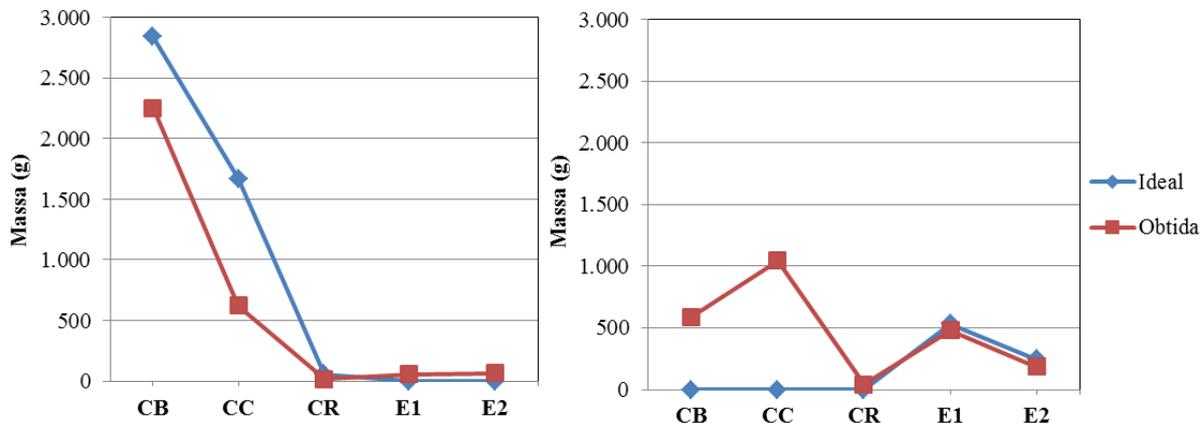
-70 +50 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	10.437,4	50,8%	10.437,4	61,7%	0,0	0,0%
Cálc. cinza	6.282,5	30,6%	5.968,4	35,3%	314,1	8,7%
Cálc. rosa	206,3	1,0%	206,3	1,2%	0,0	0,0%
Estéril-1	2.324,5	11,3%	301,5	1,8%	2.023,0	55,8%
Estéril-2	1.289,6	6,3%	0,0	0,0%	1.289,6	35,6%
∑	20.540,3	100,0%	16.913,6	100,0%	3.626,7	100,0%
%	100,0%		82,3%		17,7%	

Fonte: autor.

Detendo-se aos resultados da Tabela 13, é possível observar que se teve uma distribuição de massas muito parecida com a que foi alimentada, isto é, 82,3% considerada produto e 17,7% considerada como rejeito. Fazendo-se uma análise mais demorada das classes que compõem as colunas produto e rejeito, observa-se que a única incongruência ocorreu entre calcário cinza e diabásio, onde uma percentagem do calcário cinza foi enviada ao rejeito e uma fração do estéril-1 foi considerada produto. Outro ponto digno de nota, em uma análise mais detalhada da coluna produto, é a presença de apenas 1,8% de estéril em sua composição.

Visando facilitar a visualização desta distribuição das massas, foram construídos pares de gráficos que podem ser visualizados abaixo, onde são apresentados os valores obtidos para cada classe em produto e rejeito. A linha em azul representa a linha ideal, ou seja, as massas que se teria caso a separação atingisse 100% de eficiência, enquanto a linha vermelha representa aquilo que se obteve com a separação real, sendo denominada de linha obtida.

Figura 25: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material sujo-seco em cada classe na granulometria $-25+9,5$ mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



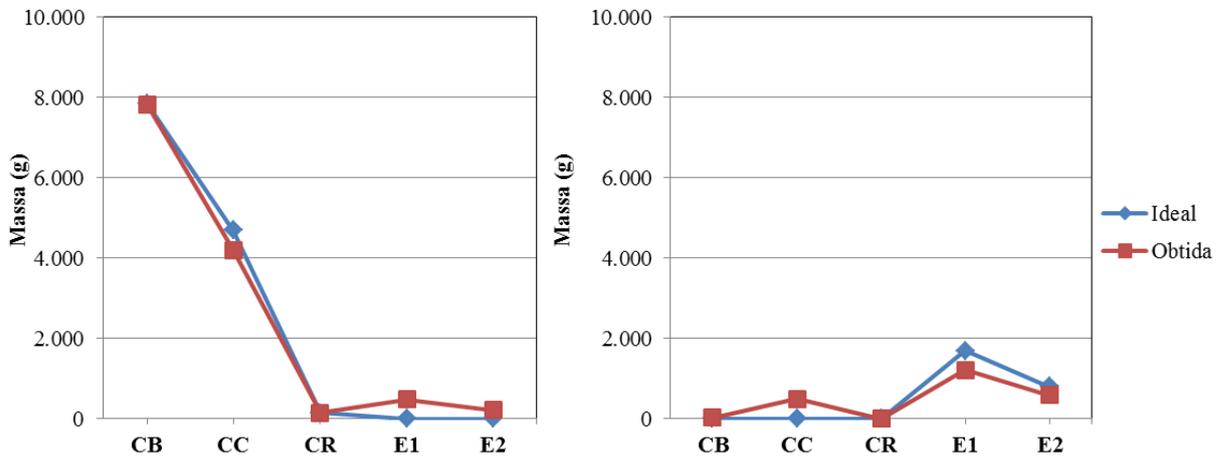
Fonte: autor.

Quanto à faixa $-25+9,5$ mm, tendo como base o discutido acerca da Tabela 11, é possível identificar-se com clareza na Figura 25 que as curvas que apresentam discrepância significativa entre si, tanto na fração produto (gráfico à esquerda), quanto na fração rejeito (gráfico à direita). Outra importante consideração é de que os erros atingem principalmente as classes CB e CC, que são as variantes de minério mais abundantes na jazida.

Considerando a granulometria intermediária ($-50+25$ mm), a Figura 26 demonstra um resultado de classificação com linhas bem mais próximas da ideal, se comparadas à granulometria menor. Quanto às classes mais atingidas pela discrepância, examinando-se o

gráfico esquerdo (produto), é notável a existência de uma pequena perda de minério CC, ao passo que se tem uma recuperação equivocada de estéril E-1.

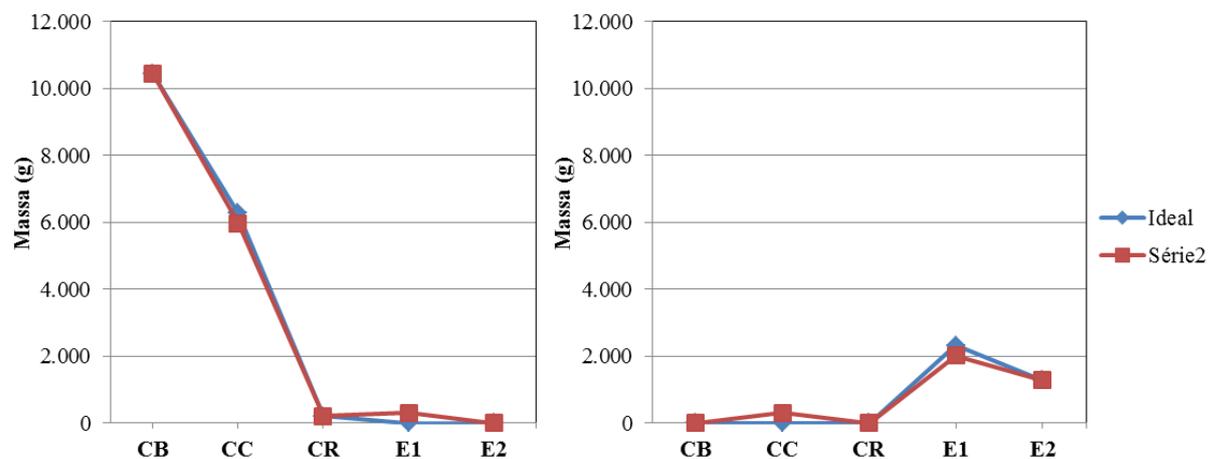
Figura 26: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material sujo-seco em cada classe na granulometria -50+25 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

No que se refere aos resultados do teste com a granulometria grossa (-70+50 mm), apresentados abaixo, nota-se que a diferença entre as duas linhas é mínima, tanto em produto quanto em rejeito. Observando-se o gráfico da fração rejeito (direita), pode-se identificar que as duas classes onde se têm divergência entre as linhas são CC e E1, porém, é digno de nota que a magnitude da diferença é inferior à observada nas granulometrias anteriores.

Figura 27: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material sujo-seco em cada classe na granulometria -70+50 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

Considerando as discussões expostas acima, preliminarmente, já se pode afirmar que os resultados de separação melhoraram conforme se aumentou a granulometria testada, pois se teve maiores valores de recuperação do minério de interesse e menor presença de estéril na fração produto. Vale destacar que a análise da performance de separação nas diversas rodagens realizadas será tema de discussão detalhada no tópico 5.3.4.

5.3.2.2 Material limpo-úmido (LU)

Seguindo a rotina de testes proposta, conforme é exposto no capítulo 4, este tópico traz os resultados obtidos através dos testes com material na condição LU. Assim, apresenta-se na Tabela 14 o balanço de massa para a primeira faixa granulométrica testada.

Tabela 14: balanço de massa do material limpo-úmido (-25+9,5 mm), após submissão ao sensor óptico.

-25 +9,5 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	1.727,8	54,1%	1.523,6	58,1%	204,2	35,8%
Cálc. cinza	946,1	29,6%	841,3	32,1%	104,8	18,4%
Cálc. rosa	321,6	10,1%	193,8	7,4%	127,8	22,4%
Estéril-1	118,3	3,7%	53,7	2,0%	64,6	11,3%
Estéril-2	79,5	2,5%	9,8	0,4%	69,7	12,2%
∑	3.193,3	100,0%	2.622,2	100,0%	571,1	100,0%
%	100,0%		82,1%		17,9%	

Fonte: autor.

Analisando-se a tabela acima, referente à faixa -25+9,5 mm nota-se que o *sorter* foi alimentado com 6,2% de material estéril e 93,8% de minério. Estes valores diferem em proporções dos apresentados nos tópicos SS e LS, devido ao material empregado nesta análise tratar-se da duplicata da amostra do ROM. Todavia, ver-se-á nos gráficos apresentados posteriormente, valores reconstituídos, para que seja possível melhor visualização e comparação dos resultados obtidos em cada condição.

Quanto aos resultados propriamente ditos, se analisar-se a linha inferior, houve mais de 80% do alimentado considerado produto pelo *sorter*, enquanto a fração rejeito teve uma percentagem de quase 18%. Fazendo-se uma relação com os percentuais da alimentação, é perceptível que houve perda de minério na fração rejeito.

Indo-se a análise da faixa intermediária (-50+25 mm), da qual se apresentam os resultados na Tabela 15, notar-se-á que a alimentação compreendeu 32,8% de estéril e 67,2% de minério. Examinando-se a linha inferior, o *sorter* definiu como produto 62,7% da

alimentação, entretanto, apesar de o percentual absoluto ser semelhante ao esperado, vê-se que há presença de rejeito em meio à fração. Contudo, como já dito anteriormente, deve-se atentar ao fato de que estão sendo considerados valores de massa da duplicata, que serão melhor avaliados nos gráficos posteriores.

Tabela 15: balanço de massa do material limpo-úmido (-50+25 mm), após submissão ao sensor óptico.

-50 +25 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	2.818,5	23,7%	2.524,8	33,8%	293,7	6,6%
Cálc. cinza	1.696,0	14,3%	1.579,7	21,2%	116,3	2,6%
Cálc. rosa	3.476,8	29,2%	2.445,9	32,8%	1.030,9	23,2%
Estéril-1	3.513,5	29,5%	568,7	7,6%	2.944,8	66,4%
Estéril-2	391,6	3,3%	340,3	4,6%	51,3	1,2%
∑	11.896,4	100,0%	7.459,4	100,0%	4.437,0	100,0%
%	100,0%		62,7%		37,3%	

Fonte: autor.

Quando se analisam os resultados da granulometria grossa (-70+50 mm), expostos na Tabela 16, a alimentação constou de 67,2% de minério e 32,8% de estéril, enquanto as frações produto e rejeito tiveram, respectivamente, 62,7% e 37,3%. É digna de nota a obtenção de uma coluna produto com apenas 2,4% de estéril.

Tabela 16: balanço de massa do material limpo-úmido (-70+50 mm), após submissão ao sensor óptico.

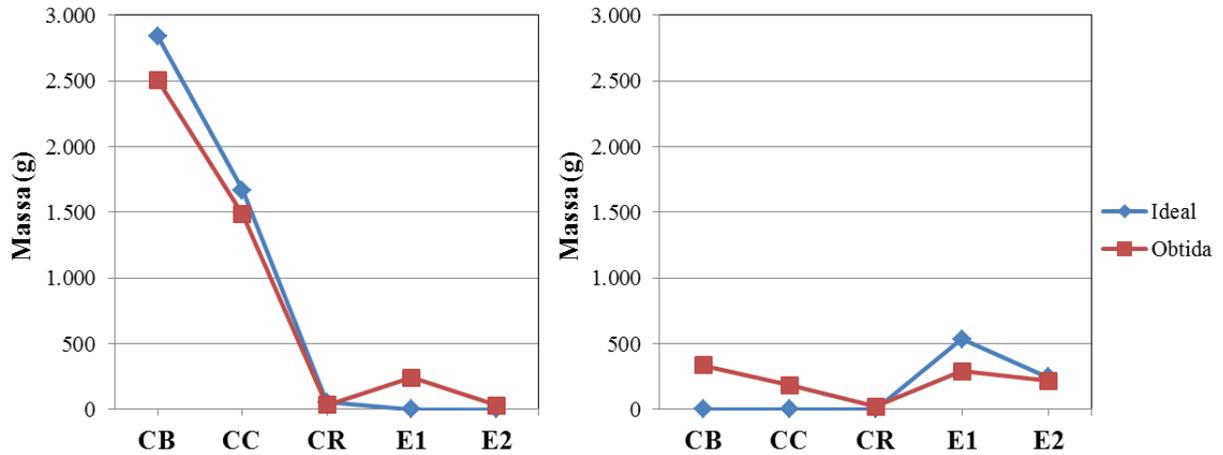
-70 +50 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	4.986,0	32,0%	4.986,0	46,8%	0,0	0,0%
Cálc. cinza	2.059,6	13,2%	2.059,6	19,3%	0,0	0,0%
Cálc. rosa	4.271,9	27,4%	3.356,2	31,5%	915,7	18,5%
Estéril-1	3.352,9	21,5%	251,9	2,4%	3.101,0	62,8%
Estéril-2	920,6	5,9%	0,0	0,0%	920,6	18,6%
∑	15.591,0	100,0%	10.653,7	100,0%	4.937,3	100,0%
%	100,0%		68,3%		31,7%	

Fonte: autor.

Sendo feita uma análise geral das tabelas apresentadas, ver-se-á que os maiores erros se devem à classe CR, que teve cerca de 30% de sua massa enviada ao rejeito nas três faixas granulométricas testadas. Entrementes, vale lembrar que esta classe está exagerada na alimentação de todas as granulometrias, o que não permite que se façam comparações conclusivas. Assim, nos pares de gráficos com as linhas ideal e obtida, mostrados a seguir,

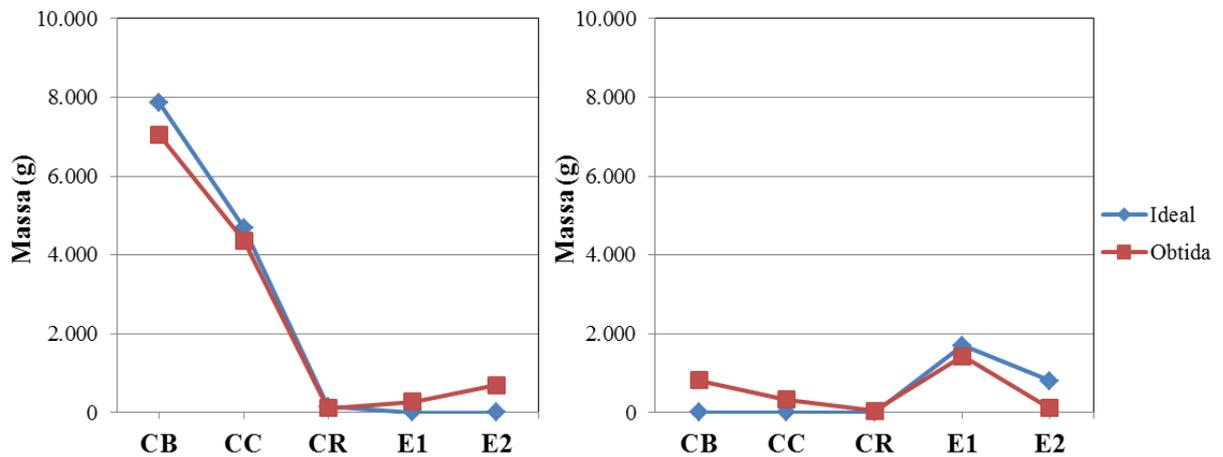
apresentar-se-ão dados reconstituídos de massa, possibilitando que se façam melhores análises.

Figura 28: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-úmido em cada classe na granulometria -25+9,5 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

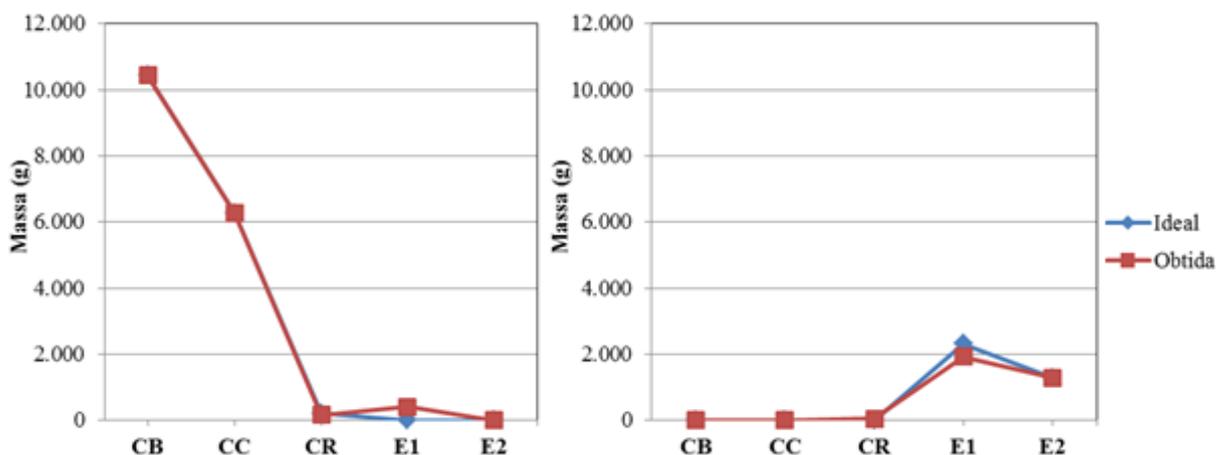
Figura 29: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-úmido em cada classe na granulometria -50+25 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

Quanto aos dois pares de gráficos acima (Figura 28 e Figura 29), nota-se que os resultados são bastante semelhantes, em síntese. Pode-se identificar uma perda de minérios CB e CC como rejeito, ao passo que se tem recuperação de E1 e E2 em ambos os casos. Conforme esperado, em virtude de o minério CR representar uma fração pequena da composição da amostra total, não são visíveis imperfeições significativas. Os resultados para a granulometria mais grossa (-70+50 mm) são apresentados no par de gráficos a seguir.

Figura 30: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-úmido em cada classe na granulometria -70+50 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

Considerando o par de gráficos da Figura 30, como já se observou nas discussões acerca da Figura 27, a faixa granulométrica -70+50 mm foi a que apresentou os melhores resultados também para o material LU, em baila neste tópico. É facilmente identificável que o único desvio visível nas linhas ocorre no que diz respeito ao E1, que teve uma pequena fração classificada como produto pelo *sorter*.

5.3.2.3 Material limpo-seco (LS)

Como última bateria de testes realizada no *sorter*, se apresentam abaixo as tabelas de balanço de massa para as três faixas granulométricas testadas. É válido destacar que as amostras, submetidas à separação em xequê, tem volume nas proporções estabelecidas conforme o item 5.3.2.1. Os resultados da faixa granulométrica -25+9,5 mm são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 17: balanço de massa do material limpo-seco (-25+9,5 mm), após submissão ao sensor óptico.

-25 +9,5 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	2.976,8	54,3%	795,7	47,3%	2.181,1	57,4%
Cálc. cinza	1.647,5	30,1%	780,4	46,4%	867,1	22,8%
Cálc. rosa	95,0	1,7%	47,2	2,8%	47,8	1,3%
Estéril-1	524,2	9,6%	38,7	2,3%	485,5	12,8%
Estéril-2	237,8	4,3%	19,8	1,2%	218,0	5,7%
Σ	5.481,3	100,0%	1.681,8	100,0%	3.799,5	100,0%
%	100,0%		30,7%		69,3%	

Fonte: autor.

Tabela 18: balanço de massa do material limpo-seco (-50+25 mm), após submissão ao sensor óptico.

-50 +25 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	7.712,3	51,6%	7.303,2	57,5%	409,1	18,3%
Cálc. cinza	4.668,9	31,3%	4.668,9	36,7%	0,0	0,0%
Cálc. rosa	149,9	1,0%	149,9	1,2%	0,0	0,0%
Estéril-1	1.647,6	11,0%	343,8	2,7%	1.303,8	58,4%
Estéril-2	760,8	5,1%	239,7	1,9%	521,1	23,3%
∑	14.939,5	100,0%	12.705,5	100,0%	2.234,0	100,0%
%	100,0%		85,0%		15,0%	

Fonte: autor.

Analisando-se a Tabela 17 e a Tabela 18, novamente é perceptível a melhora nos resultados ao passo que se aumenta a granulometria. Vendo-se, como exemplo, a coluna do rejeito da Tabela 17, esta é constituída em mais de 80% por minério. No teste com a granulometria intermediária (Tabela 18), há recuperação quase total das classes de minério, sendo notável a redução da parcela contida na coluna do rejeito da casa dos 81,5% para 18,3%.

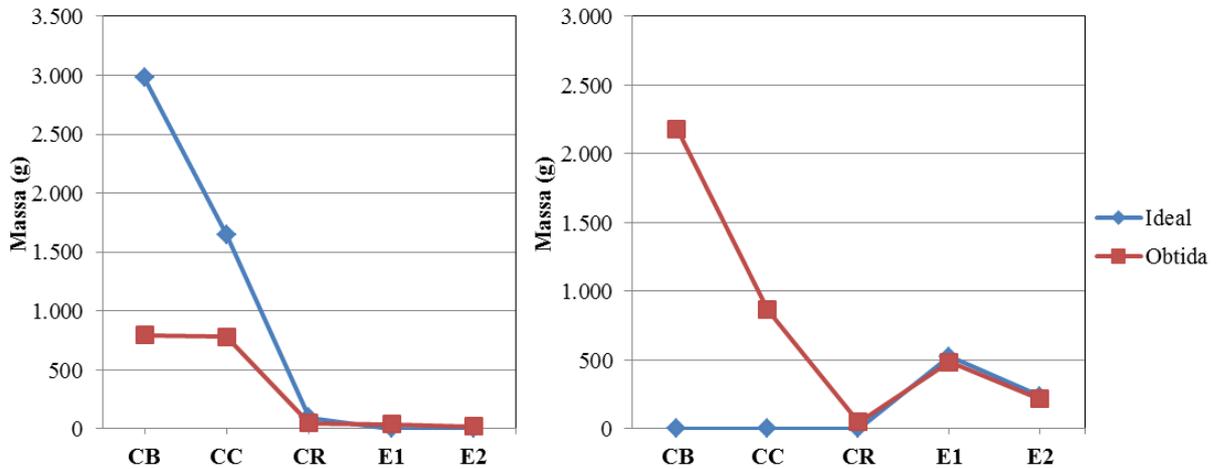
Tabela 19: balanço de massa do material limpo-seco (-70+50 mm), após submissão ao sensor óptico.

-70 +50 mm	Alimentação		Produto		Rejeito	
	g	%	g	%	g	%
Cálc. branco	10.346,7	51,2%	10.346,7	63,0%	0,0	0,0%
Cálc. cinza	6.184,8	30,6%	5.871,3	35,8%	313,5	8,3%
Cálc. rosa	202,9	1,0%	202,9	1,2%	0,0	0,0%
Estéril-1	2.269,7	11,2%	0,0	0,0%	2.269,7	60,1%
Estéril-2	1.193,4	5,9%	0,0	0,0%	1.193,4	31,6%
∑	20.197,5	100,0%	16.420,9	100,0%	3.776,6	100,0%
%	100,0%		81,3%		18,7%	

Fonte: autor.

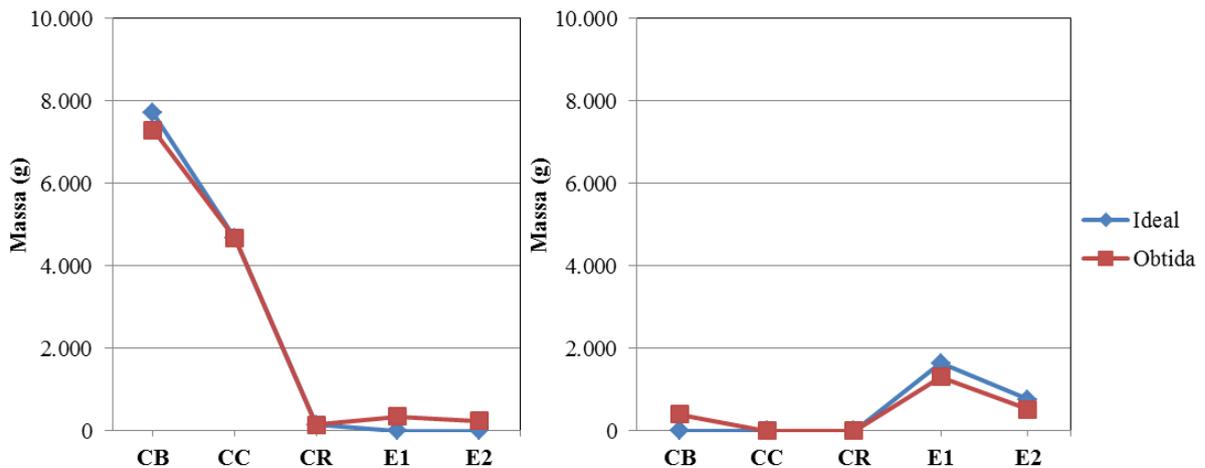
Corroborando a ideia que vem sendo construída no decorrer das análises, nota-se na Tabela 19, que trata da faixa granulométrica mais grossa, que os resultados para o material LS seguiram o mesmo comportamento das condições anteriores, ou seja, observou-se melhora nos resultados de separação conforme se aumentou a granulometria. Examinando-se a tabela, vê-se que a coluna dos produtos é 100% constituída por minério, enquanto a coluna dos rejeitos apresentou 91,7% de estéril em sua constituição. De forma a tornar os resultados mais visíveis, e comparáveis entre si, apresentam-se os pares de gráficos abaixo.

Figura 31: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-seco em cada classe na granulometria $-25+9,5$ mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

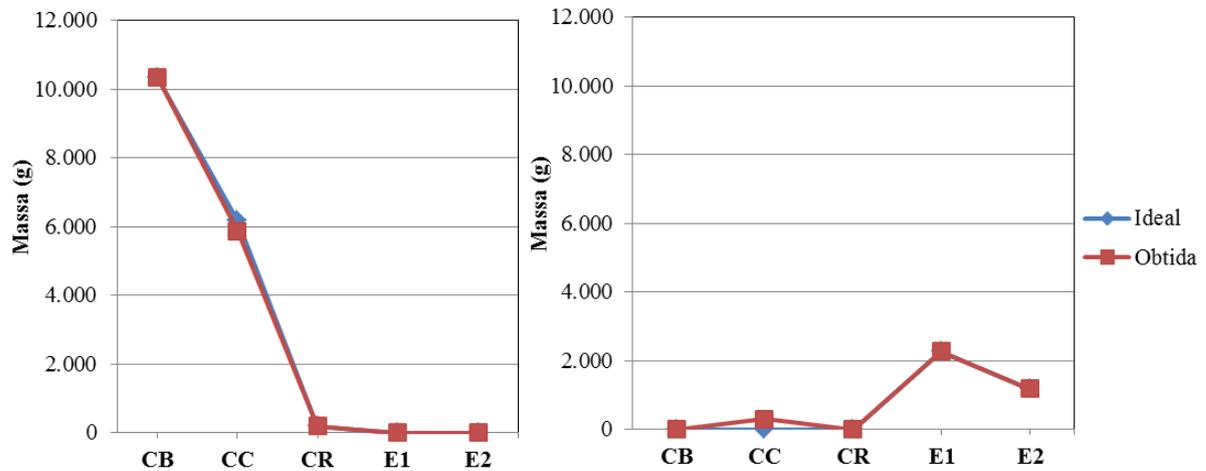
Figura 32: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-seco em cada classe na granulometria $-50+25$ mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

Analisando-se o ajuste entre as linhas ideal e obtida, fica explícito na Figura 31 o desajuste entre as linhas, denotando uma baixa recuperação de minério, principalmente no que tange o calcário branco. No entanto, vale destacar a baixa presença de estéril no produto. Passando-se a examinar o par seguinte (Figura 32), nota-se uma aproximação bem maior das linhas, tanto em produto quanto em rejeito, sendo notáveis apenas duas pequenas diferenças nas classes CB e E1. Quanto ao último par de gráficos (Figura 33), que representa a granulometria mais grossa ($-70+50$ mm), se nota um ajuste praticamente perfeito entre as linhas, salvo uma pequena remessa equivocada de CC ao rejeito.

Figura 33: gráficos comparativos das massas ideal e obtida para o material limpo-seco em cada classe na granulometria -70+50 mm, para a fração produto (esquerda) e rejeito (direita). Onde: CB = calcário branco, CC = calcário cinza, CR = calcário rosa, E1 = estéril-1, E2 = estéril-2.



Fonte: autor.

5.3.3 Balanço metalúrgico

Considerando os valores de distribuição de massas apresentados no tópico 5.3.2 acima, são apresentadas a seguir as tabelas de balanço metalúrgico para cada uma das condições de alimentação. Vale ressaltar que, apesar de ter-se adotado o termo balanço metalúrgico para este tópico, os valores de recuperação apresentados se referem à proporção mássica que se teve de minério na composição das frações (produto/rejeito). Isto porque, conforme já abordado no item 2.3, a análise da qualidade do ROM na Indústria estudada se dá pelo PN, que é um indicador indireto da presença do mineral de interesse (dolomita), não sendo prática a realização análises elementares nesta etapa.

Quanto aos valores de PN é importante frisar que estes se detêm a retratar, em específico, as amostras que foram utilizadas nos testes de separação no *sorter*. Logo, não devem ser considerados, necessariamente, como valores representativos da distribuição de teores na jazida, uma vez que a amostragem realizada não teve este intuito e, tampouco, oferece subsídios para tal.

Tabela 20: balanço metalúrgico do material na condição sujo-seco, nas três granulometrias testadas.

	(mm)	Cálc. branco	Cálc. cinza	Cálc. rosa	PN (%ECaCO ₃)
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	90,87
Produto	-25 +9,5	79,2%	37,3%	26,5%	101,30
Rejeito		20,8%	62,7%	73,5%	77,45
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	85,59
Produto	-50 +25	99,6%	46,0%	100,0%	90,68
Rejeito		0,4%	54,0%	0,0%	75,89
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	77,39
Produto	-70 +50	100,0%	95,0%	100,0%	89,85
Rejeito		0,0%	5,0%	0,0%	19,26

Fonte: autor.

Tendo como parâmetro a presença de minério na fração rejeito (FP), é identificável em primeira análise, na Tabela 20, que estes valores são mais elevados na menor granulometria testada (-25+9,5) e atenuam-se nas maiores faixas granulométricas. Expandindo-se a discussão às tabelas seguintes (Tabela 21 e Tabela 22), o mesmo tipo de comportamento pode ser observado. Falando-se das condições, merecem destaque as condições sujo-seco e limpo-seco, onde se denotam valores em torno de 5% de falsos-negativos, apenas.

Tabela 21: balanço metalúrgico do material na condição limpo-úmido, nas três granulometrias testadas.

	(mm)	Cálc. branco	Cálc. cinza	Cálc. rosa	PN (%ECaCO ₃)
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	97,21
Produto	-25 +9,5	88,2%	88,9%	60,3%	100,00
Rejeito		11,8%	11,1%	39,7%	84,40
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	71,84
Produto	-50 +25	89,6%	93,1%	70,3%	87,29
Rejeito		10,4%	6,9%	29,7%	45,88
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	74,04
Produto	-70 +50	100,0%	100,0%	78,6%	94,22
Rejeito		0,0%	0,0%	21,4%	30,52

Fonte: autor.

Indo-se a uma análise pelas classes, em ambas as tabelas, podem-se perceber a existência de um comportamento pouco padronizado das recuperações nas menores faixas granulométricas. Tendo-se o calcário branco como exemplo, seu índice de FP, quando se considera as granulometrias mais finas, é o menor na condição sujo-seco (Tabela 20) e o maior na condição limpo-seco (Tabela 22). Quanto ao calcário rosa, este tem comportamento

inverso, tendo os maiores índices de FP na condição sujo-seco. O calcário cinza, por sua vez, tem os menores índices de FP na condição limpo-úmido.

Tabela 22: balanço metalúrgico do material na condição limpo-seco, nas três granulometrias testadas.

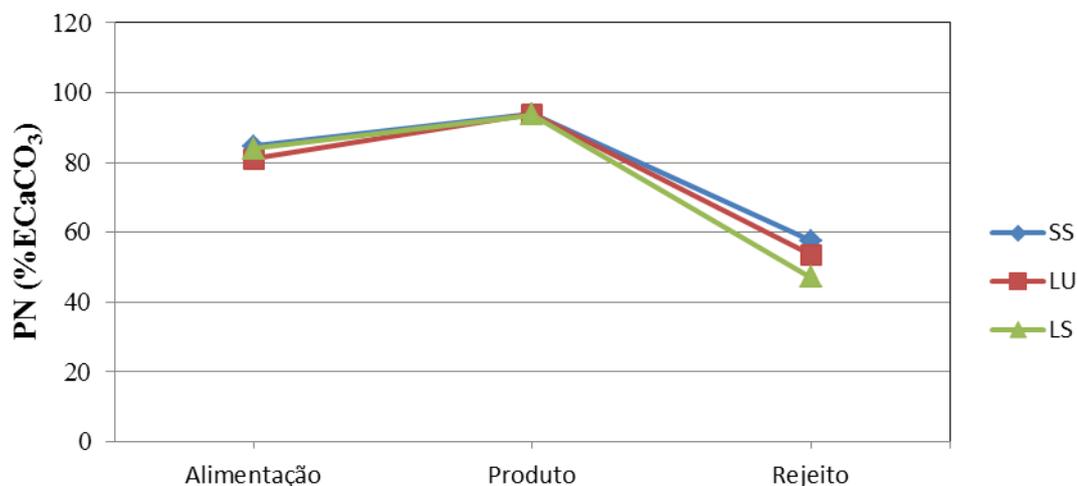
	(mm)	Cálc. branco	Cálc. cinza	Cálc. rosa	PN (%ECaCO ₃)
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	91,46
Produto	-25 +9,5	26,7%	47,4%	49,7%	98,40
Rejeito		73,3%	52,6%	50,3%	88,40
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	82,81
Produto	-50 +25	94,7%	100,0%	100,0%	91,40
Rejeito		5,3%	0,0%	0,0%	33,95
Alimentação		100,0%	100,0%	100,0%	77,75
Produto	-70 +50	100,0%	94,9%	100,0%	91,22
Rejeito		0,0%	5,1%	0,0%	19,17

Fonte: autor.

No que concerne à maior granulometria, nota-se que a classe do calcário branco teve recuperação de 100% nas três condições testadas, no entanto, as demais classes não tiveram um padrão definido de comportamento. Enquanto a melhor recuperação do calcário cinza foi observada na condição limpo-úmido, esta foi a condição em que a classe calcário rosa teve maior índice de FP.

No que se refere aos valores das análises químicas, visando uma melhor avaliação do efeito da separação nos valores de PN do material, a Figura 34 e a Figura 35 trazem a variação observada nestes valores. Considerando a primeira imagem, onde se abordam as condições sujo-seco, limpo-úmido e limpo-seco, constata-se que não há uma grande diferença entre as curvas, demonstrando que a mudança nas condições do material alimentado teve pouca influência no PN das frações.

Figura 34: valores de PN para a alimentação e as frações produto e rejeito, nas três condições testadas.

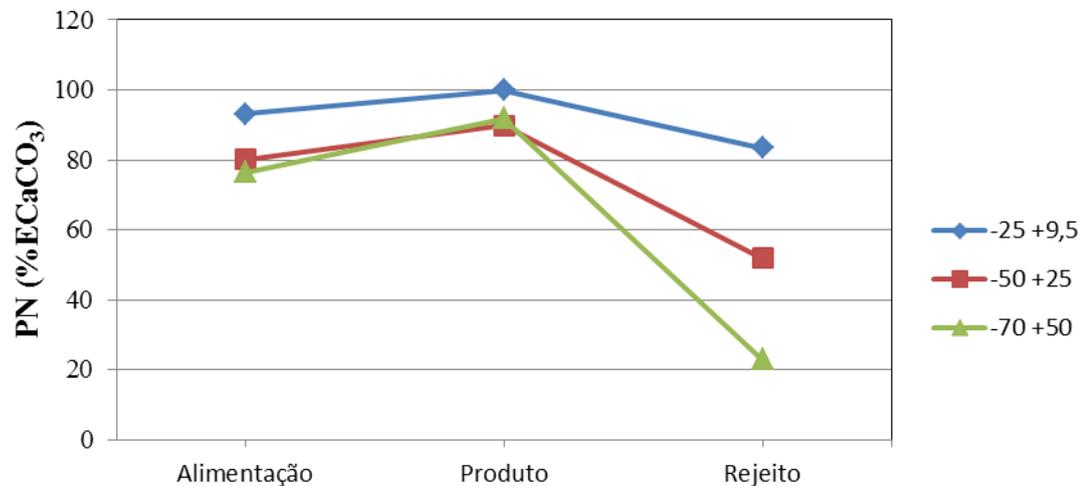


Fonte: autor.

Porém, tendo em conta que o objetivo é que se tenham os maiores teores possíveis na fração produto e os menores na fração rejeito, pode-se considerar que o material na condição limpo-seco foi o que teve melhores resultados. Quanto à granulometria, na Figura 35, demonstram-se os valores de PN para alimentação, produto e rejeito obtidos nos testes com os três tamanhos de partícula. Nota-se que, diferentemente do observado na situação anterior, a mudança na faixa granulométrica do material alimentado teve influência significativa nos valores de PN.

Observando-se a alimentação, é de fácil percepção que o PN das amostras demonstrou-se inversamente proporcional ao tamanho das partículas, indo de menos de 80% na granulometria -70+50 mm à cerca de 90% na faixa -25+9,5 mm. Em tese, este fenômeno deve estar relacionado ao fato de partículas de minério com menor conteúdo de sílica terem tendência a apresentar maior facilidade de fragmentação e, logo, concentrarem-se na menor faixa granulométrica. Em contraponto, a granulometria maior tende a ser composta de partículas que tiveram maior resistência ao processo de fragmentação na britagem, ou seja, partículas com teor de sílica mais elevado.

Figura 35: valores de PN para a alimentação e as frações produto e rejeito, para as três faixas granulométricas testadas.



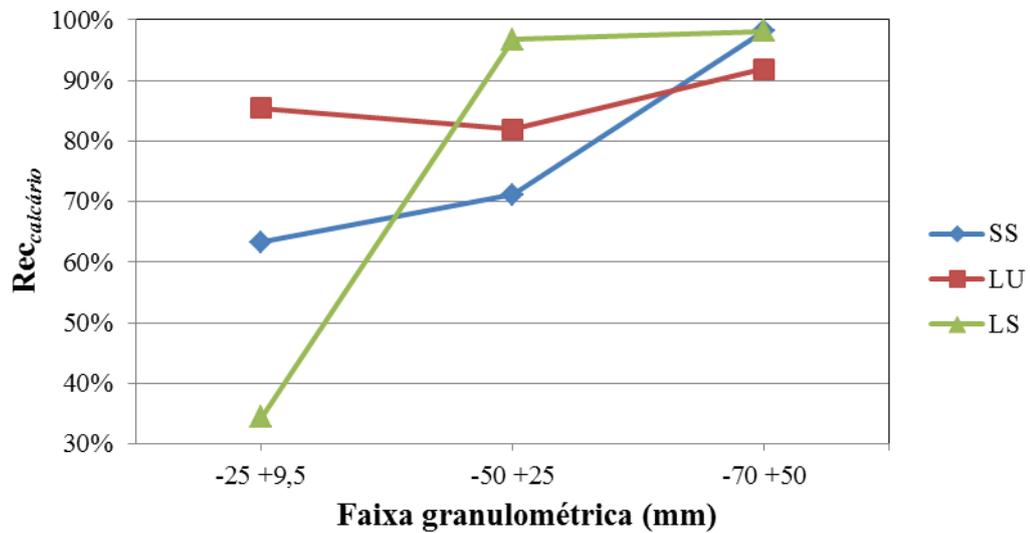
Fonte: autor.

Quanto ao comportamento dos PNs nas frações separadas, nota-se que a granulometria -25+9,5 mm foi a que apresentou maiores teores no produto, no entanto a fração descartada como rejeito tem PN até mesmo superior às alimentações das demais faixas de tamanho de partícula. Este tipo de comportamento de separação tem potencial para geração de grandes perdas de minério.

Considerando a granulometria intermediária, ainda observando-se a Figura 35, esta teve PN do produto muito inferior ao da faixa menor, no entanto, este valor já atende ao especificado como requisito para produção de corretivo de solo e tem-se um PN da fração rejeito bastante inferior, ficando na ordem dos 50%. Vendo-se agora o material de maior granulometria, este tem PN do produto muito semelhante aos valores da faixa -50+25 mm, não obstante, é nesta faixa que se observam as menores taxas de PN do rejeito, denotando baixas perdas de minério.

Passando-se a uma análise da recuperação em função das condições testadas, o gráfico apresentado na Figura 36 demonstra a variação das recuperações metalúrgicas médias das classes de minério nas condições sujo-seco, limpo-úmido e limpo-seco nas três granulometrias. É válido destacar que os valores de recuperação metalúrgica referem-se ao calcário recuperado como um todo, e não a um elemento específico, como é usual. Conforme se vem observando em todas as análises, há uma clara tendência de incremento das recuperações, em todas as condições, quando se aumenta o tamanho de partícula testado. Este comportamento só é menos evidente na condição limpo-úmido, que apresentou as menores variações de recuperação.

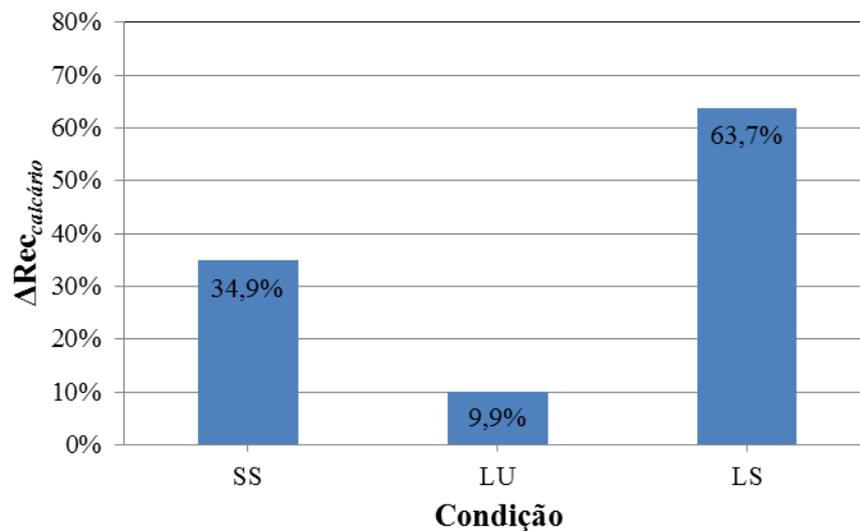
Figura 36: gráfico demonstrativo das recuperações metalúrgicas de minério obtidas em cada uma das condições testadas.



Fonte: autor.

Indo ao encontro do exposto, a Figura 37 traz um demonstrativo do quão sensível cada condição mostrou à variação na granulometria. Como se pode observar, a condição limpo-úmido foi a que apresentou menor variação nos valores de recuperação, se mostrando a condição menos sensível à mudança no tamanho de partícula. Por outro lado, as condições sujo-seco e limpo-seco sofreram forte influência da alteração na granulometria testada, com ênfase para a última, que apresentou variação na recuperação de mais de 60% entre as três faixas granulométricas.

Figura 37: gráfico demonstrativo da variação da recuperação metalúrgica quando se modificou a granulometria de alimentação.

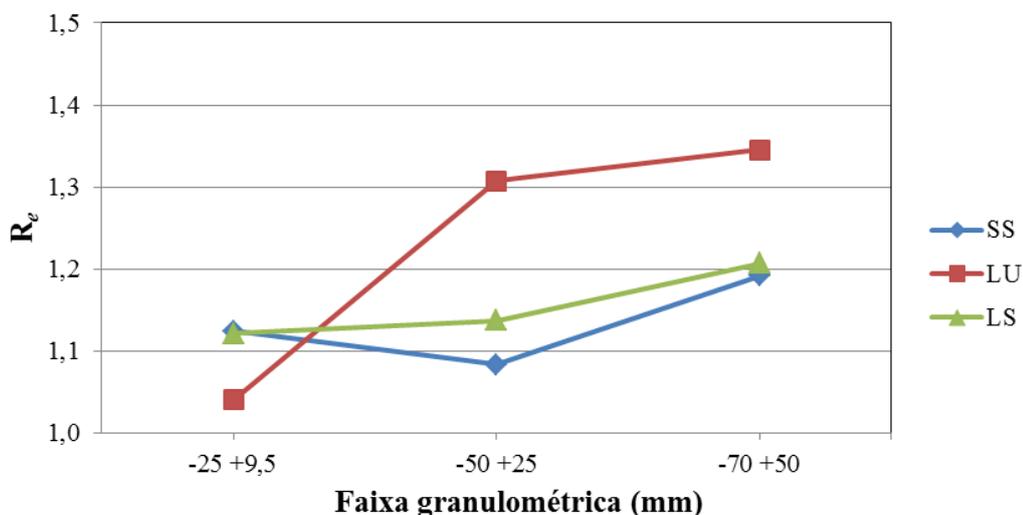


Fonte: autor.

Quanto à razão de enriquecimento (R_e), o gráfico apresentado na figura abaixo traz os valores obtidos nos testes com cada uma das condições, nas três faixas granulométricas. Conforme se pode perceber, em uma análise geral, os valores de R_e situam-se numa faixa entre 1,04 e 1,35, o que representa, respectivamente, um incremento de 4% a 35% no teor de minério contido no produto em relação ao alimentado.

Se observadas as variações nos índices quanto à faixa granulométrica testada, é visível o aumento nos valores de R_e ao passo que se aumenta a granulometria da alimentação, sendo, assim, a faixa granulométrica -70+50 mm a detentora dos maiores valores em ambas as condições. Quando se analisam os dados pela óptica da condição de alimentação, fica claro que as condições sujo-seco e limpo-seco tiveram um comportamento bastante similar entre si, apresentando valores de R_e entre 1,08 e 1,2. O material limpo-úmido, por sua vez, apresentou um *range* bem mais expressivo, indo de 0,04 até 1,35, sendo a condição que, com exceção da menor faixa granulométrica, apresentou os maiores valores de razão de enriquecimento.

Figura 38: valores de razão de enriquecimento para cada condição testada, nas três granulometrias.



Fonte: autor

5.3.4 Análise da performance do sensor

5.3.4.1 Matrizes de confusão

Considerando o exposto na metodologia (item 4.5.2), este tópico dedica-se a trazer os resultados de performance, obtida com o sensor óptico. Para tal, foram analisados valores de acurácia e gráficos ROC (sensibilidade vs. 1-especificidade), para os vários cenários de separação testados. Embora já se tenha abordado esta questão anteriormente, as análises de performance estão ligadas aos conceitos de verdadeiros-positivos (TP) e verdadeiros

negativos (TN) vs. falsos-positivos (FP) e falsos-negativos (FN), expressos através das chamadas matrizes de confusão.

Neste sentido, as tabelas abaixo (Tabela 23 à Tabela 25) apresentam os balanços de massa dos materiais testados, nas três condições (SS, LU e LS) e granulometrias (-25+9,5; -50+25; -70+50 mm), seguindo o formato de matrizes de confusão. Vale comentar que estes valores foram obtidos através da soma das classes de minério e de estéril, anteriormente apresentadas, isto é, o somatório das classes CB, CC e CR constituiu a fração calcário e o somatório das classes E1 e E2 a fração estéril.

Tabela 23: matriz de confusão para a condição sujo-seco, contemplando as três granulometrias testadas, onde calcário = CB+CC+CR e estéril = E1+E2 (valores em gramas).

	Granulometria	Alimentação	Produto	Rejeito
Calcário	-25+9,5 mm	4.565,5	2.889,5	1.676,0
Estéril		780,4	118,8	661,6
Σ		5.345,9	3.008,3	2.337,6
Calcário	-50+25 mm	12.704,2	12.181,8	522,4
Estéril		2.503,3	703,4	1.799,9
Σ		15.207,5	12.885,2	2.322,3
Calcário	-70+50 mm	16.926,2	16.612,1	314,1
Estéril		3.614,1	301,5	3.312,6
Σ		20.540,3	16.913,6	3.626,7

Fonte: adaptado de OOMS et al. (2010) e GÜLCAN & GÜLSOY (2017).

Tabela 24: matriz de confusão para a condição limpo-úmido, contemplando as três granulometrias testadas, onde calcário = CB+CC+CR e estéril = E1+E2.

	Granulometria	Alimentação	Produto	Rejeito
Calcário	-25+9,5 mm	4.565,5	4.023,1	542,4
Estéril		780,4	272,9	507,5
Σ		5.345,9	4.296,0	1.049,9
Calcário	-50+25 mm	12.704,2	11.518,0	11.86,2
Estéril		2.503,3	974,2	1.529,1
Σ		15.207,5	12.492,1	2.715,4
Calcário	-70+50 mm	16.926,2	16.882,0	44,2
Estéril		3.614,1	401,5	3.212,6
Σ		20.540,3	17.283,5	3.256,8

Fonte: adaptado de OOMS et al. (2010) e GÜLCAN & GÜLSOY (2017).

Tabela 25: matriz de confusão para a condição limpo-seco, contemplando as três granulometrias testadas, onde calcário = CB+CC+CR e estéril = E1+E2.

	Granulometria	Alimentação	Produto	Rejeito
Calcário	-25+9,5 mm	4.565,5	1.577,2	2.988,3
Estéril		780,4	59,9	720,5
Σ		5.345,9	1.637,1	3.708,8
Calcário	-50+25 mm	12.704,2	12.287,3	416,9
Estéril		2.503,3	608,0	1.895,3
Σ		15.207,5	12.895,3	2.312,2
Calcário	-70+50 mm	16.926,2	16.607,7	318,5
Estéril		3.614,1	0,0	3.614,1
Σ		20.540,3	16.607,7	3.932,6

Fonte: adaptado de OOMS et al. (2010) e GÜLCAN & GÜLSOY (2017).

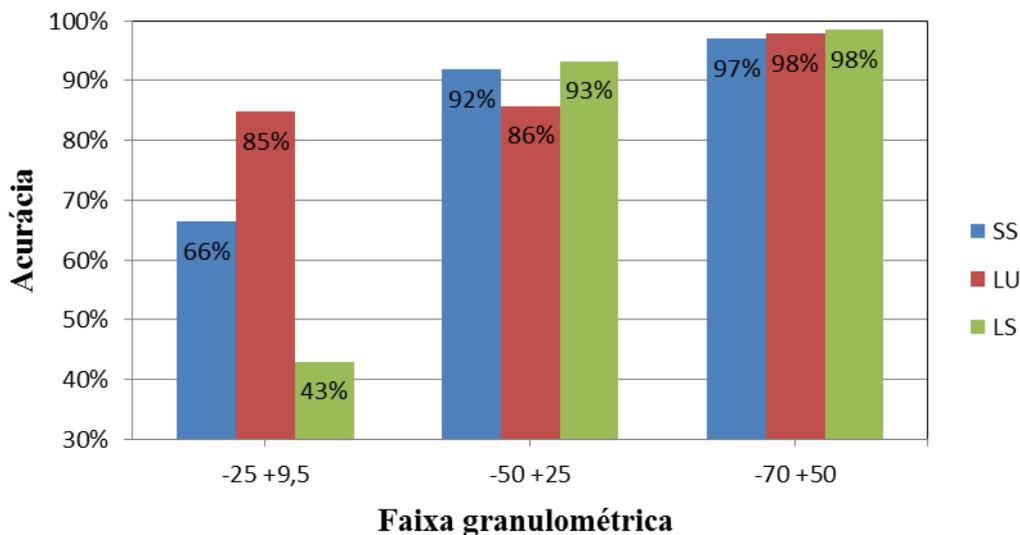
Com relação às tabelas acima, vê-se na coluna alimentação o total de calcário e de estéril inseridos no *sorter* em cada situação testada. No que se refere aos conceitos de TP, TN, FP e FN, tendo-se a Tabela 25 como exemplo, para a faixa -25+9,5 mm como valor corretamente separado na coluna do produto encontra-se TP = 1.577,2 g, enquanto na coluna rejeito TN = 720,5 g, todavia, tem-se como incorretamente selecionados FP = 59,9 g e FN = 2.998,3 g. Não obstante, indo-se para a faixa granulométrica mais grossa (-70+50 mm), os valores dos materiais corretamente separados, TP e TN, são 16.607,7 g e 3.614,1 g, enquanto os incorretos FP e FN apresentam 0,0 g e 318,5 g, respectivamente.

Uma análise em maior detalhe, utilizando as tabelas acima como base, será trazida nos tópicos a seguir, através da acurácia e dos gráficos ROC. No entanto, fazendo-se um exame prévio das tabelas entre si, se nota que a granulometria que apresentou maiores índices de FP foi a intermediária (-50+25 mm), com ênfase para a condição limpo-úmido. Condição esta que, aliás, deteve os maiores índices de FP em todas as granulometrias ensaiadas.

5.3.4.2 Acurácia

No que diz respeito à acurácia, a Figura 39 apresentada abaixo demonstra os resultados obtidos a partir das tabelas anteriores (Tabela 23 à Tabela 25). Na Figura 39 se consideramos testes de separação com as três condições nas três granulometrias.

Figura 39: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos nos testes considerando as três condições do material, nas três faixas granulométricas.



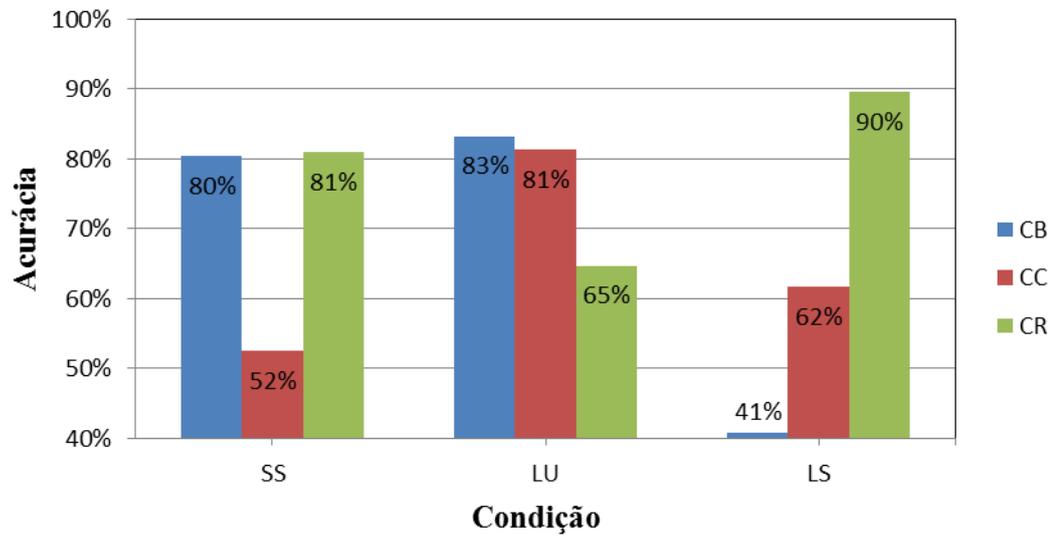
Fonte: autor.

Analisando-se o gráfico acima, com relação às faixas granulométricas, é facilmente observável que os menores valores de acurácia são os da faixa granulométrica -25+9,5 mm, destacando-se o material LS, onde se teve acurácia pouco acima de 40%. O material LU, por sua vez, foi quem se mostrou menos afetado pela variação entre a primeira e a segunda faixa granulométrica, tendo-se valores de acurácia de 85% e 86%, respectivamente.

Considerando a maior faixa testada (-70+50 mm), se observa que a condição do material teve pouca influência na acurácia de separação, se tendo obtido valores de 97% para a condição LS e de 98% para LU e LS. É digno destacar que este mesmo comportamento, de obtenção de maiores índices de assertividade de separação nas maiores granulometrias, já havia sido observado por outros autores, como GÜLCAN & GÜLSOY (2017), em testes realizados com outros tipos de minério. O mesmo ainda pode ser denotado analisando-se os resultados obtidos por MANOUCHEHRI (2006), ao testar a separação de escórias de alumínio com o uso de sensor óptico e YOUNG (2017) em testes com minérios de ferro e zinco.

Visando analisar a acurácia da separação de cada uma das classes de minério alimentadas, as tabelas apresentadas nas páginas anteriores (Tabela 23 à Tabela 25) foram adequadas para tal. Assim, foram simulados cenários de alimentação considerando que cada classe de minério fosse alimentada individualmente junto à fração estéril (E1+E2), ou seja, ora CB e (E1+E2), ora CC e (E1+E2) e assim sucessivamente, para todas as granulometrias.

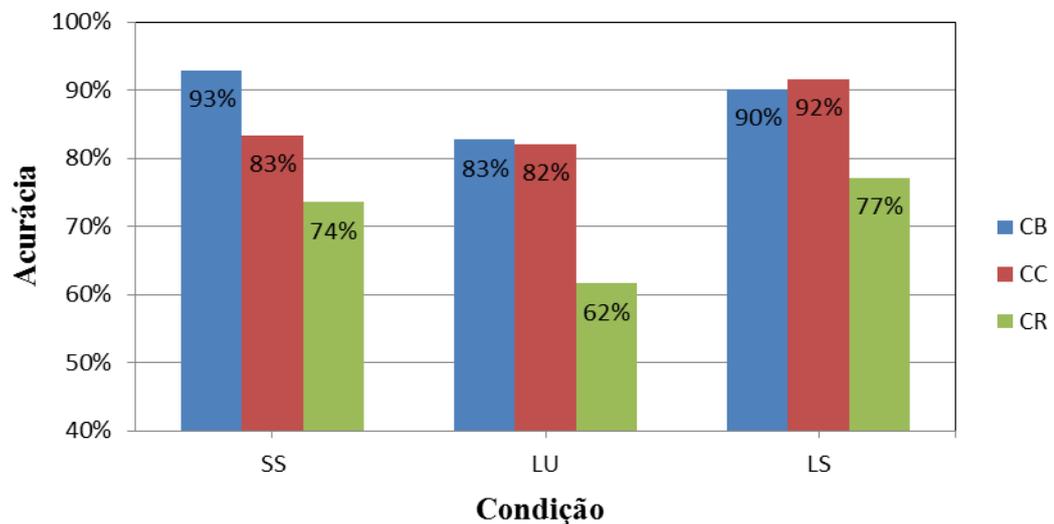
Figura 40: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos na simulação de separação de cada classe de minério individualmente, para a granulometria -25+9,5 mm.



Fonte: autor.

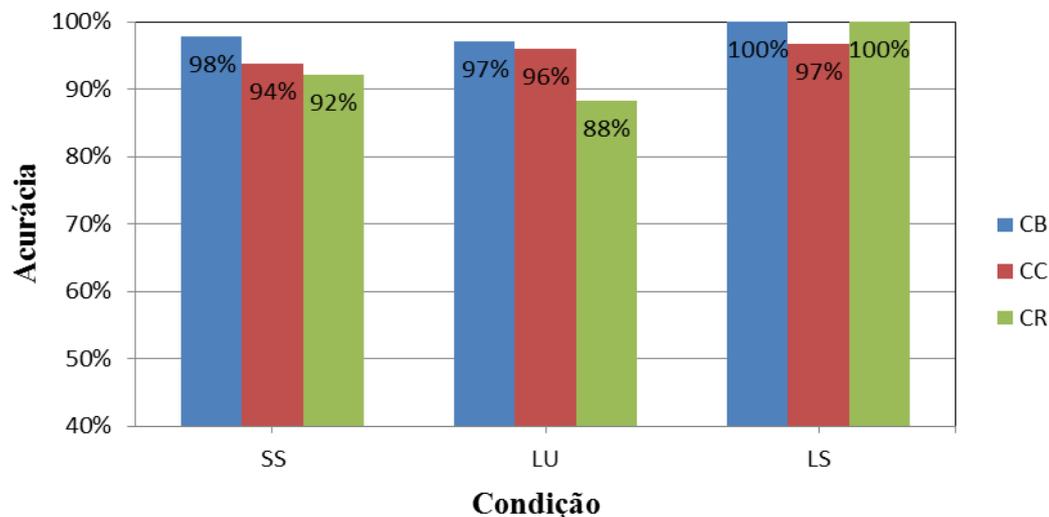
No que se refere a Figura 40, que corresponde à menor faixa granulométrica (-25+9,5 mm), fica evidente a forma errática como se apresentam os valores de acurácia para as classes, sendo praticamente impossível identificar-se qualquer padrão de comportamento. Fazendo-se um comparativo com as duas figuras seguintes (discutidas adiante), a única assinatura associável é a da classe CR, que teve oscilação semelhante às apresentadas nas demais granulometrias. Falando-se de CB, apesar de ter sido a classe melhor ranqueada nas granulometrias maiores, esta foi a que apresentou maior variação no teste com a granulometria -25+9,5 mm (mais fina).

Figura 41: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos na simulação de separação de cada classe de minério individualmente, para a granulometria -50+25 mm.



Fonte: autor.

Figura 42: gráfico demonstrativo dos valores de acurácia obtidos na simulação de separação de cada classe de minério individualmente, para a granulometria -70+50 mm.



Fonte: autor.

Detendo-se a uma análise dos gráficos acima, (Figura 41 e Figura 42), nota-se que o comportamento dos valores de acurácia é semelhante, quando se considera a variação da condição do material. No que diz respeito à granulometria, é facilmente identificável que a acurácia teve um aumento importante ao passo que se considerou a maior faixa (-70+50 mm), tendo apresentado, inclusive, para as classes CB e CR 100% de acerto na separação.

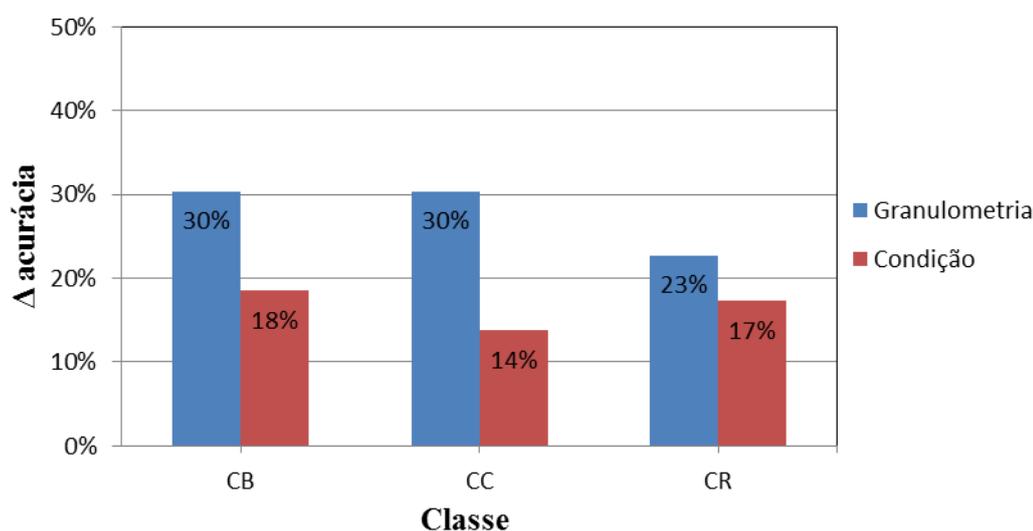
Falando-se da variação nos valores de acurácia para cada classe, ainda nos mesmos dois últimos gráficos, percebe-se que a classe CR teve os menores índices, seguida pela classe do CC. Quanto ao CR, isto é ainda mais evidente na Figura 41, onde seus valores de acurácia variaram entre 62 e 77%, enquanto as demais classes se mantiveram acima de 80% em todas as condições testadas. Ainda numa análise geral do comportamento das classes, se examinando as duas últimas figuras, é visível a queda nos valores de acurácia sempre que se considera o material na condição LU, sendo este fenômeno ainda mais explícito quando se observa a Figura 41.

A lavagem do material como parte do processo de separação óptica é citada por diversos autores (PRINZ & HAUS, 2014; KOLACZ, 2014; GÜLSOY et al., 2012; MANOUCHEHRI, 2006; MANOUCHEHRI, 2003) como sendo responsável por melhorar o desempenho do processo de separação, uma vez que se removendo impurezas superficiais (como pó, lama etc.) se tende a proporcionar uma melhor exposição do material em análise ao sensor CCD. Voltando-se a observar a Figura 39, nota-se que a lavagem do material teve influência nos resultados de acurácia, contudo, não se denota um padrão que permita afirmar

com clareza qual das condições de material lavado foi mais assertiva, pois os melhores índices obtidos foram ora da condição limpo-úmido, ora da condição limpo-seco.

Ante esta questão, o gráfico apresentado na Figura 43 demonstra a variação que se teve nos valores de acurácia quando se modificaram condição e granulometria da alimentação. Nota-se que, em todas as classes de minério testadas, a mudança na granulometria teve mais influência nos valores de acurácia do que a condição. Citando com ênfase a classe do calcário cinza, enquanto a mudança na condição implicou em variação de 14% na acurácia, a mudança na granulometria alimentada acarretou em 30% de variação.

Figura 43: gráfico demonstrativo da variação nos valores de acurácia quando se modificou a granulometria e a condição da alimentação.

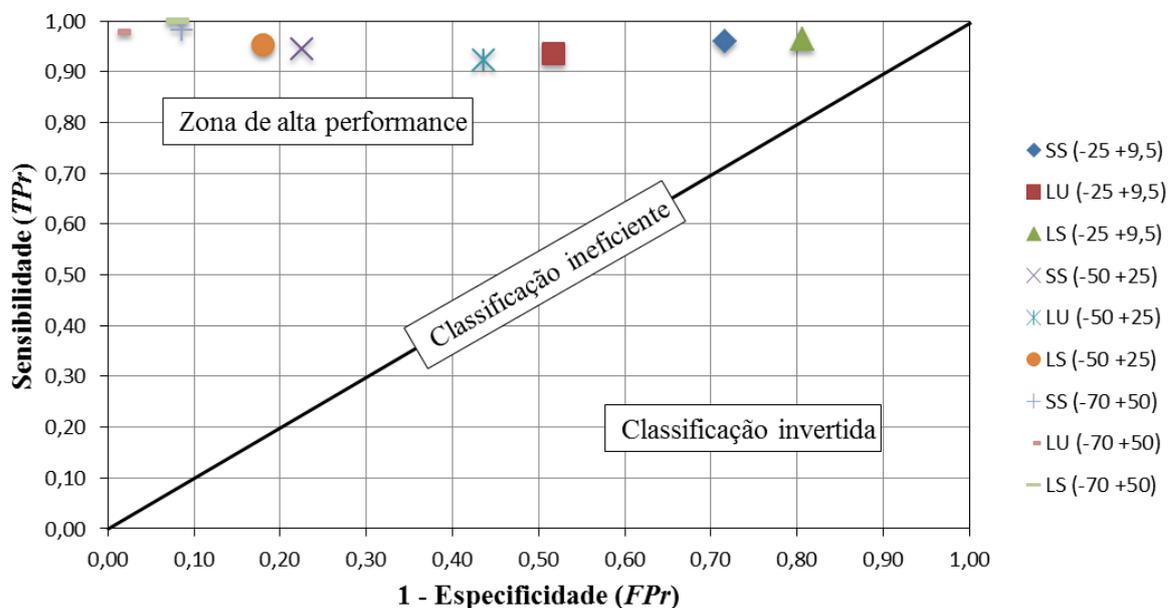


Fonte: autor.

5.3.4.3 Gráficos ROC

Os valores de especificidade e sensibilidade, quanto ao contexto global da separação, são apresentados abaixo em forma de gráfico ROC (Figura 44), conforme explicado no item 4.5.2. O gráfico, utilizado amplamente em análises de eficiência de separações binárias, traz os índices de verdadeiros-positivos (TPr) versus os índices de falsos-positivos (FPr) (que equivalem à sensibilidade e 1-especificidade, respectivamente).

Figura 44: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada condição testada nas três granulometrias.



Fonte: adaptado de FAWCETT, 2006; GÜLCAN & GÜLSOY, 2017.

De forma tornar mais clara a análise dos dados plotados no gráfico, são consideradas como melhores separações as que mais se aproximam do extremo noroeste do gráfico, ou seja, do ponto com valor igual a um no eixo das ordenadas e zero no eixo das abcissas, o que caracterizaria uma classificação perfeita (FAWCETT, 2006; OOMS et al., 2010). Falando-se das zonas do gráfico, a linha diagonal ($x = y$) denota zona de classificação ineficiente, onde se tem a identificação aleatória de uma das frações.

Outrossim, conforme se pode observar no gráfico apresentado na Figura 44, fazendo-se uma análise inicial, todos os cenários de separação testados situaram-se na zona acima da linha diagonal, merecendo destaque (conforme vem sendo observado no decorrer de todas as análises) o desempenho obtido com a granulometria mais grossa (-70+50 mm). Falando-se da menor granulometria, nota-se uma aproximação maior desta à linha diagonal da baixa eficiência e aleatoriedade, corroborando o que já se havia observado com os valores de acurácia atinentes (Figura 39 e Figura 40). Este comportamento é ainda mais evidente nas condições SS e LS.

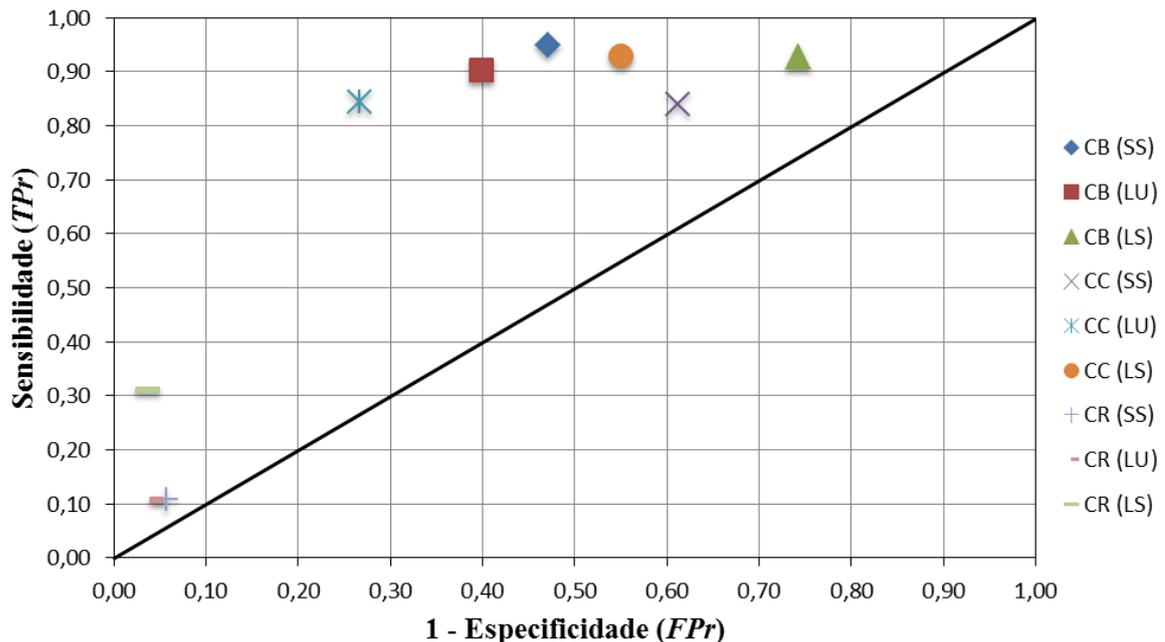
Detendo-se a uma análise mais demorada, dando crédito a FAWCETT (2006), é possível enquadrar-se as separações obtidas em duas classes distintas: ortodoxas e liberais. Na primeira, onde se encaixam claramente todos os testes com material da granulometria maior e as condições LS e SS da granulometria intermediária, tem-se uma classificação onde são considerados como produto apenas espécimes com fortes evidências de sê-lo, resultando em

um concentrado com baixo índice de FP. Na segunda, por sua vez, onde se enquadram as condições SS e LS da granulometria -25+9,5 mm há uma alta recuperação da fração produto, porém, se têm elevados índices de FP.

Outra constatação possível, observando-se ainda o mesmo gráfico, é de que a granulometria é visivelmente a maior responsável pelo desempenho obtido na separação. Pois, nota-se que os pontos localizados na zona próxima à ideal são todos da granulometria -70+50 mm, os pontos situados na zona de desempenho intermediário são da granulometria -50+25 mm e os pontos situados na zona de menor desempenho são os da granulometria -25+9,5 mm.

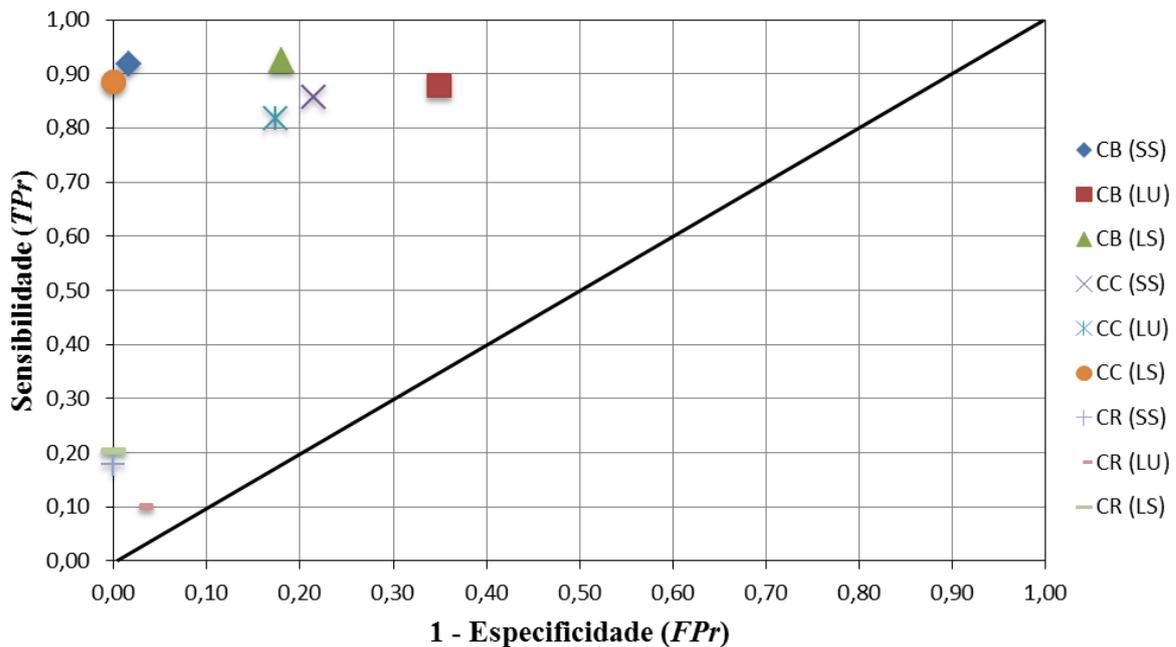
Ao exemplo do que foi adotado na análise dos resultados de acurácia, apresentam-se em seguida os gráficos ROC obtidos para as classificações considerando cada classe de minério separadamente (Figura 45 à Figura 47). Isto, conforme já citado, foi conseguido através de simulações matemáticas em planilha eletrônica.

Figura 45: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada classe de minério testada nas três condições, na granulometria -25+9,5 mm.



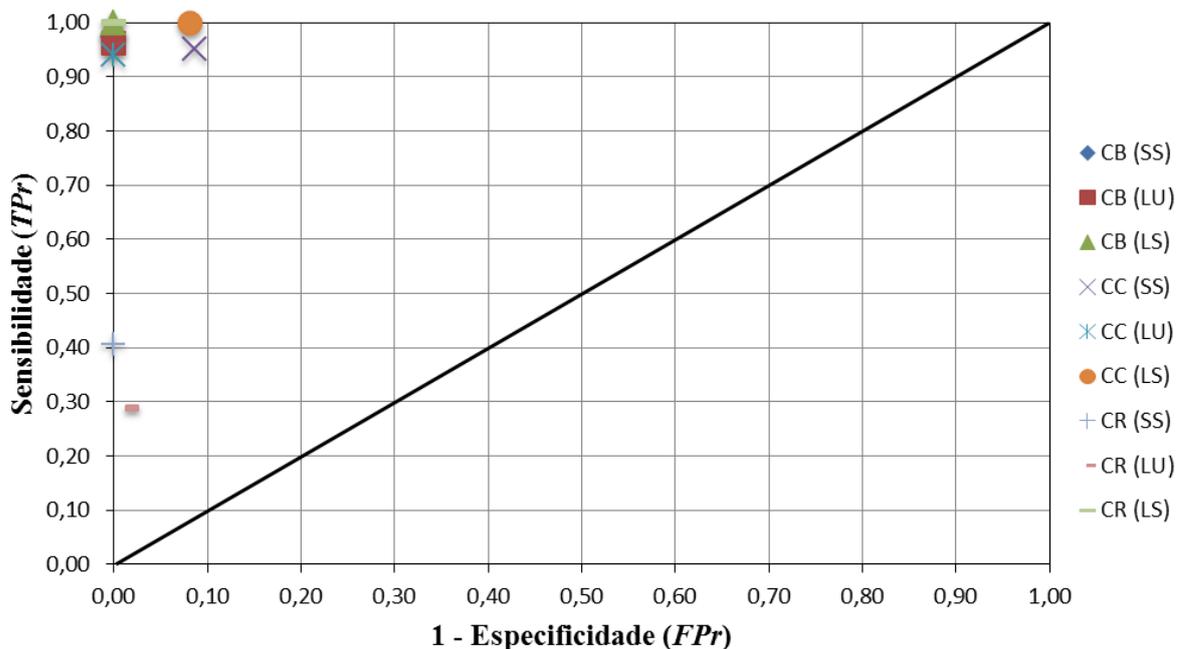
Fonte: adaptado de FAWCETT, 2006; GÜLCAN & GÜLSOY, 2017.

Figura 46: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada classe de minério testada nas três condições, na granulometria -50+25 mm.



Fonte: adaptado de FAWCETT, 2006; GÜLCAN & GÜLSOY, 2017.

Figura 47: gráfico ROC demonstrando os índices obtidos para cada classe de minério testada nas três condições, na granulometria -70+50 mm.



Fonte: adaptado de FAWCETT, 2006; GÜLCAN & GÜLSOY, 2017.

No se refere aos três gráficos apresentados acima (Figura 45 à Figura 47), volta a ser clara a influência do tamanho do material alimentado na eficácia da separação. Analisando-se o gráfico da Figura 45, nota-se que apenas a classe CC, na condição LU, atingiu padrão de

qualidade mais próximo da zona ideal, enquanto CB nas condições SS e LU ficaram numa zona intermediária de performance.

Quanto às demais classes restantes, todas ao serem plotadas no gráfico ficaram em zonas de baixo desempenho, porém denotando características de separação diferentes: as classes CC (LS e SS) e CB (LU) apresentaram classificação chamada liberal, isto é, com alta recuperação de minério, mas também alto índice de FP; já todas as condições de CR tiveram baixas recuperações de minério, porém com também baixos índices de FP.

No que tange a Figura 46, já é possível identificar-se uma concentração bem mais significativa de pontos na área de alta performance, com destaque para as classes CB e CC, nas condições SS e LS, respectivamente. Os piores resultados são visíveis na classe CR, que teve índices de sensibilidade ainda menores dos que os observados na granulometria anterior, e na classe CB (LU), que foi a que apresentou maiores índices de FP.

No último gráfico (Figura 47), que traz resultados da granulometria -70+50 mm, a mais grossa testada, é clara a obtenção das melhores performances de separação, para todas as classes. Observando-se a região noroeste do gráfico, zona tida como ideal, percebe-se que esta concentra a quase totalidade das classes e condições, excetuando-se apenas CR (nas condições LU e SS) e CC (nas condições LS e SS).

É destacável a baixa performance de separação observada na classe CR, que se mostrou, predominantemente, com índices de TP abaixo de 50%. Todavia, vale notar-se o aumento de desempenho obtido na granulometria -70+50 mm, principalmente no que diz respeito à condição LS, que apresentou separação considerada perfeita.

6 CONCLUSÕES

Considerando a meta estabelecida, de avaliar a performance da tecnologia de separação baseada em sensores na classificação de calcário ROM, pode-se concluir que esta foi alcançada. Logo, expõem-se nos tópicos abaixo as principais conclusões a que se chegou:

- ✓ a utilização de VANT (*drone*) no processo de amostragem, através de construção de modelo 3D das frentes de lavra (MVA), mostrou-se eficiente ao que se objetivava, tendo oferecido subsídios indispensáveis à coleta de amostras representativas das classes de minério e estéril;
- ✓ o sensor de raios-X não mostrou ter afinidade para classificar os materiais em teste, em nenhum dos cenários que se simularam. No entanto, analisando-se as densidades teóricas dos materiais testados, esse resultado torna-se plausível, pois minério e estéril tinham densidades de $2,8 \text{ g/cm}^3$ e $2,7 \text{ g/cm}^3$, respectivamente;
- ✓ o sensor óptico mostrou ter afinidade em todas as situações simuladas, apresentando recuperações metalúrgicas de calcário que variaram de 34% a 98%, de acordo com as condições e granulometrias testadas;
- ✓ o material na condição limpo-úmido foi o que apresentou a melhor média de recuperação metalúrgica, nas três faixas granulométricas;
- ✓ o tamanho de partícula alimentado mostrou-se intimamente ligado à recuperação metalúrgica, sendo que, enquanto se obteve média de 60% de recuperação de calcário na granulometria menor (-25+9,5 mm), a faixa -70+50 mm teve recuperação média de calcário de 95%;
- ✓ os valores de poder de neutralização (PN) mostraram pouca variação entre as condições testadas, apresentando índices em torno de 93% no produto e 53% no rejeito;
- ✓ considerando a mudança na granulometria, os valores médios de PN para produto e rejeito não tiveram grande divergência em relação aos anteriores (95% e 52,5%, respectivamente), entretanto, a variação foi bastante expressiva, principalmente na fração rejeito, onde se teve PN de 83% na faixa granulométrica -25+9,5 mm e 22,98% na faixa -70+50 mm;
- ✓ comportamento muito semelhante foi observado nos valores da razão de enriquecimento, cuja média foi claramente maior ao passo que se aumentou a granulometria de alimentação, com ênfase para a condição limpo-úmido;
- ✓ quanto à acurácia, a maior faixa granulométrica (-70+50 mm) foi a que teve os melhores índices, obtendo valores entre 97% e 98% para ambas as condições de alimentação;

- ✓ as mudanças na granulometria foram as que mais afetaram os valores de acurácia, em todas as condições de alimentação (sujo-seco, limpo-úmido e limpo-seco), implicando em variações de até 30% nos índices,;
- ✓ dentre as classes, calcário branco foi a que teve as melhores médias de acurácia nas duas maiores granulometrias, obtendo 88,6% na faixa -50+25 mm e 98,3% na faixa -70+25mm, frente 85,6% e 95,6% do calcário rosa e 71% e 99,3% do calcário cinza;
- ✓ quanto aos gráficos ROC, considerando a granulometria de forma geral, os três pontos melhor classificados são os que se referem à maior faixa granulométrica (-70+50mm), independentemente da condição simulada;
- ✓ na análise do gráfico ROC por classes, novamente tem-se a granulometria como fator chave, pois enquanto nenhum dos pontos da menor faixa granulométrica ficou inserido na zona de alto desempenho, na faixa -70+50 mm apenas o calcário rosa, nas condições sujo-seco e limpo-úmido, ficou fora desta.

Por fim, é importante citar que o estudo aqui apresentado não deve ser tido como resposta definitiva quanto à viabilidade de implantação da tecnologia na indústria estudada, pois sequer se consideraram relações entre alimentação horária e eficiência de separação [citadas por diversos autores, como GÜLCAN & GÜLSOY (2017), PRINZ & HAUS (2014), GÜLSOY et al. (2012)] e outras tantas variáveis operacionais. Para trabalhos futuros, seria de grande valia a complementação do estudo em baila, contemplando, além destas variáveis, o cenário econômico do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6453:2003. Cal virgem para construção civil – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 3 pp.

ABNT NBR 7175:2003. Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 4 pp.

ALANO, M. A. V. Pesquisa de calcário: relatório final. Inédito. Caçapava do Sul, 1974.

ALCARDE, J. C., RODELLA, A. A. Avaliação química de corretivos de acidez para fins agrícolas: uma nova proposição. *Revista Scientia Agricola*, 1996, vol.53, n.2-3, pp.211-216. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161996000200003>. Acesso em: 23 de outubro de 2016

ALIGARH MUSLIM UNIVERSITY. Department of Geology, Aligarh, India. Disponível em: <<http://www.geol-amu.org/notes/m10-1-1b.htm>>. Acesso em: agosto de 2018.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN – ANM – NM 26:2009. Agregados – Amostragem. Instituto Uruguayo de Normas Tecnicas, 10 pp.

BAPTISTA, C. F. A., NETO, R. O, SOUZA, L. E. Operações de lavra de curto prazo em mina de calcário - diagnóstico e proposição de melhoria. *REM – Revista Escola de Minas*, v. 67 n. 3, pp. 291-296. Ouro Preto, 2014.

BORBA, A. W. Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-riograndense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2006.

BORTOLOTTI, O. J. Petrografia dos mármore de Caçapava do Sul, RS. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 9, p. 37-65, 1987.

BOSLING, M., HEINRICHS, S., RÜßMANN, D., STEIN, R., PRETZ, T. Performance Analysis of Volumetric Scanning by Single Particle Measurement. In: *Sensor-based sorting, international conference and exhibition*, 2014. Alemanha, RWTH Aachen University. CD *Sensor-Based Sorting*, 2014.

BRASIL. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa SDA Nº 35. Brasília, 4 de julho de 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Coordenação-Geral de Apoio Laboratorial; Murilo Carlos Muniz Veras (Org.) – Brasília, MAPA/SDA/CGAL, 2014. 220 pp.

BRITANITE. Tabela densidade média de materiais. Disponível em: <<http://www.integracenter.com.br/portfolio/britanite/densidade.html>>. Acesso em: agosto de 2018.

BUTLER, R. D. Carbonate leaching of Uranium ores: a review. In AAEC - Symposium on uranium processing. Austrália, 1972.

COMEX. Laboratory sorting system MSX. Disponível em <<http://www.comex-group.com/products-and-solutions/sorting-technology/laboratory-sorting-system-msx>>. Acesso em agosto de 2018.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Gestão estratégica da geologia, da mineração e transformação mineral. Carta de integração geológico-geofísica, escala 1:100.000, Folha SH.22-Y-A-V Caçapava do Sul. CPRM: 2017.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeira do Sul, Folha SH.22-Y-A. Estado do Rio de Grande do Sul. Escala 1:250.000. Organizado por Carlos Alfredo Porcher e Ricardo da Cunha Lopes. Brasília. 2000.

DAER RS – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. Mapa Rodoviário do Rio Grande do Sul, edição comemorativa. Porto Alegre, 2017.

DAGOBERTO BARCELLOS S/A. Grupo DB. Disponível em <http://www.grupodb.com.br/sobre.php>. Acesso em 02 de novembro de 2016.

DOMINGUES, D., L., P. Caracterização geológica e geomecânica de travertinos. Dissertação de mestrado, 315 pp., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, departamento de engenharia civil, 2011.

DOS SANTOS, E. G., PARANHOS, R. S., PETTER, C. O., YOUNG, A., VERAS, M. M. Preliminary Analysis of the Application of Sensor Based Sorting on a Limestone Mine in the Region Caçapava do Sul, Brazil. Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress, 2017, San Diego, California, USA.

ERGÜN, L., Ş., GÜLSOY, Ö., Y., GÜLCAN, E. In: Sensor-based sorting, international conference and exhibition, 2014. Alemanha, RWTH Aachen University. CD Sensor-Based Sorting, 2014.

FABRIS, J. Avaliação qualitativa das diferentes variedades de mármore da região de Caçapava do Sul como matéria-prima para a produção de corretivos de acidez dos solos e cal. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, v.27, pp. 861-874, ed. Elsevier, 2006.

FEIERABEND, A., BOHLING, C., CORDTS, L. Using LIBS Spectroscopy for Analysis of Raw Materials and Production Waste. In: Sensor-based sorting, international conference and exhibition, 2014. Alemanha, RWTH Aachen University. CD Sensor-Based Sorting, 2014.

GOES, M., A., C., POSSA, M., V., LUZ, A., B. Amostragem de minérios. 48 p. Série Tecnologia Mineral - Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1991.

GOOGLE-MAPS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: junho de 2018.

GUADAGNIN, F., KUMAIRA, S., CARON, F., GONÇALVES, I., G. Modelos virtuais de afloramentos aplicados ao ensino de geologia. In: XVI Simpósio Nacional de Estudos Tectônico. Salvador – BA, maio de 2017. Disponível em <www.researchgate.net/publication/317368098_modelos_virtuais_de_afloramentos_aplicados_ao_ensino_de_geologia_estrutural_e_tectonica>. Acesso em: julho de 2018.

GÜLCAN, E., GÜLSOY, Ö., Y. Performance evaluation of optical sorting in mineral processing – A case study with quartz, magnesite, hematite, lignite, copper and gold ores. International Journal of Mineral Processing n. 169, pp. 129–141, ed. Elsevier, 2017.

GÜLSOY, Ö., Y., ERGÜN, L., Ş., GÜLCAN, E. Magnesite Recovery from Low Quality Ores and Tailings by Optical Sorting. In: Sensor-based sorting, international conference and exhibition, 2012. Alemanha, RWTH Aachen University. CD Sensor-Based Sorting, 2012.

HOERLLE, G., S., REMUS, M., V., D., Dani, N. Variedades de Mármore de Caçapava do Sul: Aspectos Petrográficos e Genéticos. Salão de Iniciação Científica (22. : 2010 out. 18-22 : Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

HOLST, G. C., LOMHEIM, T., S. CMOS/CCD Sensors and camera systems. JCD publishing, Winter Park, 2º ed., 2011

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Programa de Análise de Produtos. Cal hidratada. 2004. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/calHidratada.asp>>. Acesso em outubro de 2016.

J. MENDES utiliza veículo aéreo não tripulado para atualização topográfica da mina. Revista Minérios & Minerais, São Paulo, ano 40, n. 393, fev./mar. 2018.

JONG, T., DALMIJN, W. Dual energy X-ray transmission imaging: applications in metal processing. In: EPD Congress, M. E. Schlesinger, 2003.

KETELHODT, L., BERGMAN, C. Dual energy X-ray transmission sorting of coal. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 371-378, 2010.

KOBZEV, A., History of Sensor-Based Sorting in CIS. In: Sensor-based sorting, international conference and exhibition, 2014. Alemanha, RWTH Aachen University. CD Sensor-Based Sorting, 2014.

KOLACZ, J., Advanced Sorting System for Minerals with Multiple Sensing Features. In: Sensor-based sorting, international conference and exhibition, 2014. Alemanha, RWTH Aachen University. CD Sensor-Based Sorting, 2014.

KUERTEN, A. S. Pré-concentração de carvão mineral da Mina de Moatize com tecnologia Sensor Based Sorting – SBS. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharias de Minas, Metalurgia e de Materiais, 2017, Porto Alegre, RS, Brasil.

MANOUCHEHRI, H., R. Application of optoelectronic sorting technique for upgrading minerals and wastes. In: Conference in mineral engineering, Swedish Mineral Processing Research Association, 2006.

MANOUCHEHRI, H., R. Sorting: possibilities, limitations and future. In: Proceedings of Conference of Mineral Processing, Luleå University of Technology, Luleå, Suécia, 2003.

MINÉRIOS & MINERALES. São Paulo, ano 40, n. 393, fev./mar. 2018.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Instrução Normativa nº 35, 2006. Especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – MAPA, Brasília, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Perfil do calcário. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. MME, Brasília, 56 pp. 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Plano Nacional de Mineração 2030. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, MME, Brasília, 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, MME, Brasília. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pagina-inicial>>. Acesso em 25 de janeiro de 2018.

NAPIER-MUNN, T. J., MORREL, S., MORRISON, R. D., KOJOVIC, T. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization. JKRMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing 2, The University of Queensland, 1ª edição, 1996.

NELSON, M. G. Application of Odor Sensors to Ore Sorting and Mill Feed Control. University of Utah Mining Engineering Department, 2005. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/860997>>. Acesso em: julho de 2018.

NIENHAUS, K.,PRETZ, T., WOTRUBA, H., 2014. Sensor technologies: Impulses for the raw materials Industry. Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2014.

OOMS, D., PALM, R., LEEMANS, V., DESTAIN, M., F. A sorting optimization curve with quality and yield requirements. In: Pattern Recognition Letters (31), p. 983-990. Elsevier 2010. Disponível em: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/122164/5/AnnexeIII_PRL.pdf>. Acesso em: julho de 2018.

PARANHOS, R. S. Beneficiamento I: balanço de materiais. Universidade Federal do Pampa – Unipampa, 2010. Notas de aula.

PRETZ, T., Preface. In: SENSOR-BASED SORTING, INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2012. Alemanha, RWTH Aachen University. CD Sensor-Based Sorting, 2012.

PRINZ, S., HAUS, R. SBS – Qualifying Quartz Deposits for High Value Applications. In: SENSOR-BASED SORTING, INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2014. Alemanha, RWTH Aachen University. CD Sensor-Based Sorting, 2014.

RIBEIRO, M.; BOCCHI, P.R.; FIGUEIREDO F^o, P.M.; TESSARI, R.I. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, RS. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. 232 pp. (Boletim 127), 1966.

RIEDEL, F., DEHLER, M. Recovery of unliberated diamonds by X-ray transmission sorting. In: Diamonds – source to use 2010, pp. 193-200, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Gabrone, Bontswana, 2010.

SALTER, J. D., WYATT, N.P.G. Sorting in the minerals industry: past, present and future. Minerals engineering, vol. 4, pp. 779-796, novembro de 1991.

SAMPAIO, C.H. e TAVARES, L. M.M. Beneficiamento Gravimétrico: Uma Introdução aos Processos de Concentração Mineral e Reciclagem de Materiais por Densidade, Editora: UFRGS, Porto Alegre, 2005.

SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. CETEM, Rio de Janeiro, 350 pp. 2005.

SCURI, A., E. Fundamentos da Imagem Digital. Tecgraf/PUC-Rio de Janeiro, 95 pp. 2002. Disponível em: <<https://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/~scuri/download/fid.pdf>>. Acesso em: junho de 2018.

SHEMYAKIN, V., SKOPOV, S., KLIMENTENOK, G., PANOV, A. Theory and Practice of Bauxite X-Ray sorting. In: Light Metals, TMS (The Minerals, Metals & materials Society), 2015.

SILVA, A., C. Concentração física de minerais: Definição de concentração e balanço de massa. Universidade Federal de Goiás - UFG, 2012. Notas de Aula. Disponível em: <https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/cfm_02.pdf>. Acesso em: julho de 2018.

SILVA, C. R. Determinação de granulometria de ROM e britagem por análise de imagens. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharias de Minas, Metalurgia e de Materiais, 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA – UFJF. Câmera fotográfica. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/fisicaecidadania/conteudo/camera-fotografica/>>. Acesso em: agosto de 2018.

VERAS, M., M. Detecção de minério portador de elementos de terras raras do depósito Madeira/AM, Brasil assistido por tecnologia de *sensor-based sorting*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre-RS, 2018.

WOTRUBA, H. Sensor sorting technology - is the minerals industry missing a chance? Proceedings of the XXIII International Mineral Processing Congress. Istanbul, Turkey 3-8 September 2006.

YOUNG, A., S. Uso da separação automática por sensor de raio-X na pré-concentração de minérios: ferro e zinco. 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.

YOUNG, A., VERAS, M., PETTER, C., SAMPAIO, C. H. Revolução da tecnologia de sensores de raios-x e câmeras CCD nos estágios de beneficiamento de minério. World Mining Congress, 2016, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.