

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ORE SORTING PARA MINÉRIO SILICATADO DE
ZINCO**

Autor: Gilvan de Souza Amorim Júnior
Orientador: Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Março/2022

Gilvan de Souza Amorim Júnior

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ORE SORTING PARA MINÉRIO SILICATADO DE
ZINCO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia mineral

Orientador: Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Belo Horizonte

2022

A524e

Amorim Júnior, Gilvan de Souza.

Estudo da aplicação de ore sorting para minério silicatado de zinco [recurso eletrônico] / Gilvan de Souza Amorim Júnior. - 2022.

1 recurso online (78 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 69-78.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Zinco - Teses. I. Montenegro, Luiz Claudio Monteiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
MATERIAIS E DE MINAS/MP**



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO GILVAN DE SOUZA AMORIM JÚNIOR

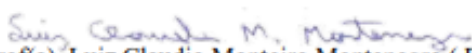
Realizou-se, no dia 25 de março de 2022, às 15:00 horas, TEAMS, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *Estudo da aplicação de Ore Sorting para minério silicatado de Zinco*, apresentada por GILVAN DE SOUZA AMORIM JÚNIOR, número de registro 2020675069, graduado no curso de ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro - Orientador (UFMG), Prof(a). Roberto Galery (UFMG Esc Engenharia), Prof(a). Andreia Bicalho Henriques (UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:


Aprovada

Reprovada

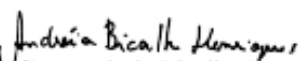
Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 25 de março de 2022.


Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Doutor)

Documento assinado digitalmente

 **ROBERTO GALERY**
Data: 27/04/2022 13:21:07-0300
Verifique em <https://verificador.it.br>

Prof(a). Roberto Galery (Doutor)


Prof(a). Andreia Bicalho Henriques (Doutora)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram pela execução desse trabalho, em especial a:

- Prof. Dr. Luiz Claudio, pela orientação na construção do trabalho;
- A Nexa Resources, por sempre incentivar meu desenvolvimento profissional;
- Aos meus gestores: Aleron Lima, Aníbal Neto, Thiago Nunan e Tiago Vitorino, pelo incentivo na execução do mestrado profissional;
- Ao Jorge Lucas e à toda equipe de tecnologia da Nexa, pelo apoio e construção dos resultados;
- Aos demais colaboradores da Nexa, por motivarem e ajudarem na execução do trabalho;
- A minha esposa, Ana Luíza, pelo incentivo e apoio familiar.

RESUMO

No Brasil as principais plantas de mineração de Zinco (Zn) em atividade estão localizadas nas cidades de Paracatu e Vazante, ambas em Minas Gerais. Os teores de Zn no ROM (Run-Of-Mine) da unidade Vazante vêm reduzindo com o passar dos anos, em 2006 o teor de alimentação na usina foi de 15,7%, passando para 11,34% em 2015 e sendo estimado para 10,75% em 2021. Para compensar a produção com redução do Zn contido na alimentação da planta, a unidade vem trabalhando de diversas formas, tais como: aumento de massa alimentada na usina, otimização das flotações e, também, a implementação de uma planta de ore sorting. Baseado na necessidade de ajustar as plantas de ore sorting para buscar o máximo de sua capacidade e recuperação, o trabalho tem por objetivo realizar estudos na planta de ore sorting já existente na empresa, como também investigar e analisar parâmetros ótimos para novas plantas. O estudo das curvas de recuperações, enriquecimento e teores rejeito em função do teor de alimentação permitiu enxergar um leque de oportunidades para simulação do ore sorting, para esse trabalho decidiu-se trabalhar com recuperação metalúrgica e teores de rejeito na faixa de 35 a 10 mm buscando se aproximar da realidade operacional do equipamento, onde diariamente existe uma busca para menores teores de rejeito variando assim a ejeção e conseqüentemente a recuperação em massa. Os estudos da aplicação do simulador no balanço de massa da usina permitiram a aplicação de diversos cenários de operação, assim como perceber o impacto da operação do ore sorting na produção de ZnC e alimentação de ROM na planta. O equipamento pode ser utilizado para diversas aplicações, tais como: redução de custos com moagem, flotação, disposição a seco e outros custos atrelados a alimentação de ROM na usina, sem impactar a produção de ZnC, aumento da produção de ZnC mantendo os teores do ROM e a capacidade de processamento da usina de beneficiamento, manter a produção de ZnC com a queda dos teores de ROM sem alterar a capacidade de processamento da usina de beneficiamento.

Palavras-chave: ore sorting; zinco; recuperação metalúrgica; recuperação mássica.

ABSTRACT

In Brazil, the main mining plants of Zn, in activity, are in the cities of Paracatu and Vazante, both in Minas Gerais. Zn contents in the ROM (Run of Mine) of the Vazante mine have been reducing over the years, in 2006 the feed content at the plant was 15.7%, to 11.34% in 2015, and is estimated to be 10.75% in 2021. To compensate for the production by reducing the Zn contained in the plant feed, the company has been working in many ways, such as: increasing the mass feed at the plant, flotation optimization, and, also the implementation of an ore sorting plant. Based on the need to adjust the ore sorting plants to seek the maximum of their capacity and recovery, this work aims to carry out studies on the ore sorting plant already existing in the company, as well as to investigate and analyze optimal parameters for new plants. The study of the curves of recoveries, enrichment, and tailings contents as a function of the feed content, allowed to observe a range of opportunities for simulation of the ore sorting, for this work it was decided to work with metallurgical recovery and tailings contents in the range of 35 to 10 mm seeking to approach the operational reality of the equipment, where there is a search for lower levels of tailings content thus varying the ejection and consequently the mass recovery. Studies to use the simulator in the mass balance of the plant allowed the application of several operating scenarios, as well as to perceive the impact of the ore sorting operation on the production of ZnC and ROM feed in the plant. The equipment can be used for various applications, such as milling cost reduction, flotation, dry stacking, and other costs tied to the feed of the plant, without impacting the production of ZnC, increasing ZnC production keeping ROM contents and the capacity of the plant, keep ZnC production with low ROM contents without changing the processing capacity of the plant.

Keyword: ore sorting; zinc; metallurgical recovery; mass recovery.

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1: Consumo energético em toda cadeia produtiva de mineração, incluindo etapas de lavra e tratamento de minérios.....	14
Figura 2: Classificação manual registrada por Agricola 1956	19
Figura 3: Mecanismo de funcionamento simplificado do ore sorting	20
Figura 4: Ilustração do ore sorting instalado em Vazante	21
Figura 5: Fluxograma de interpretação de dados e tomada de decisão.	21
Figura 6: Densidade dos principais minerais e rochas presentes na mina de Vazante.....	23
Figura 7: Tratamento das imagens após detecção de densidade via XRT.....	24
Figura 8: Comparação de espectro de energia recebida pelos sensores.	24
Figura 9: Diagrama de blocos para processo de amostragem.	26
Figura 10: Fluxos de massa e amostragem do ore sorting de Vazante.....	28
Figura 11: Representação de um moinho.	30
Figura 12: Filtração com formação de torta.	33
Figura 13: Equipamentos para teste industrial do sistema ore sorting	34
Figura 14: Fluxograma Britagem C.....	35
Figura 15: Fluxograma antigo	36
Figura 16: Retirada da CC da Britagem	37
Figura 17: Fluxograma atual.....	37
Figura 18: Fluxograma macro da usina de beneficiamento de Vazante para concentração de Zinco.....	44
Figura 19: Performance média com minério marginal.....	47
Figura 20: Performance média do ore sorting com ROM de 4 a 8% Zn.....	48
Figura 21: Performance média do Ore sorting com ROM de 8 a 12% Zn.....	49
Figura 22: Massa alimenta média em toneladas por dia.....	49
Figura 23: Utilização Ore sorting	50
Figura 24: Curva teor x recuperação metalúrgica para granulometria 16 a 35 mm.	51
Figura 25: Curva teor x recuperação mássica para granulometria 16 a 35 mm.	51
Figura 26: Curva teor x recuperação metalúrgica para granulometria 35 a 100 mm.	52
Figura 27: Curva teor x recuperação mássica para granulometria 35 a 100 mm.	52
Figura 28: Curva teor x enriquecimento para granulometria 16 a 35 mm.	53
Figura 29: Curva teor x enriquecimento para granulometria 35 a 100 mm	54

Figura 30: Curva teor alimentação x teor de rejeito para granulometria 16 a 35 mm.....	55
Figura 31: Curva teor alimentação x teor de rejeito para granulometria 35 a 100 mm.....	55
Figura 32: Simulador de resultados ore sorting.....	57

LISTA DE TABELAS:

Tabela 1: Informações de entrada do balanço de massa da usina de beneficiamento.	43
Tabela 2: Dados de simulação ore sorting para o caso 1	58
Tabela 3: Dados de simulação ore sorting para o caso 1	59
Tabela 4: Dados de simulação ore sorting para o caso 3	59
Tabela 5: Dados de simulação ore sorting para o caso 5	60
Tabela 6: Dados de simulação ore sorting para o caso 6	61
Tabela 7: Dados de simulação ore sorting para o caso 7	61
Tabela 8: Dados de simulação ore sorting para o caso 8	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	RELEVÂNCIA	15
3	OBJETIVO	16
3.1	Objetivo geral	16
3.2	Objetivo específico	16
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1	Aplicações do Zinco	17
4.2	Produção de Zinco no Brasil.....	17
4.3	Pré-Concentração	18
4.4	Ore sorting	19
4.4.1	Desenvolvimento histórico da tecnologia.....	19
4.4.2	Mecanismo de funcionamento.....	19
4.4.3	Tipos de sensores e aplicações	22
4.4.4	Diferenciação das partículas para o minério de Vazante.....	23
4.4.5	Aplicação do sensor XRT para o minério de Vazante.....	23
4.5	Coleta de dados	25
4.5.1	Amostragem	25
4.5.2	Fluorescência de raio X	27
4.5.3	Fluxograma de coletadas de dados do ore sorting em Vazante.....	27
4.6	Processamento mineral	28
4.6.1	Britagem	28
4.6.2	Moagem.....	29
4.6.3	Flotação	31
4.6.4	Filtração	32

5	METODOLOGIA	34
5.1	Aplicação industrial	34
5.1.1	Teste industrial	34
5.1.2	Adequações no fluxograma do processo produtivo.....	36
5.1.3	Aplicação da metodologia DMAIC	38
5.2	Estudo detalhado da aplicação após implementação	38
5.2.1	Curva teores de alimentação versus recuperações.....	39
5.2.2	Curva teor de alimentação versus enriquecimento	39
5.2.3	Curva teor de alimentação versus teor de rejeito.....	39
5.3	Simulador de resultados	40
5.4	Balanço de massa da usina.....	42
5.5	Aplicação global do Ore sorting	45
6	RESULTADOS	47
6.1	Aplicação dos testes industriais	47
6.2	Aplicação da metodologia Six Sigma	49
6.3	Curvas detalhadas da aplicação após implementação.....	50
6.3.1	Curva teor de alimentação versus recuperações	50
6.3.2	Curva teor de alimentação versus enriquecimento	53
6.3.3	Curva teor de alimentação x teor de rejeito.....	54
6.4	Simulador de resultados	56
6.5	Balanço de massa da usina e aplicação global do ore sorting	57
6.5.1	Caso base	58
6.5.2	Caso 1	58
6.5.3	Caso 2	58
6.5.4	Caso 3	59
6.5.5	Caso 4	59

6.5.6	Caso 5	60
6.5.7	Caso 6	60
6.5.8	Caso 7	61
6.5.9	Caso 8	61
6.5.10	Análise de resultados	62
7	CONCLUSÕES	64
8	TRABALHOS FUTUROS	66
9	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXOS	70

1 INTRODUÇÃO

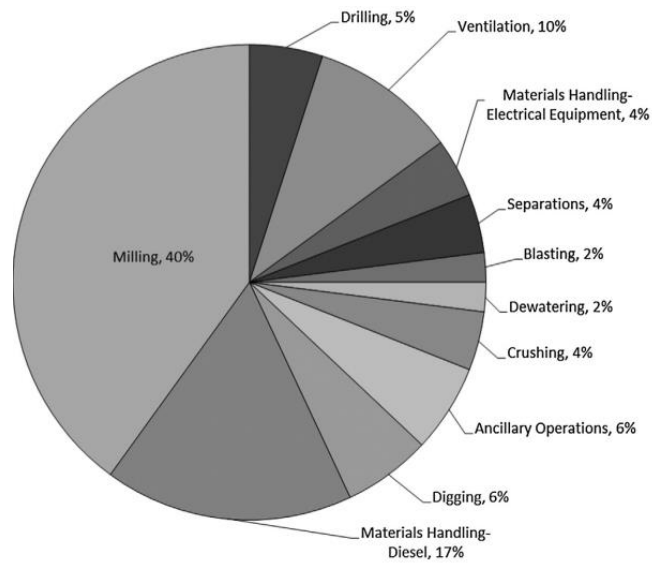
Os depósitos de zinco (Zn) estão espalhados por todo o mundo, em países como, Canadá, EUA, Peru e Brasil. No Brasil as principais plantas de mineração de Zn em atividade estão localizadas nas cidades de Paracatu e Vazante, ambas em Minas Gerais. A produção de Zn contido beneficiado no Brasil em 2017 foi de 156.470 t, sendo que a unidade de Vazante colaborou com 134.038 t.

Os teores de Zn no ROM (Run-Of-Mine) da unidade Vazante vêm reduzindo com passar dos anos. Em 2006 o teor de alimentação na usina foi de 15,7%, passando para 11,34% em 2015 e sendo estimado para 10,75% em 2021. Para compensar a produção com redução do Zn contido na alimentação a unidade vem trabalhando de diversas formas, tais como: aumento de massa alimentada na usina, otimização das flotações e implementação de uma planta de ore sorting.

Com a redução nos teores de uma mina com o passar dos anos o ritmo de produção tende a cair. Para contornar essa situação torna-se necessário manter a alimentação do elemento de interesse, seja através do aumento de capacidade de massa alimentada na planta ou através de uma pré-concentração. A rota do minério que possui uma pré-concentração por ore sorting permite um menor volume de ROM alimentado na planta, sem que isso impacte na produção do elemento de interesse. Como consequência teremos uma redução no consumo energético das áreas de cominuição, permitindo assim redução dos custos (LESSARD *et al.*, 2014).

Lessard *et al.* (2014) mostram ainda que os custos com energia utilizados na adequação do minério para a etapa de concentração são bastante elevados, em média 44% do consumo total de um empreendimento minerário estão ligadas as etapas de cominuição, britagem e moagem.

Figura 1: Consumo energético em toda cadeia produtiva de mineração, incluindo etapas de lavra e tratamento de minérios



Fonte: BCS, Incorporated, 2007 apud LESSARD *et al.*, 2014.

A empresa Nexa Vazante conta com dois equipamentos, sendo um equipamento já em operação na unidade, modelo XSS com capacidade de até 40 t/h e um modelo novo, o KSS com capacidade de até 100 t/h. Os dois equipamentos se diferem por capacidade de processamento e por seus sensores, o XSS possui correia com 1 metro de largura e atua apenas com sensor de transmitância de raio X, já o KSS possui correia com 2 metros de largura e pode atuar até com 4 sensores de forma combinada, são eles: indutivo, laser 3D, ótico e raio X.

2 RELEVÂNCIA

O ore sorting da unidade tem por objetivo ajudar no aumento do percentual de Zn na alimentação da usina bem como a redução do *cut off* da mina. Ao passar minérios com teores marginais (3 a 4%) na planta de Sorting é possível enriquecer esse ROM para teores acima do *cut off*.

Baseado na necessidade de ajustar as plantas de ore sorting para buscar o máximo de sua capacidade e recuperação, o trabalho visa estudar de forma detalhada as etapas de implementação e operação do sorting atual e propor diferentes rotas de operação, buscando assim a maximização do seu rendimento e redução com custos da planta.

O ore sorting atua junto ao processo de britagem modificando as características da alimentação da planta de processamento mineral. Além da redução da massa e aumento do teor há ainda os possíveis impactos na moagem, classificação, concentração, separação sólidos-líquidos e empilhamento a seco.

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo geral

Através de estudos na planta de ore sorting já existente na empresa, desde o seu teste industrial até sua operação atual, o presente estudo tem por objetivo modelar diferentes cenários de operação, visando a maximização da recuperação metalúrgica da etapa de pré-concentração como também a redução dos custos da planta em geral, considerando as etapas de moagem, flotação, filtrações e empilhamento a seco.

3.2 Objetivo específico

- Apresentar o histórico de implantação do Ore sorting para minério silicatado de Zn;
- Estudo detalhado das curvas teor de alimentação x recuperações, teor de alimentação x enriquecimento e teor de alimentação x teor de rejeito;
- Modelar cenários de operação;
- Implementação dos cenários no balanço de massa da planta;
- Demonstrar os ganhos potenciais dos cenários.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Aplicações do Zinco

Representado na tabela periódica pelo símbolo Zn e número atômico 30, o zinco tem aplicação nas indústrias automobilísticas, construção civil e de eletrodomésticos por sua facilidade de combinação com outros metais e propriedade anticorrosiva. A galvanização, processo de revestimento das estruturas de aço para proteção contra corrosão, é a principal responsável pela demanda deste metal no Brasil.

O Zn pode ser utilizado em diferentes aplicações, dentre elas estão: produção de ligas ou na galvanização de estruturas de aço, aditivo de certas borrachas e tintas. O Zn também desempenha um papel importante na agropecuária, onde pode ser aplicado no desenvolvimento de animais e promover o crescimento das plantas (SILVA, 2006).

Silva (2006) explica que um dos principais compostos de Zn são os óxidos (ZnO), onde podem ser aplicados na indústria de cerâmica, borrachas e tintas. O Sulfato de zinco (ZnSO₄) geralmente é aplicado na indústria têxtil e para o enriquecimento de solos que são pobres em Zn.

4.2 Produção de Zinco no Brasil

Os principais países produtores de Zn são Austrália, Canadá, China, Estados Unidos e Peru, totalizando 70,0 % da produção mundial, enquanto o Brasil tem 1% das reservas mundiais.

A produção brasileira de Zn se concentra no Estado de Minas Gerais nas minas de Vazante, localizada na cidade homônima, e Morro Agudo, localizada em Paracatu, ambas pertencentes à NEXA Resources, única empresa produtora de zinco no país. A mina de Vazante está entre as 12 maiores minas de Zn no mundo (IBRAM, 2018).

4.3 Pré-Concentração

A pré-concentração tem crescido bastante nos últimos anos em função de dois fatores primordiais, sendo eles: a queda dos teores das minas já existentes e a maior complexibilidade mineralógica dos minérios disponíveis. Assim, a pré-concentração torna-se uma alternativa para enfrentar os altos custos de instalação e operação de uma usina de beneficiamento tradicional (BERGERMAN, *et al.* 2012).

Bergaman *et al* (2012) trazem ainda os métodos mais conhecidos da pré-concentração, sendo eles separadores de cone e tambor Wenco, Teska, Drewboy, Norwalt, Dynawhirlpool, Tri-flo e os ciclones de meio denso. A granulometria do minério é a principal responsável pela escolha do método a ser aplicado, mas o mesmo também pode ser influenciado pelas vazões e faixas densitárias.

Os mecanismos de pré-concentração podem ser variados, porém nos últimos anos a tecnologia via ore sorting tem crescido consideravelmente. As operações por esse método são relacionadas a um fluxo mais grosseiro, em geral relacionadas à britagem primária ou secundária.

Freitas Neto, *et al.* (2018) mostra em seu estudo o impacto da tecnologia via sorting na flotação do minério de chumbo e zinco da Mina de Vazante, da Nexa Resources. Os resultados trouxeram respostas positivas nos teores de concentrado, aumento em até 3,5%, elevação da recuperação metalúrgica em até 0,8% e ainda a retirada de minerais contaminantes que podem gerar impacto negativo na metalurgia.

A aplicação da pré-concentração pode também impactar os resultados relacionados a abrasividade do material alimentado na planta de beneficiamento.

Peres, Massola e Bergmann (2017) realizaram dois estudos para minérios de cobre e zinco aplicando a metodologia de Bond. Os resultados trouxeram uma análise bastante interessante. Para o minério de cobre os resultados foram positivos, resultando em um menor índice de abrasividade para os concentrados, já para o minério de zinco o concentrado obteve um maior índice de abrasividade. A influência da pré-concentração varia de acordo com a composição mineralógica do minério, eles tendem a trazer bons benefícios nos casos em que os silicatos se concentram nos minerais de ganga.

4.4 Ore sorting

4.4.1 Desenvolvimento histórico da tecnologia

A seleção manual de minérios tem sido utilizada a vários anos, há prática foi registrada por Agricola (1556). A classificação manual envolvia a avaliação visual das partículas e sua posterior classificação em minério e estéril. Esse tipo de classificação foi perdendo espaço à medida que os volumes de produção foram aumentando (WILLS; FINCH, 2015).

Figura 2: Classificação manual registrada por Agricola 1556



Fonte: WILLS; FINCH, 2015

Wills e Finch (2015) mostram que o sistema baseado em Sorting foi introduzido pela primeira vez no final dos anos 1940 onde a técnica se tornou bastante útil para o processamento de certos minerais, como por exemplo: diamantes, calcário, magnesita dentre outros.

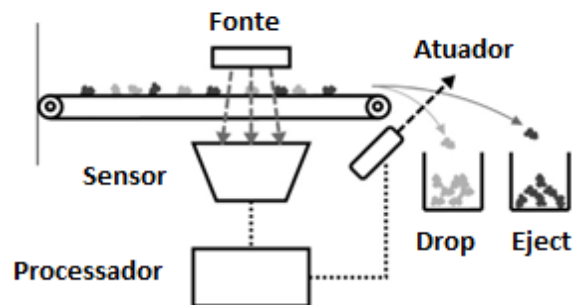
4.4.2 Mecanismo de funcionamento

Segundo Wills e Finch (2015) os sistemas de ore sorting inspecionam partículas para determinar o valor de algumas propriedades, sejam elas densidade, cor, formato, dentre outras. Tudo isso é feito em tempo real, os dados são processados e as informações criam uma base para a ejeção

(ou retenção) daquelas partículas que atendem a algum critério (por exemplo, densidade da partícula). Portanto, é necessário existir uma diferença na propriedade física entre os minerais valiosos e a ganga. Objetos de valor ou resíduos podem ser selecionados para ejeção.

Lessard, Bakker e McHugh (2014) demonstram através da Figura 3 um esquema básico do mecanismo de funcionamento do ore sorting, onde o material passa por uma fonte de identificação de características que são processadas em tempo real e fornecem logo à frente as informações para um atuador que irá ejetar ou não a partícula.

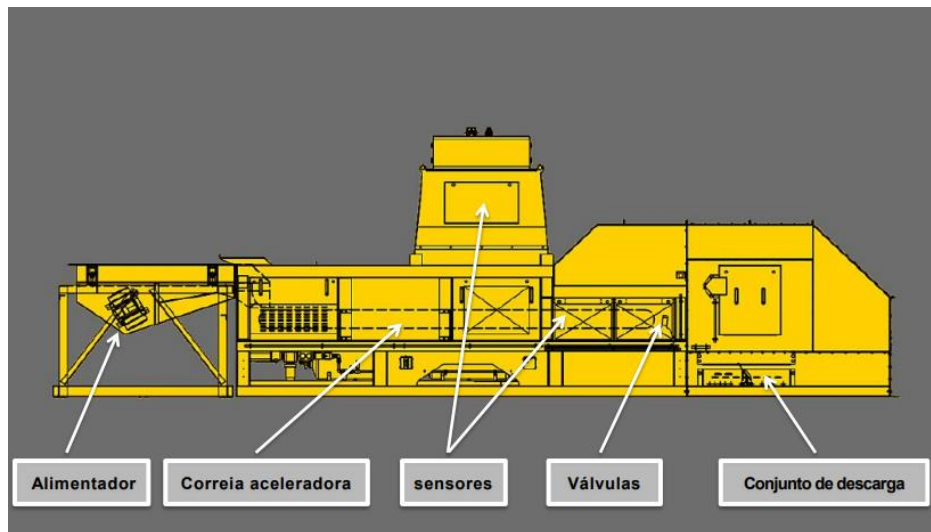
Figura 3: Mecanismo de funcionamento simplificado do ore sorting



Fonte: Lessard, Bakker e McHugh, 2014.

O ore sorting instalado em Vazante atualmente segue o esquema mostrado na Figura 4, onde o minério passa por um alimentador vibratório levando o material até uma correia aceleradora, depois o material passa pelos sensores que fazem a leitura da partícula e posteriormente chegam à barra de válvula que ejetam as frações programadas, podendo ser estéril ou minério.

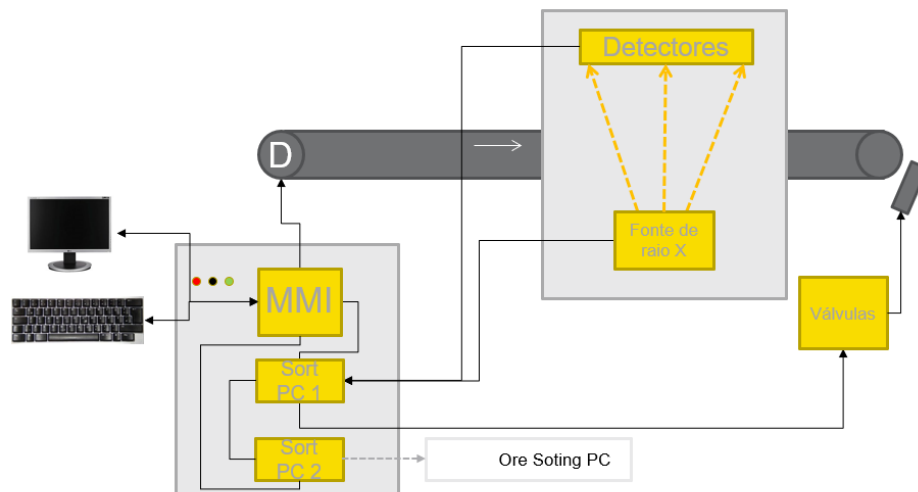
Figura 4: Ilustração do ore sorting instalado em Vazante



Fonte: Manual Stainert.

A interface entre os sensores e a tomada de decisão das barras de válvulas em ejetar ou não a partícula é realizada por um mecanismo computadorizado, que de forma macro pode ser representado pela Figura 5.

Figura 5: Fluxograma de interpretação de dados e tomada de decisão.



Fonte: Manual Stainert.

4.4.3 Tipos de sensores e aplicações

Existem diversos sensores que podem ser utilizados na aplicação de Ore sorting, dentre eles estão: sensores ópticos, cor, indução, forma geométrica absorção atômica, fluorescência, dentre outros.

Sousa *et al.* (2020) trazem um estudo onde a pré-concentração foi aplicada para o minério de lepidolita (LPD) presente na jazida de Alvarrões, localizada em Gonçalo, Portugal. A metodologia aplicada foi a utilização de sensores óticos, onde as amostras foram fotografadas por uma câmera de alta resolução. A partir das imagens foi desenvolvido um algoritmo binário para identificar os minerais LPD e não LPD. Com as definições do algoritmo foi possível realizar uma série de simulações, estimando teores de corte, grau de enriquecimento e recuperação metalúrgica do Li.

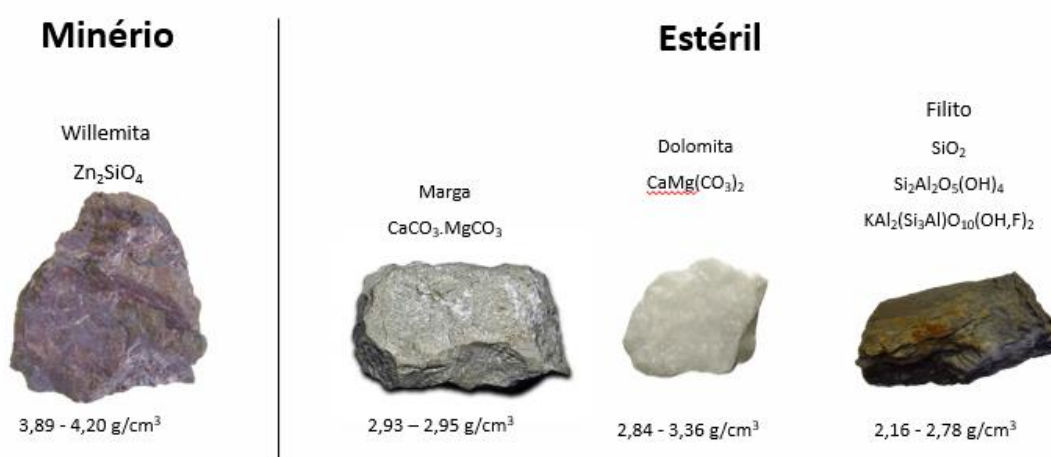
Li *et al.* (2020) aplicaram a tecnologia de Sorting utilizando a fluorescência de raio X (XRF) para minério de cobre de uma mina em British Columbia no Canadá. O teste foi realizado usando um XRF portátil Olympus INNOV-X Alpha 6000, onde conseguiram mostrar que a utilização de XRF pode ser aplicada devido as suas respostas quantitativas e a rápida velocidade de medições. O estudo requer umas aplicações mais amplas, em diferentes tipos de minério e que o teste possa ser aplicado em escala piloto para validar a aplicação industrial.

Lessard, Bakker e McHugh (2014) desenvolveram um estudo de caso utilizando a transmissão de raio-X (DE-XRT), essa tecnologia é aplicável na classificação de minério através das diferenças na absorção atômica, presente em diferentes elementos. O estudo propõe uma pré-concentração através do Ore sorting para duas minas de molibdênio, onde foram feitas variações na ejeção de estéril de forma baixa, moderada e alta. Essas variações ajudaram na constatação de diferentes formas de operação, onde pode se preservar uma maior recuperação metalúrgica, menor ejeção de estéril e menor enriquecimento ou menor recuperação metalúrgica, maior ejeção de estéril e maior enriquecimento. Após os testes de bancada foram realizadas análises econômicas para os seguintes cenários: caso base, sem a implementação do Ore sorting; Sorting reduzindo a alimentação da planta e consumo energético; Sorting mantendo a alimentação de ROM. Através desses três cenários foram realizados estudos nas configurações do equipamento e seus respectivos impactos econômicos, simulando assim, OPEX, rendimento, consumo energético e consumo de reagentes.

4.4.4 Diferenciação das partículas para o minério de Vazante

O minério de Vazante possui características de densidade que podem se diferenciar facilmente do estéril franco, a Willemita é um silicato de zinco (Zn_2SiO_4) com densidade superior aos tipos de estéril mais comuns em Vazante, que são a dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), marga ($CaCO_3.MgCO_3$) e o filito ($Si_2Al_2O_5(OH)_4$, $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$) (VALENTE, 2019).

Figura 6: Densidade dos principais minerais e rochas presentes na mina de Vazante.



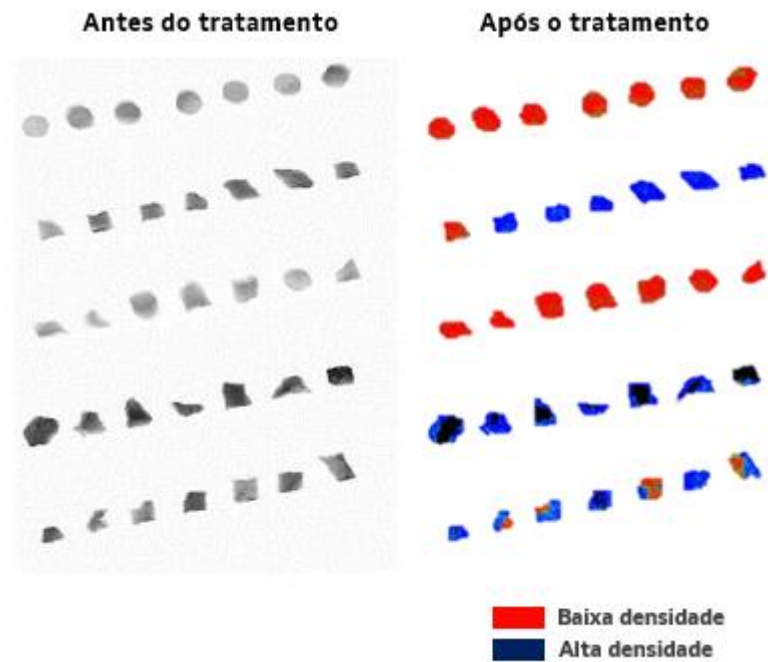
Fonte: Autoria própria.

4.4.5 Aplicação do sensor XRT para o minério de Vazante

Magalhães, *et al.* (2019) explicam que nessa técnica são utilizadas duas tecnologias para a identificação, sendo elas: transmissão de raio X de dupla energia (DE-XRT) e um sinal único de raio X (para análise de inclusão). A operação consiste basicamente na emissão de um feixe de raio X na amostra, transmissão através da matéria, atenuação da mesma e detecção da radiação residual transmitida. Essa radiação se converte em sinal elétrico, que posteriormente é convertido em uma imagem com escalas de cinza, onde os pontos mais escuros são referentes a uma maior absorção, ou seja, maior densidade.

A explicação trazida por Magalhães, *et al.* (2019) pode ser vista com maior clareza na Figura 7, onde foi realizado um tratamento das imagens para melhor entendimento.

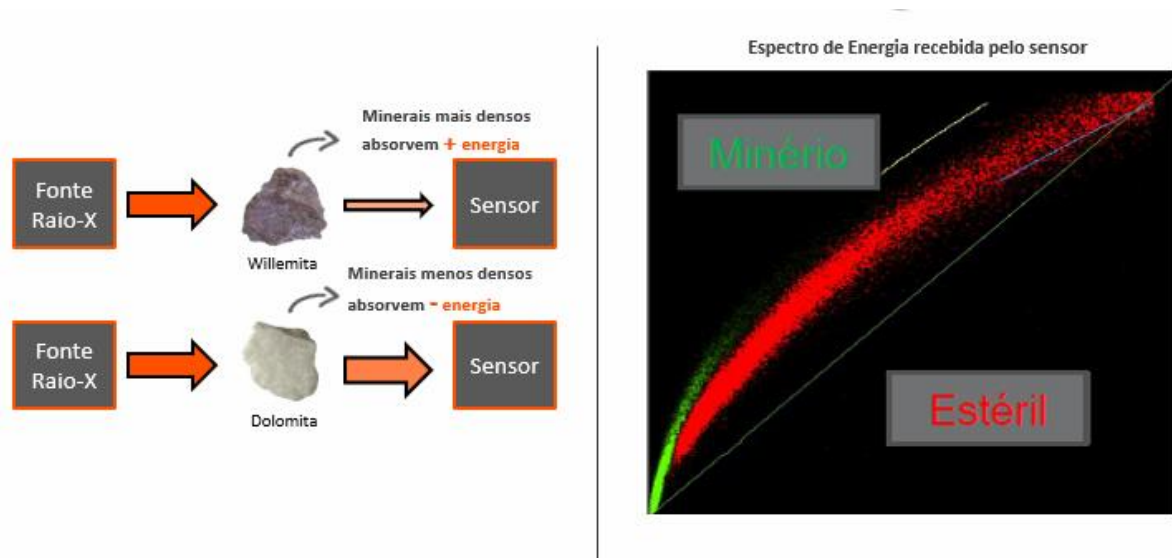
Figura 7: Tratamento das imagens após detecção de densidade via XRT



Fonte: Autoria própria.

Para o minério de Vazante percebe-se uma boa diferenciação entre o mineral minério willemita e os principais minerais de ganga: dolomita, filito e marga. A Figura 8 demonstra a diferença de energia recebida pelo sensor quando comparamos as partículas que possuem uma maior concentração de willemita com os minerais deletérios.

Figura 8: Comparação de espectro de energia recebida pelos sensores.



Fonte: Autoria própria.

4.5 Coleta de dados

4.5.1 Amostragem

Para entendermos o conceito de amostra, primeiramente é necessário definirmos população, que se entende como um conjunto de elementos que apresentam uma ou mais características em comum. A amostra trata-se de um subconjunto de uma população e deve ser considerada finita, a mesma deve ser selecionada seguindo certas regras e deve ser representativa, de modo que ela possa reproduzir todas as características presente na população (TAVARES, 2007).

Quando se tem necessidade de realizar estudos sobre uma população, quase nunca é possível examinar todos os seus elementos de interesse, tornando assim usual a utilização de uma amostra. A inferência estatística nos dá elementos para generalizar, de maneira segura, as conclusões obtidas da amostra para a população (CORREA, 2013).

Correa (2013) esclarece ainda que é errôneo pensar que quando se tem todos os elementos de uma população a precisão dos dados se torna maior. Na coleta e manuseio de uma grande quantidade de dados ocorre uma certa quantidade de erros que geralmente são maiores do que estamos sujeitos quando generalizamos, via inferência, através de uma amostra bem selecionada.

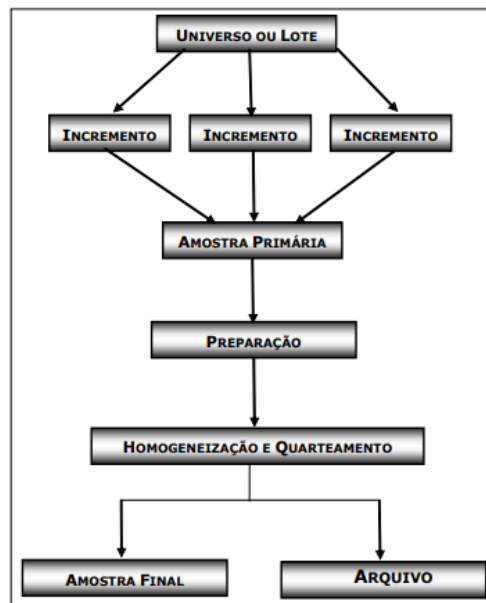
No âmbito mineral a elaboração de um plano de amostragem fundamenta-se na qualidade, levando em conta as características da população, os objetivos e as operações utilizadas. Fatores como massa específica, tamanho da partícula, e umidade se destacam na escolha do sistema de amostragem a ser utilizado (OLIVEIRA et al.,2007).

A amostragem em usinas de beneficiamento é feita a partir da tomada de incrementos em fluxo, que é realizada em intervalos iguais de tempo, quando os parâmetros de interesse do minério são constantes. Nem sempre é possível realizar essa coleta constantemente, então nesses casos, o incremento é coletado em função de uma certa quantidade de material acumulada ao longo do tempo (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A amostragem é realizada através das seguintes etapas: elaboração de um plano de amostragem, obtenção da amostra, preparação da amostra e determinação de um plano de qualidade. (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007)

Sampaio, França e Braga (2007) estabelecem o seguinte diagrama para obtenção de uma amostra:

Figura 9: Diagrama de blocos para processo de amostragem.



Fonte: SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007.

Assim segue as principais definições:

Universo: O universo pode ser definido como a massa original de um dado material do qual se deseja conhecer propriedades específicas, segundo as análises realizadas em uma amostra.

Incremento: trata-se das porções retiradas do universo.

Amostra Primária: A composição dos vários incrementos retirados ao longo de um determinado intervalo de tempo constitui a amostra primária.

Amostra Final: é uma redução da amostra primária, por motivo de manuseio e realização de testes.

4.5.2 Fluorescência de raio X

A fluorescência de raio X (XRF) pode ser considerada uma técnica altamente qualificada para a identificação e quantificação de elementos químicos inorgânicos em diferentes matrizes. Esse método constitui uma técnica de análise multielementar que gera como produto uma análise quantitativa sem a necessidade de uma separação química prévia (VIVES *et al.* 2002).

A XRF tem a capacidade de identificar e quantificar as concentrações dos elementos químicos presentes nas amostras analisadas, isso se dá pelo fato de que a radiação de fluorescência que é emitida proveniente de cada átomo é característica da espécie química, sendo assim, não existe familiaridade entre as radiações de radiofrequência emitidas por diferentes átomos da tabela (DIAS *et al.* 2017).

Dias *et al.* 2017 trazem também as possibilidades de instrumentação dos XRF, sendo que os espectrômetros de laboratório, possuem a vantagem de ter uma maior sensibilidade e qualidade nas leituras, porém, por serem equipamentos robustos, se deparam com as dificuldades de movimentação, já os espectrômetros portáteis possuem uma menor resolução e sensibilidade, mas podem realizar tarefas que os laboratoriais não conseguem por questão de mobilidade.

4.5.3 Fluxograma de coletadas de dados do ore sorting em Vazante

Conforme pode ser visto na figura 10 as massas do ore sorting que está instalado em Vazante se divide em três fluxos principais, sendo eles: alimentação, material de ejet e o material de drop. Pode-se perceber que existe amostradores somente nas correias de drop e ejet, assim, são coletadas apenas amostras nesses dois pontos e realizado um cálculo para estimar os teores de alimentação.

Figura 10: Fluxos de massa e amostragem do ore sorting de Vazante.



Fonte: Autoria própria.

O fluxo de coleta de dados do ore sorting se inicia com as amostragens nas correias de drop e eject por um amostrador do tipo cross belt. Os amostradores automáticos do tipo cross belt são apropriados para sólidos granulares que se movem por correia transportadora, consiste basicamente em um cortador com movimento rotativo transversal que irá retirar o material da correia para uma calha de descarga lateral (ENGENDRAR, 2005).

Após a coleta das amostras o material é enviado para o laboratório, onde passa pelos seguintes processos: britagem, quarteamento, moagem de placas, fusão de pastilha e leitura dos elementos por fluorescência de raio X.

4.6 Processamento mineral

4.6.1 Britagem

A Britagem é o primeiro estágio mecânico no processo de cominuição, cujo objetivo principal é a liberação dos minerais valiosos da ganga. Trata-se de uma operação tipicamente seca que é realizada em dois ou três estágios, isto é, britagem primária, secundária e terciária (WILLS; FINCH, 2015).

Wills e Finch (2015) explicam que a britagem secundária recebe o produto da primária que geralmente fica em torno de 15 cm de diâmetro, onde alguns constituintes prejudiciais no minério, como metais, madeira, argilas e limos já foram removidos, tornando o minério mais fácil de ser manuseado. Britadores secundários e terciários geralmente também operam com produtos secos e os equipamentos nesses estágios não precisam ser tão robustos quanto no primeiro. A finalidade desses estágios é reduzir o minério a um tamanho adequado para a moagem.

Cada britagem requer um tipo de equipamento, os mais utilizados para cada estágio estão relacionados a seguir: Primária: britador de mandíbulas, britador giratório, britador de impacto e o de rolos dentados; Secundária: britador giratório secundário, britador de mandíbulas secundário, britador cônico, britador de martelos e britador de rolos; Terciária: em geral é o último estágio de britagem, no entanto, existem usinas com mais de três estágios, cujo fato está ligado às características de fragmentação do material ou à granulometria do produto final, os equipamentos utilizados são os britadores cônicos, cuja granulometria máxima do produto obtido está compreendida na faixa de 25 a 3 milímetros (mm), com uma razão de redução de 4:1 ou 6:1. Estes equipamentos exigem um maior controle de operação, geralmente trabalhando em circuito fechado (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

4.6.2 Moagem

A moagem trata-se de uma operação de cominuição, que geralmente abordam os produtos das britagens. Ela é feita através de mecanismos de arredondamento das partículas, quebra de pontas e abrasão, diferente da britagem que utiliza compressão e impacto. São, portanto, as faixas de tamanhos em que se trabalha, como também os mecanismos de redução de tamanhos que distinguem as operações de moagem e de britagem (CHAVES; PERES, 2003).

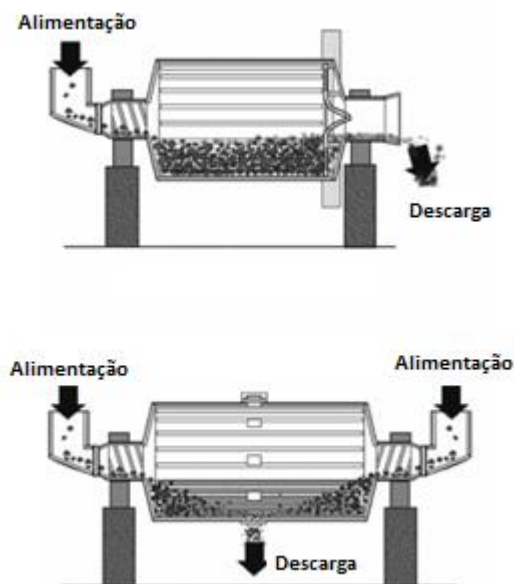
Luz, Sampaio e França (2010) explicam que cada minério tem uma malha ótima para ser moído, dependendo de muitos fatores, incluindo a distribuição do mineral útil na ganga e o processo de separação que vai ser usado em seguida. A moagem é uma operação muito importante e seu desempenho tem impacto direto nas etapas subsequentes. A submoagem resulta em produtos com granulometria grosseira, inviabilizando o processo de concentração. Por fim,

sobremoagem também não é viável pois gera custos elevados e perdas no processo de concentração por geração de elevadas porcentagens de finos.

Os moinhos tubulares são os mais utilizados no âmbito da mineração, eles possuem três tipos básicos: barras, bolas e autógeno/semiautógeno (AG / SAG). Sua estrutura é formada por uma concha cilíndrica horizontal, provida de revestimentos renováveis e uma carga de corpos moedores se for o caso. O diâmetro do moinho determina o impacto que pode ser exercido pelo meio sobre as partículas de minério e, em geral, quanto maior o tamanho do alimentador, maior o diâmetro do moinho precisa ser. O comprimento em conjunção com diâmetro, determina o volume e, portanto, a capacidade do moinho (WILLS; FINCH, 2015).

Wills e Finch (2015) apontam ainda: o material é normalmente alimentado ao moinho continuamente através de um alimentador (*feed*), o produto moído sai por uma descarga (*discharge*), embora em certas aplicações o produto pode deixar o moinho através de vários partes espaçadas em torno da periferia da carcaça, conforme a Figura 11.

Figura 11: Representação de um moinho.



Fonte: Wills e Finch 2015.

4.6.3 Flotação

A flotação é um processo físico-químico de concentração que ocorre em uma mistura heterogênea de partículas suspensas em fase aquosa, chamada de polpa. A polpa recebe um fluxo de ar que, em forma de bolhas, se liga à partícula de minério. A separação das espécies minerais presentes na polpa é possível devido justamente à sua heterogeneidade, através das diferenças em suas propriedades de superfície (PERES e ARAÚJO, 2006).

Os conceitos de hidrofobicidade e hidrofiliabilidade são as propriedades que fazem com que uma partícula mineral tenha mais afinidade pela fase líquida ou pela fase gasosa, situação na qual os minerais são capturados pelas bolhas de ar. Uma vez anexados à bolha, os minerais de interesse são levados à superfície e recuperados na camada de espuma (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

De acordo com Wills e Napier-Munn (2006), o processo de recuperação dos minerais de valor através da flotação por espuma acontece através de três mecanismos, a saber:

- a) Captação seletiva de partículas sólidas por bolhas de ar;
- b) Arraste de partículas pela água, passando através da espuma;
- c) Aprisionamento de partículas entre os minerais agregados às bolhas de ar na espuma.

Dentre os mecanismos citados, os dois últimos trata-se de arraste e aprisionamento físico das partículas, sem seletividade baseada em teor que promova a separação eficiente entre minério e ganga. Já o primeiro deles, a captação da partícula mineral por uma bolha de ar, é o grande responsável pela recuperação do mineral de valor, uma vez que acontece através da diferença entre as propriedades de superfície das partículas presentes na polpa.

Tais diferenças nas características de superfície dos minerais devem-se a: eletronegatividade, geometria e arranjo dos átomos que constituem uma molécula, mais especificamente, à distribuição dos elétrons ao redor de um átomo. Esta distribuição dos elétrons gera o que se chama polaridade, classificando as substâncias químicas em polares e apolares (MONTE e PERES, 2004).

O conceito de polaridade é importante para a flotação pois, de acordo com Chaves, Filho e Braga, (2010), as substâncias constituídas de moléculas apolares têm afinidade pela fase gasosa, formada por moléculas de espécie também apolar. Esses minerais são então capturados pelas bolhas de ar. São os chamados minerais hidrofóbicos. O contrário da hidrofobicidade é a hidrofilicidade, em que as partículas chamadas hidrofílicas têm afinidade pela água.

Entretanto, a hidrofobicidade natural não é uma característica comum entre as espécies minerais, sendo necessário muitas vezes induzi-la através da adição de reagentes químicos (coletores) à polpa para viabilizar o processo de flotação. Outros tipos de reagentes também são indispensáveis para garantir a recuperação do minério de interesse, como por exemplo os espumantes e modificadores ou reguladores (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

Com isso, é possível notar a importância dos reagentes para a flotação, uma vez que torna possível a aplicação do método em uma vasta gama de minerais, pois as substâncias modificam as características das partículas. A atuação dos reagentes pode ser explicada através da química ou propriedade das interfaces, ciência que estuda a interação entre as três fases da matéria presentes na flotação.

4.6.4 Filtração

Filtração pode ser definida como uma operação unitária da separação sólido líquido com a utilização de um meio filtrante poroso, este retém as partículas sólidas formando uma torta, retirando assim o líquido passante no meio, denominado como filtrado (CHAVES, 2004).

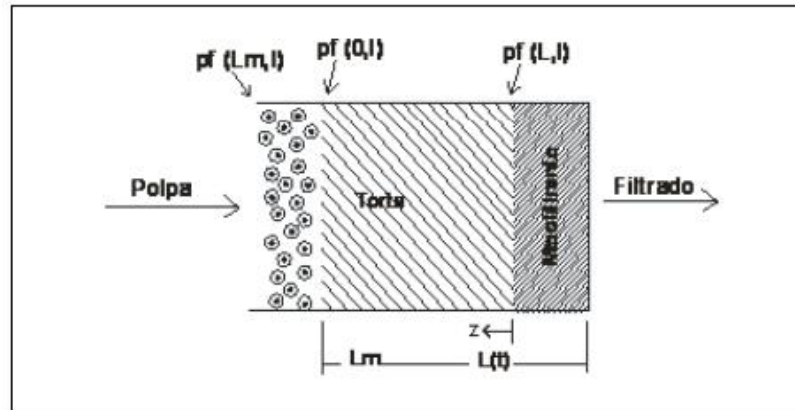
Chaves (2004) exemplifica alguns tipos de filtração:

- Filtração a vácuo, utilização de pressão negativa abaixo do meio filtrante;
- Filtração sobre pressão, aplicação de pressão positiva do lado da torta;
- Filtração centrífuga, utilização de força centrífuga para forçar a passagem do líquido;
- Filtração hiperbárica, trata-se de uma combinação entre vácuo e pressão.

Luz, Sampaio e França (2010) ilustram na Figura 12 o mecanismo de filtração com formação de torta, onde as partículas em suspensão escoam por ação da pressão contra o meio filtrante, resultando na separação entre o filtrado e a torta. O meio filtrante geralmente é um tecido que

tem como objetivo reter as partículas no início da operação, em sequência a própria torta se encarrega de fazer essa função.

Figura 12: Filtração com formação de torta.



Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010.

5 METODOLOGIA

5.1 Aplicação industrial

5.1.1 Teste industrial

A partir de estudos realizados em escala laboratorial onde obteve-se resultados positivos na separação de partículas de willemita e minerais de ganga foi possível aprovar a aplicação de um teste em escala industrial na unidade de Vazante.

Para realização do teste industrial foi alugado um conjunto de equipamentos que contemplavam: peneira móvel, ore sorting XSS com correia de 1 metro de largura e sistema de leitura via transmitância de raio-x, moegas e correias, containers para escritório e containers para instalação do sistema elétrico. Tais equipamentos podem ser observados na Figura 8.

Figura 13: Equipamentos para teste industrial do sistema ore sorting

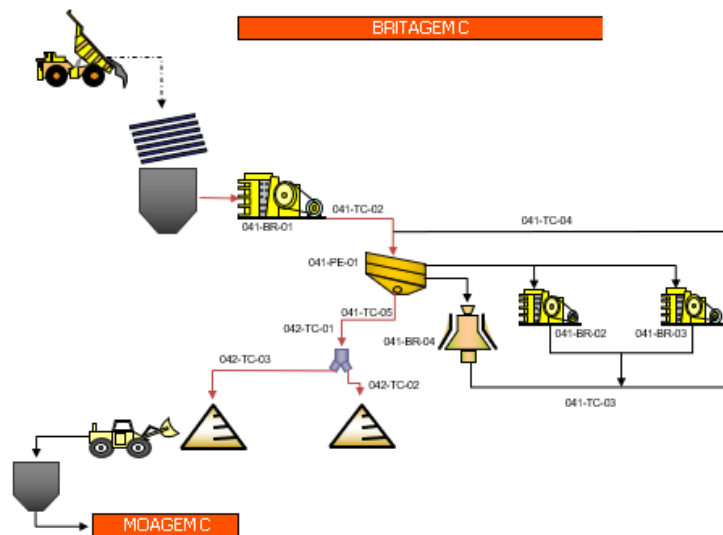


Fonte: Autoria própria

Como pode-se perceber o conjunto de equipamentos não contemplava uma britagem específica para o teste, sendo assim foi adotado a utilização de uma das britagens já instaladas em Vazante para fornecer material com granulometria adequada para a alimentação do sistema.

A Figura 14 representa o fluxograma da Britagem C onde se tem 3 britadores de mandíbulas, sendo que um atua como primário e outros dois como britadores secundários, um britador cônico e uma peneira vibratória.

Figura 14: Fluxograma Britagem C



Fonte: Autoria própria.

Em busca de gerar material para o teste industrial do ore sorting, aplicou-se os seguintes passos: retiradas dos módulos da peneira vibratória do primeiro e segundo deck; alimentação do britador primário realizando um *bypass* nos demais britadores. Essa metodologia permitiu gerar material com granulometria menor que 100 mm para o teste.

O ROM da mina que é colocado nos pátios é separado nas seguintes faixas de teores percentuais de Zn: 4 a 8%, 8 a 12%, 12 a 16% e maior que 16%. Para o teste foram separados materiais de baixo teor, próximo a 4%, materiais de 4 a 8% com média próximo a 6% e material com 8 a 12%, com teores próximos a 9%.

Após a realização da britagem o material seguia por carregadeira até o peneiramento do Sorting, visto na Figura 14. Lá o material era classificado em três granulometrias, menor que 12 mm, maior que 12 e menor que 25 mm e maior que 25 e menor que 100 mm. O material fino menor que 12 mm era separado e retornava à britagem primária, já os outros dois materiais eram separados por pilhas denominadas de material intermediário e grosso respectivamente.

Com os materiais classificados e separados por faixas de teores, foi possível iniciar a realização da separação das partículas via ore sorting, onde o material era alimentado por pá carregadeira, classificado e se destinava a duas pilhas, *drop* ou *eject*.

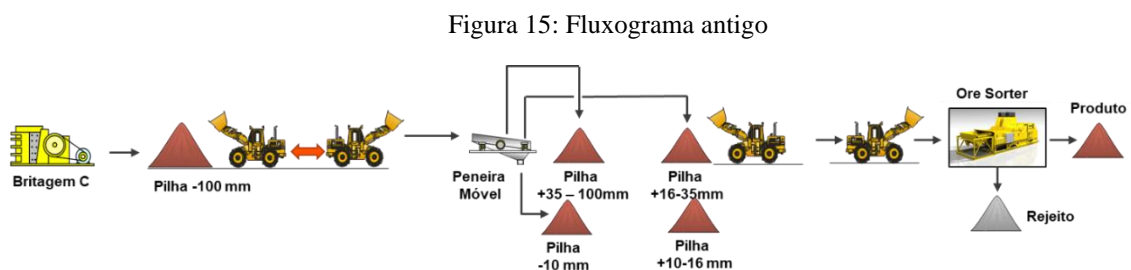
A pilha de *eject* representa o material que foi selecionado pelo sistema do sorting para sofrer ejeção, a pilha do *drop* representa o material remanescente. Na aplicação dos testes foram utilizados os seguintes cenários: ejeção de minérios para os teores próximo a 4% e ejeção de estéril para os teores próximo a 6 e 9%, buscando sempre ejetar a fração que tiver a menor massa.

Com os materiais já concentrados as pilhas de concentrado retornaram para as britagens e as pilhas de estéril eram descartadas.

5.1.2 Adequações no fluxograma do processo produtivo

Após a aplicação do teste industrial a Nexa optou por adquirir os equipamentos em que foram realizados os testes. Com isso, para realização de uma operação em tempo integral via-se uma limitação na capacidade das britagens, onde elas precisavam gerar material para os moinhos e para a nova planta de sorting.

Como relatado anteriormente, era necessário realizar uma parada na britagem, fazer a retirada dos módulos da peneira, operar o circuito apenas com britagem primária e posteriormente realizar um peneiramento secundário conforme Figura 15.



Fonte: Autoria própria.

Conforme o fluxograma apresentado existiam os seguintes problemas: baixa capacidade da britagem para atender ore sorting e moagem; redução da utilização da britagem; alimentação de material maior que 16 e menor que 35 mm no sorting ocasionando baixa produtividade.

Tendo em vista a busca por soluções ágeis e de baixo custo, o fluxograma atual conta com a retirada da carga circulante do primeiro deck da peneira da britagem através da adequação de uma das calhas conforme visto na Figura 16.

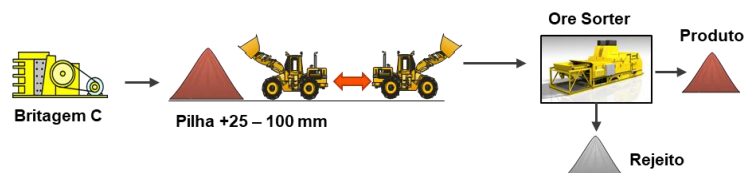
Figura 16: Retirada da CC da Britagem



Fonte: Autoria própria.

A retirada da carga circulante permitiu alimentar o Sorting com uma granulometria maior que 35 e menor que 100 mm, como também aumentar a utilização da britagem que agora gera material para o sorting e moagem ao mesmo tempo.

Figura 17: Fluxograma atual



Fonte: autoria própria.

5.1.3 Aplicação da metodologia DMAIC

DMAIC é o acrônimo em inglês para os cinco passos da metodologia, sendo respectivamente definir (*define*), medir (*measure*), analisar (*analyze*), melhorar (*improve*) e controlar (*control*).

Com as mudanças realizadas no fluxograma de processo apresentadas no tópico anterior, houve um grande aumento na disponibilidade de massa para alimentar o Ore sorting. Essa modificação mudou os gargalos do processo, deixando o ore sorting então com uma menor capacidade de alimentação do que a quantidade de massa fornecida pela britagem. Assim, tornou-se necessário a aplicação de um projeto *Lean Six Sigma*, utilizando a metodologia DMAIC para alavancar os KPI's da área.

Foram utilizadas as seguintes ferramentas: mapa de processo, análise de capacidade, *brainstorming*, matriz de priorização, diagrama de Pareto, teste de hipótese, gerenciamento da rotina e controle estatístico de processo (CEP).

Dentro do projeto foi possível implementar diversas melhorias, entre as principais estão: substituição da mesa de proteção do raio-x; instalação de sistema de limpeza automática, realização de concreto na área, implementação de gestão à vista via SCORECARD.

5.2 Estudo detalhado da aplicação após implementação

Após a aplicação e aprovação do teste industrial, iniciou-se uma nova etapa de operação a partir de julho de 2019, onde a responsabilidade do equipamento foi transferida da gerência de tecnologia mineral para a gerência de operação de beneficiamento mineral.

O presente estudo contempla uma base de dados entre julho de 2019 e dezembro de 2020. Foram realizadas as tratativas dos dados retirando informações inconsistentes, como *outliers*, erros de digitação, *inputs* divergentes.

Para realização dos estudos foram direcionadas para o banco de dados as seguintes informações: taxa de alimentação em t/h (toneladas por hora); massa alimentada; massa de produto e massa de rejeito em toneladas; percentuais de zinco na alimentação; produto e rejeito; curva utilizada

para seleção do material; granulometria; recuperação mássica; recuperação metalúrgica e enriquecimento.

5.2.1 Curva teores de alimentação versus recuperações

As curvas teores de alimentação versus recuperação permitem observar de forma gráfica o comportamento das recuperações mássicas e metalúrgicas com a variação do teor de alimentação do equipamento.

Para a elaboração das curvas dividimos os dados em duas faixas granulométricas: 16 a 35 mm e 35 a 100 mm, seguindo as informações contidas no banco de dados. Após a divisão os dados de recuperação foram agrupados através de média simples dentro de cada faixa de teor, variando em 0,1 pontos percentuais. Ex: para o teor de 5,1% de Zn foram realizadas as médias das recuperações mássica e metalúrgica separadamente com informações do histórico de dados.

Com os dados tratados foram gerados quatro gráficos com a utilização do Excel, sendo eles: teor x recuperação mássica 16 a 35 mm; teor x recuperação metalúrgica 16 a 35 mm; teor x recuperação mássica 35 a 100 mm e teor x recuperação metalúrgica 35 a 100 mm.

5.2.2 Curva teor de alimentação versus enriquecimento

As curvas teores de alimentação versus enriquecimento permitem notar de forma gráfica o comportamento do enriquecimento com a variação do teor de alimentação do equipamento.

Para a elaboração das curvas dividiu-se os dados em duas faixas granulométricas: 16 a 35 mm e 35 a 100 mm, seguindo as informações contidas no banco de dados. Após a divisão, os dados de recuperação foram agrupados através de média simples dentro de cada faixa de teor, variando em 0,1 pontos percentuais. Ex: para o teor de 5,1% de Zn foi realizado a média simples do enriquecimento com informações do histórico de dados.

Com os dados tratados foram gerados dois gráficos com a utilização do Excel, sendo eles: teor x enriquecimento 16 a 35 mm e teor x enriquecimento 35 a 100 mm.

5.2.3 Curva teor de alimentação versus teor de rejeito

As curvas teores de alimentação versus teor de rejeito permite notar de forma gráfica o comportamento do rejeito com a variação do teor de alimentação do equipamento.

Para a elaboração das curvas dividiu-se os dados em duas faixas granulométricas: 16 a 35 mm e 35 a 100 mm, seguindo as informações contidas no banco de dados. Após a divisão os dados de teores de rejeito foram agrupados através de média simples dentro de cada faixa de teor, variando em 0,1 pontos percentuais. Exemplo: para o teor de 5,1% de Zn na alimentação foi realizado a média simples do rejeito com informações do histórico de dados.

Com os dados tratados foram gerados dois gráficos com a utilização do Excel, sendo eles: teor de alimentação x teor de rejeito 16 a 35 mm e teor de alimentação x teor de rejeito 35 a 100 mm.

5.3 Simulador de resultados

A partir das curvas elaboradas acima foi possível criar um simulador para o ore sorting de Vazante. Atualmente o sorting de Vazante trabalha na faixa mais grosseira, com a granulometria de 35 a 10 mm, assim o modelo trabalhará com as informações dessa faixa granulométrica.

Para a criação do simulador foi levado em conta quatro variáveis principais, sendo elas: teor de zinco na alimentação, recuperação metalúrgica, teor de zinco no rejeito e massa alimentada no ore sorting.

As variáveis foram selecionadas com base nas operações atuais dos equipamentos, onde é sempre buscado o menor valor de rejeito possível sem prejudicar a recuperação mássica e o enriquecimento, assim é necessário o valor de rejeito com parte imprescindível do simulador, deixando as variáveis recuperação mássica e enriquecimento como respostas do modelo.

Para elaboração do modelo, devemos considerar as seguintes variáveis:

TA: Teor de Zinco Alimentação;

TR: Teor de Zinco no Rejeito;

TP: Teor de Zinco no Produto;

MA: Massa Alimentada;

MR: Massa no Rejeito;
 MP: Massa no produto;
 Rmet.: Recuperação Metalúrgica;
 Rmas.: Recuperação Mássica;
 Enr.: Enriquecimento;
 ZnC A: Zinco contido na Alimentação;
 ZnC R: Zinco contido no Rejeito;
 ZnC P: Zinco contido no Produto.

O modelo está elaborado da seguinte maneira:

O primeiro passo é calcular a recuperação metalúrgica em função do teor de alimentação, para isso utiliza-se a equação 1.

$$R_{met} = 0,3073 * TA^3 - 7,147 * TA^2 + 54,983 * TA - 47,574 \quad (1)$$

O segundo passo é calcular o teor de rejeito do sorting em função do teor de alimentação através da equação 2.

$$TR = 0,1159 * TA + 1,0349 \quad (2)$$

O terceiro passo é calcular a massa metálica da alimentação, seguindo a equação 3.

$$ZnC A = MA * TA \quad (3)$$

Agora com a recuperação metalúrgica, podemos definir as massas metálicas para o rejeito e alimentação com as seguintes equações.

$$ZnC P = ZnC A * R_{met} \quad (4)$$

$$ZnC R = ZnC A - ZnC P \quad (5)$$

Como temos a variável teor de rejeito calculada através do teor de alimentação, conforme apresentamos na equação 2, agora podemos achar a massa de rejeito seguindo a equação 6.

$$MR = ZnC R / TR \quad (6)$$

Com a massa de alimentação que é pré-definida, agora podemos correlacioná-la com a massa de rejeito e encontrar a massa de produto usando a equação 7.

$$MP = MA - MR \quad (7)$$

O teor do produto pode ser encontrado pela equação 8.

$$TP = Znc P / MP \quad (8)$$

O enriquecimento pela equação 9.

$$Enr. = TP / TA \quad (9)$$

E fechando o modelamento a recuperação mássica se dá pela equação 10.

$$Rmas. = MP / MA \quad (10)$$

5.4 Balanço de massa da usina

O balanço de massa da usina foi elaborado considerando algumas premissas básicas de operação, essas são apresentadas na Tabela 1. Importante ressaltar que essas informações são apenas premissas para realização do trabalho, assim as informações da planta de Vazante podem divergir das informações apresentadas abaixo.

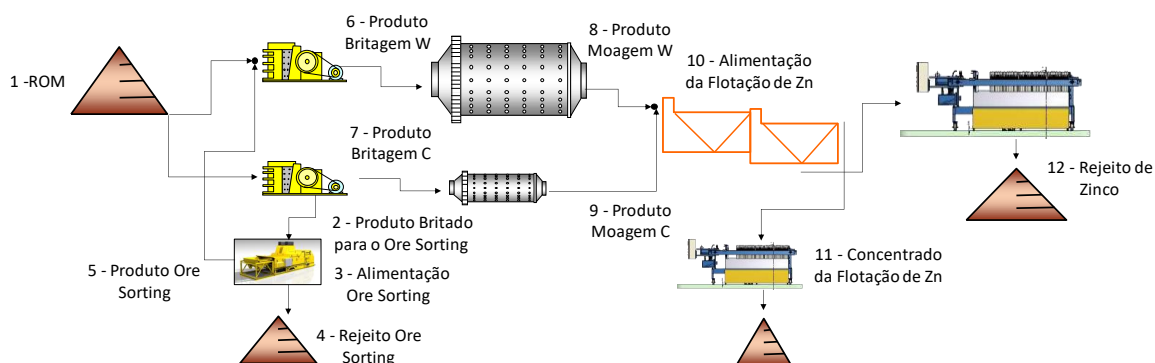
Tabela 1: Informações de entrada do balanço de massa da usina de beneficiamento.

Entradas		
Descrição	Valor	Unidade
Capacidade de alimentação de ROM na usina	1.550.000	t/ano
Teor de Zn no ROM	10,0%	%
Teor de Zn no Concentrado da Flotação	39,5%	%
Teor de Zn no rejeito da Flotação	1,80%	%
%Sólidos do concentrado de Zn	86,5%	%
%Sólido no Rejeito de Zn	88,0%	%
Peso específico do minério alimentado	3,2	t/m ³
Peso específico do concentrado	3,5	t/m ³
Peso específico do rejeito	3,1	t/m ³
Disponibilidade Britagem W	88,4%	%
Utilização Britagem W	78,9%	%
Rendimento Operacional Britagem W	69,8%	%
Horas Trabalhas Britagem W	6114	h
Disponibilidade Britagem C	92,6%	%
Utilização Britagem C	82,5%	%
Rendimento Operacional Britagem C	76,4%	%
Horas Trabalhas Britagem C	6694	h
Disponibilidade Moagens	98,0%	%
Utilização Moagens	98,0%	%
Rendimento Operacional Moagens	96,0%	%
Horas Trabalhas Moagens	8413	h
% Sólidos produto da Britagem	97,0%	%
% sólidos produto da moagem	32,0%	%
Disponibilidade ore sorter	87,0%	%
Utilização ore sorter	82,0%	%
Rendimento Operacional Ore Sorter	71,3%	%
Horas Trabalhas Ore Sorter	6249	h

Fonte: Autoria própria

Com esses dados em mãos foi elaborado um fluxograma macro dos principais fluxos que envolvem a usina de beneficiamento e tem um impacto direto com a implementação do ore sorting, a Figura 18 representa o circuito de concentração de Zinco na unidade de Vazante. Nesse fluxograma não foi levado em consideração a flotação de Chumbo e nem outras operações unitárias que não possuem impacto direto no estudo.

Figura 18: Fluxograma macro da usina de beneficiamento de Vazante para concentração de Zinco



Fonte: autoria própria.

O balanço de massa é composto por doze fluxos, são eles:

- 1- ROM: Produção de massa e teor da mina para alimentar a planta;
- 2- Produto britado para o ore sorting: massa gerada para alimentar o ore sorting, atualmente esse fluxo é gerado por *by-pass* na Britagem C porém para cenário potencial pode ser aumentado, ressaltando que para isso seria necessário uma nova britagem;
- 3- Alimentação do ore sorting: massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo na alimentação do ore sorting;
- 4- Rejeito do ore sorting; massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo no rejeito do ore sorting;
- 5- Produto do ore sorting; massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo no produto do ore sorting;
- 6- Produto Britagem W: massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo no produto da britagem W;
- 7- Produto Britagem C: massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo no produto da britagem C;
- 8- Produto Moagem W: massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo no produto da moagem W;
- 9- Produto Moagem C: massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo no produto da moagem C;
- 10- Alimentação da Flotação de Zn: alimentação da flotação contempla a junção dos fluxos 8 e 9.

- 11- Concentrado da Flotação de Zn: massa, teor de zinco, produtividade, zinco contido e demais informações de processo que contemplam a produção final da usina de beneficiamento.
- 12- Rejeito de Zinco: massa, teor de zinco, produtividade e demais informações de processo que contemplam o rejeito final da usina de beneficiamento.

5.5 Aplicação global do Ore sorting

Com o simulador e o balanço de massa criado em função das variáveis do ore sorting, foi possível gerar um caso base, sem a sua implementação e oito casos de aplicação na usina de beneficiamento variando as informações de alimentação do equipamento, assim como as informações do ROM. Os casos foram realizados da seguinte forma:

Caso base: contempla o balanço global da usina com os fluxos do ore sorting zerados, retirando assim a interferência do equipamento na usina.

Caso 1: aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação, porém nesse caso não foi realizado acréscimo de ROM, assim a massa alimentada nas moagens será menor que sua capacidade máxima devido a retirada do rejeito do ore sorting.

Caso 2: aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação, foi realizado acréscimo de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, assim a usina trabalhará no máximo da sua capacidade de alimentação nas moagens.

Caso 3: aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, trabalhando com teores de 8% de Zn na alimentação, foi realizado acréscimo de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, assim a usina trabalhará no máximo da sua capacidade de alimentação nas moagens.

Caso 4: aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, trabalhando com teores de 10% de Zn na alimentação, foi realizado acréscimo de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, assim a usina trabalhará no máximo da sua capacidade de alimentação nas moagens.

Caso 5: aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, mais a implementação de um novo ore sorting com a mesma capacidade do atual, trabalhando com teores de 6% de

Zn na alimentação, foi realizado acréscimo de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, assim a usina trabalhará no máximo da sua capacidade de alimentação nas moagens.

Caso 6: aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, mais a implementação de um novo ore sorting com o dobro da capacidade do atual, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação, foi realizado acréscimo de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, assim a usina trabalhará no máximo da sua capacidade de alimentação nas moagens.

Caso 7: redução no percentual de Zn no ROM de 10% para 9,5%, aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, mais a implementação de um novo ore sorting com o dobro da capacidade do atual, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação, foi realizado acréscimo de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, assim a usina trabalhará no máximo da sua capacidade de alimentação nas moagens.

Caso 8: redução no percentual de Zn no ROM de 10% para 9,0%, aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade, mais a implementação de um novo ore sorting com o dobro da capacidade do atual, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação, foi realizado acréscimo de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, assim a usina trabalhará no máximo da sua capacidade de alimentação nas moagens.

6 RESULTADOS

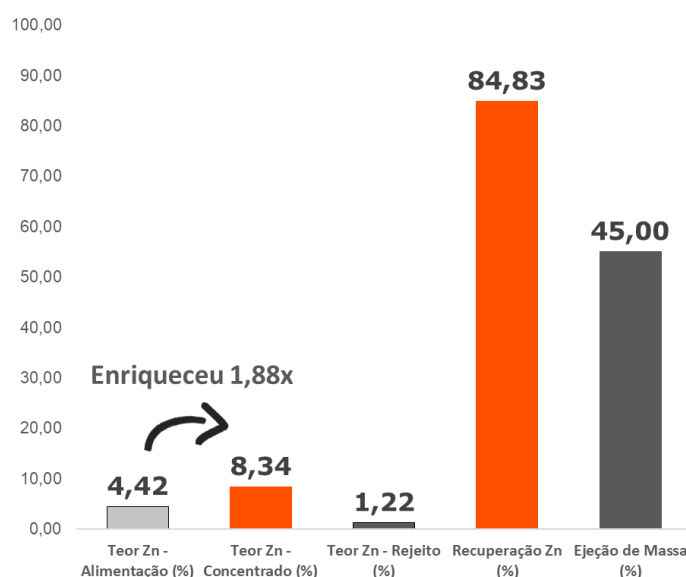
6.1 Aplicação dos testes industriais

Com a realização dos testes industriais para diferentes faixas de teores, foi possível obter os seguintes resultados:

Performance média com teores marginais apresentando um enriquecimento de 1,88 vezes, conforme Figura 19. Os teores de alimentação próximo ao *cut off* permitiram mostrar a excelência do Ore sorting para enriquecimento desse material, deixando o teor de rejeito apenas com 1,22% de Zn.

No caso de teores marginais, a metodologia aplicada foi a ejeção de minério, onde o equipamento ejetou 45% da massa, fazendo uma seleção preferencial do material com maior concentração de Zn. O trabalho evidencia que se pode fazer uma menor ejeção para materiais menores que 4%, aumentando assim o enriquecimento para essas faixas de teores.

Figura 19: Performance média com minério marginal



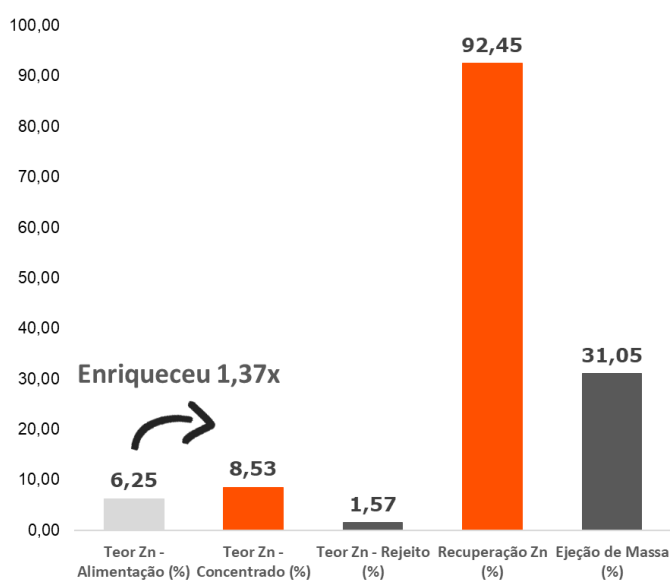
Fonte: Autoria própria.

A figura 20 mostra a performance do equipamento para teores entre 4 e 8%, nesse caso o teor médio de alimentação ficou em 6,25%.

Os resultados foram bastantes satisfatórios, onde se obteve um enriquecimento de 1,37 vezes e teores de rejeito de 1,57% de Zn, colocando assim a recuperação metalúrgica acima de 92%.

Para teores de 4 a 8% a metodologia aplicada é a ejeção de estéril, onde foi possível ejetar 31% da massa, mostrando um grande potencial para a retirada desse material antes da alimentação da usina.

Figura 20: Performance média do ore sorting com ROM de 4 a 8% Zn

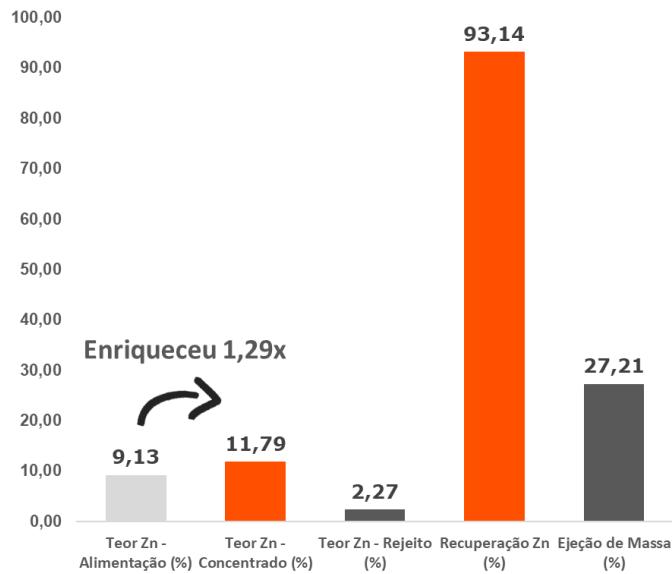


Fonte: Autoria própria.

Ao trabalhar com teores entre 8 e 12% de Zn foi possível atingir um enriquecimento de 1,29 vezes, com teores de rejeito 2,27% de Zn conforme Figura 21. Para atingir esses resultados foi necessário a ejeção de 27% da passa de estéril, chegando em uma recuperação metalúrgica superior a 93%.

Essa etapa do teste, evidencia a potência da utilização do ore sorting para teores superiores a 8%, podendo então trabalhar em 2 ou mais etapas de seleção.

Figura 21: Performance média do Ore sorting com ROM de 8 a 12% Zn



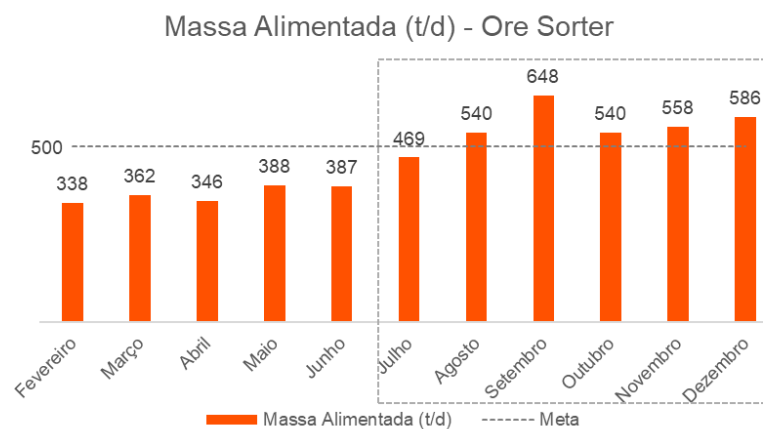
Fonte: Autoria própria

6.2 Aplicação da metodologia Six Sigma

A aplicação do projeto Six Sigma pela metodologia DMAIC proporcionou a alcançar resultados fantásticos, sendo os principais deles a massa alimentada diariamente e a utilização do equipamento.

A Figura 22 mostra a evolução da massa alimentada a partir de julho de 2020 onde foram iniciadas as aplicações das ações propostas pelo projeto Six Sigma.

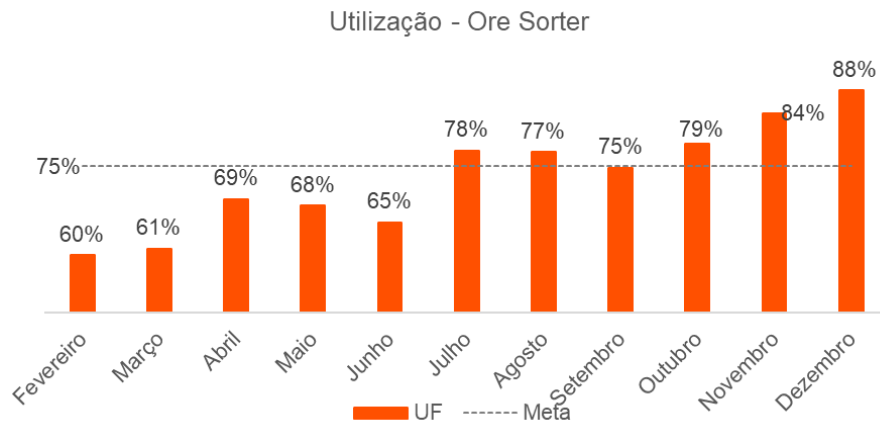
Figura 22: Massa alimentada média em toneladas por dia



Fonte: Autoria própria.

Já a Figura 23 mostra a evolução da utilização física a partir de julho de 2020 onde foram iniciadas as aplicações das ações proposta pelo projeto Six Sigma.

Figura 23: Utilização Ore sorting



Fonte: Autoria própria.

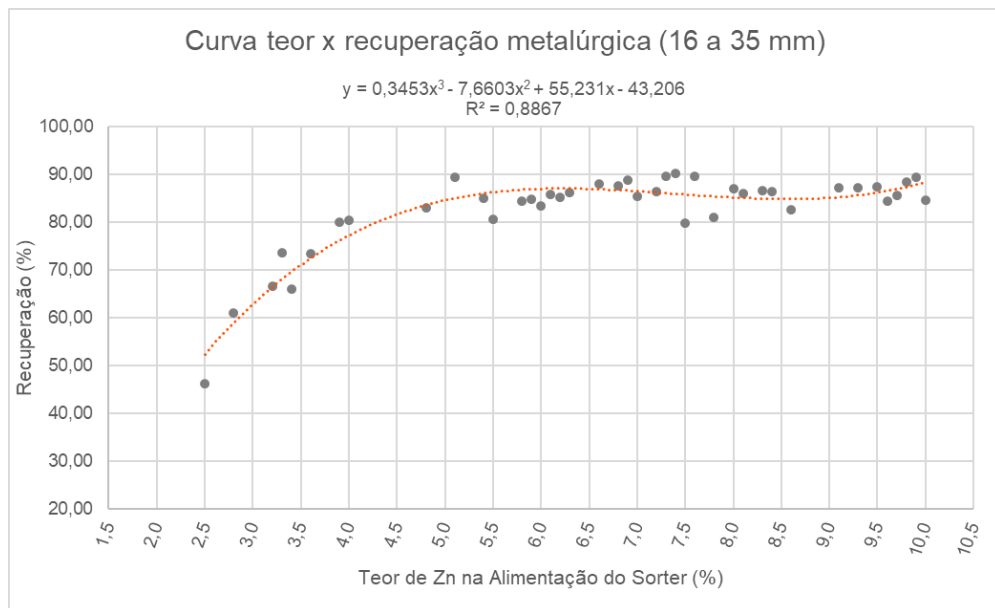
6.3 Curvas detalhadas da aplicação após implementação

6.3.1 Curva teor de alimentação versus recuperações

O estudo da curva teor de alimentação x recuperação permite observar de forma gráfica os potenciais do ore sorting para diferentes faixas de teor. Através da plotagem dos dados no gráfico pode-se gerar curvas que representam o comportamento citado para um determinado intervalo de teor.

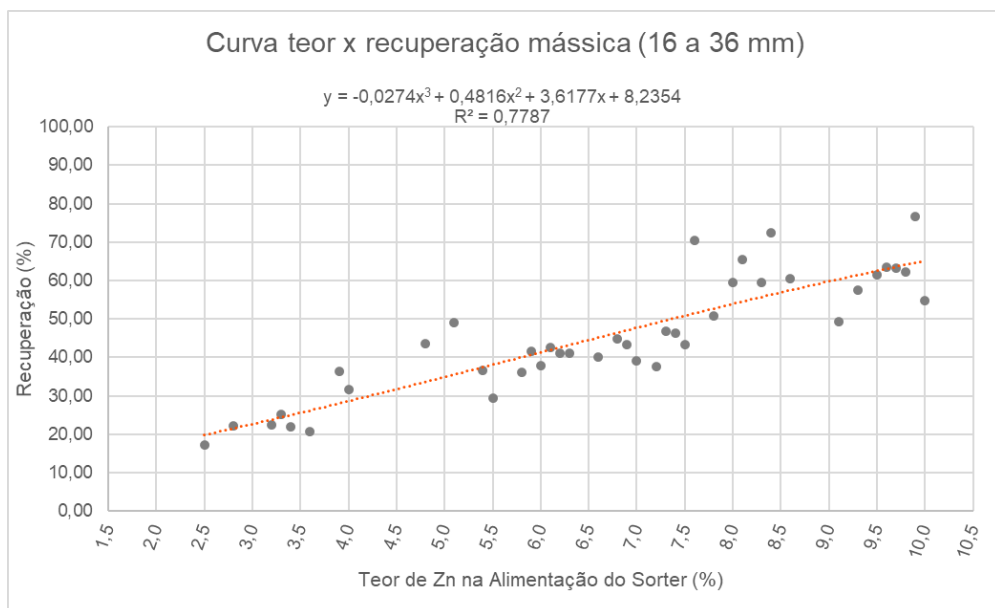
As Figuras 24 e 25 representam as recuperações metalúrgicas e mássicas para uma faixa granulométrica de 16 a 35 mm respectivamente. Para os dois gráficos foram plotadas suas respectivas curvas que apresentaram um coeficiente de determinação próximos a 88% para a recuperação metalúrgica e 77% para recuperação mássica.

Figura 24: Curva teor x recuperação metalúrgica para granulometria 16 a 35 mm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Curva teor x recuperação mássica para granulometria 16 a 35 mm.

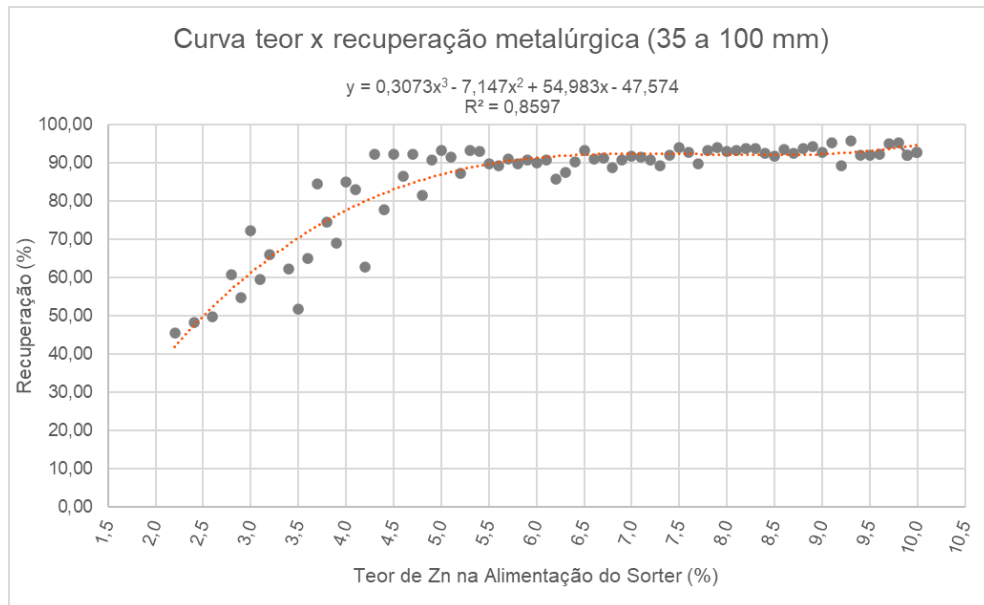


Fonte: Autoria própria.

As Figuras 26 e 27 representam as recuperações metalúrgicas e mássicas para uma faixa granulométrica de 35 a 100 mm respectivamente. Para os dois gráficos foram plotadas suas respectivas curvas que apresentaram um coeficiente de determinação próximos a 85% para

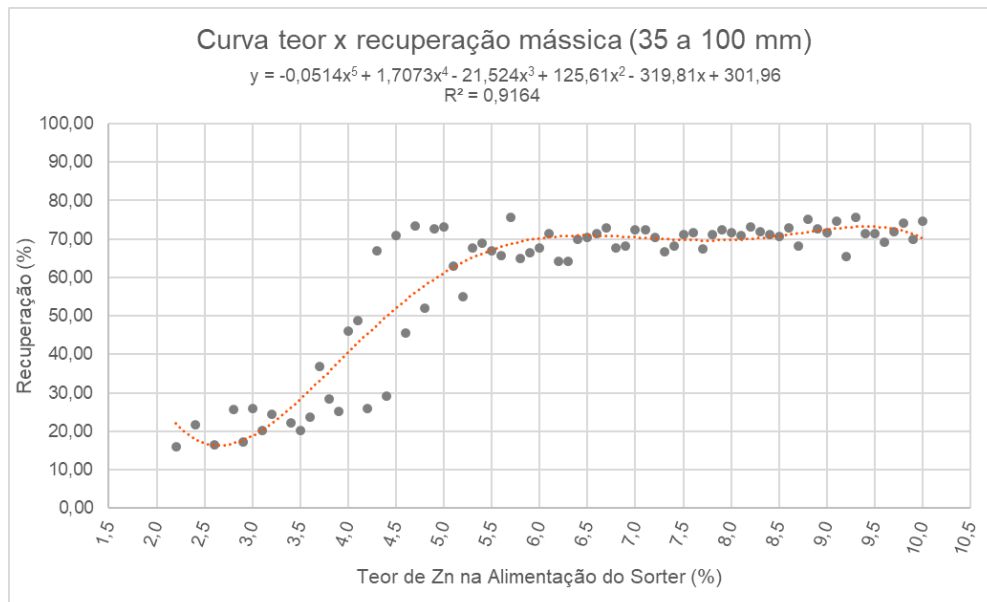
recuperação metalúrgica e 92% para recuperação mássica demonstrando uma boa confiabilidade para curva.

Figura 26: Curva teor x recuperação metalúrgica para granulometria 35 a 100 mm.



Fonte: Autoria própria

Figura 27: Curva teor x recuperação mássica para granulometria 35 a 100 mm.



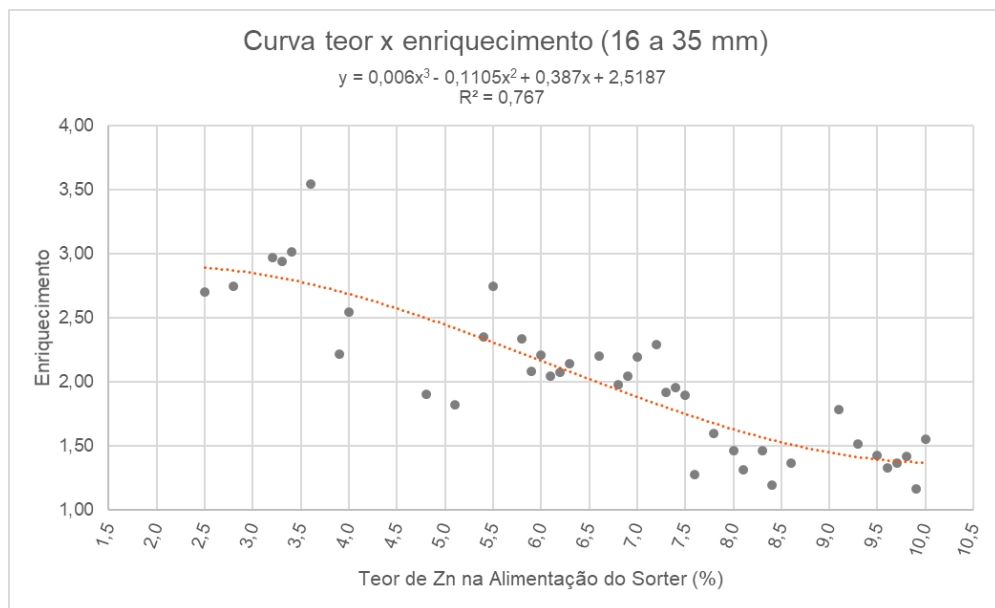
Fonte: Autoria própria

6.3.2 Curva teor de alimentação versus enriquecimento

O fator de enriquecimento permite observar o quanto será possível aumentar o teor de produto do ore sorting em relação a sua alimentação.

A Figura 28 traz a relação de enriquecimento em função do teor de alimentação para as granulometrias de 16 a 35 mm.

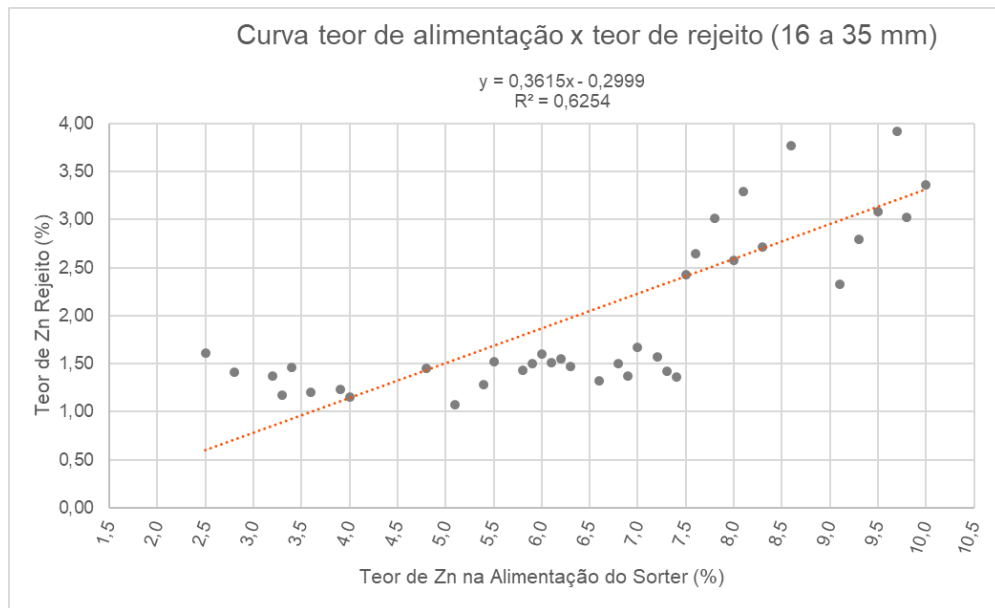
Figura 28: Curva teor x enriquecimento para granulometria 16 a 35 mm.



Fonte: Autoria própria

A Figura 29 traz a relação de enriquecimento em função do teor de alimentação para as granulometrias de 35 a 100 mm.

Figura 29: Curva teor x enriquecimento para granulometria 35 a 100 mm



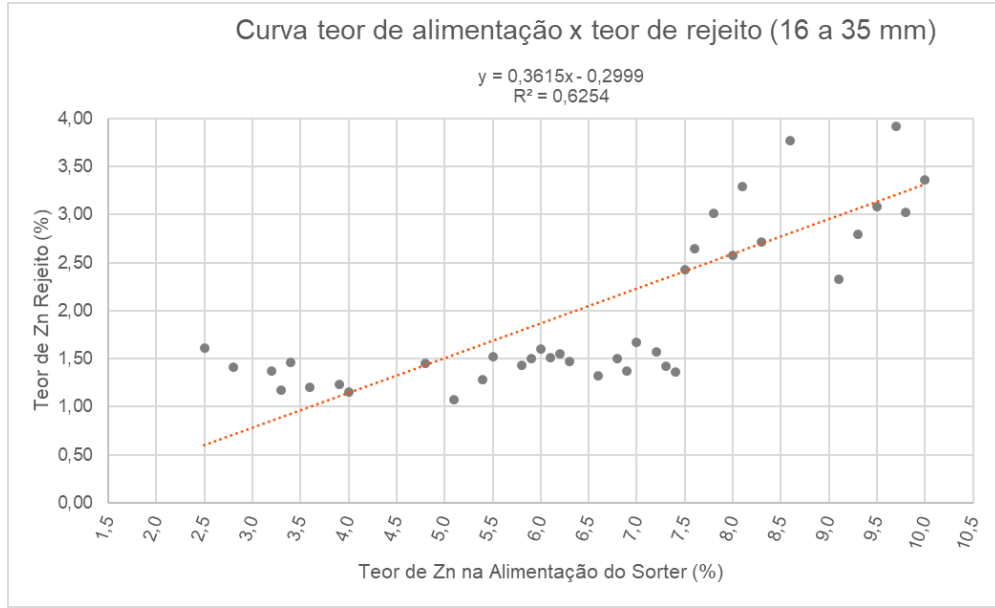
Fonte: Autoria própria

6.3.3 Curva teor de alimentação x teor de rejeito

A curva teor de alimentação x teor de rejeito permite ver de forma gráfica o comportamento do rejeito do ore sorting com base no teor alimentado.

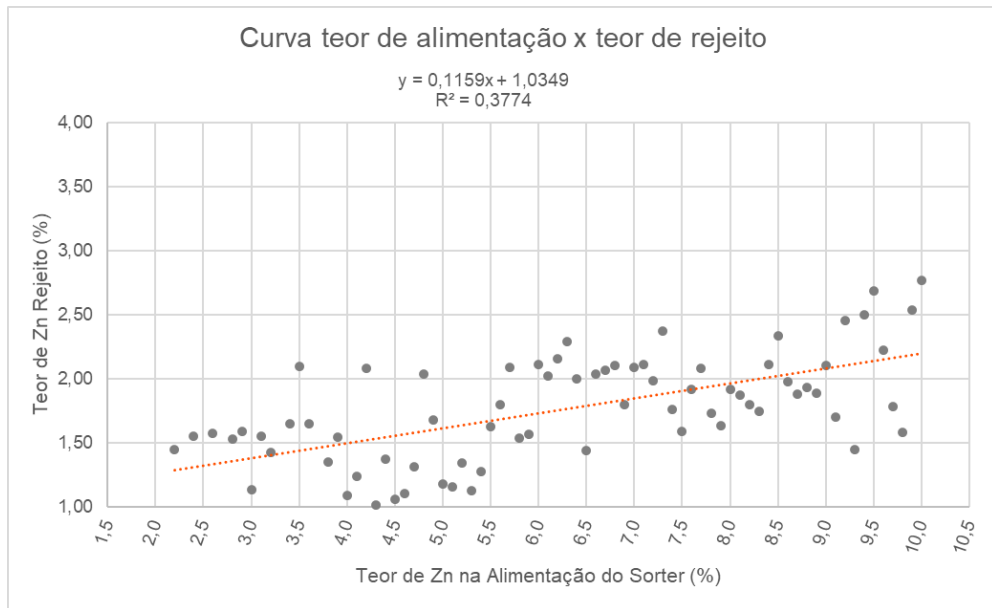
As Figuras 30 e 31 representam os teores de rejeito para as faixas 16 a 35 mm e 35 a 100 mm respectivamente. Para os dois gráficos foram plotadas suas respectivas curvas que apresentaram um coeficiente de determinação próximos em 62% para a menor granulometria e 37% para a maior granulometria. Apesar da correlação da curva estar mais baixa que as demais, é importante destacar que o rejeito do ore sorting é uma variável que sempre é buscada pela operação, assim a utilização da curva na criação de um modelo se torna imprescindível.

Figura 30: Curva teor alimentação x teor de rejeito para granulometria 16 a 35 mm



Fonte: Autoria própria

Figura 31: Curva teor alimentação x teor de rejeito para granulometria 35 a 100 mm



Fonte: Autoria própria

6.4 Simulador de resultados

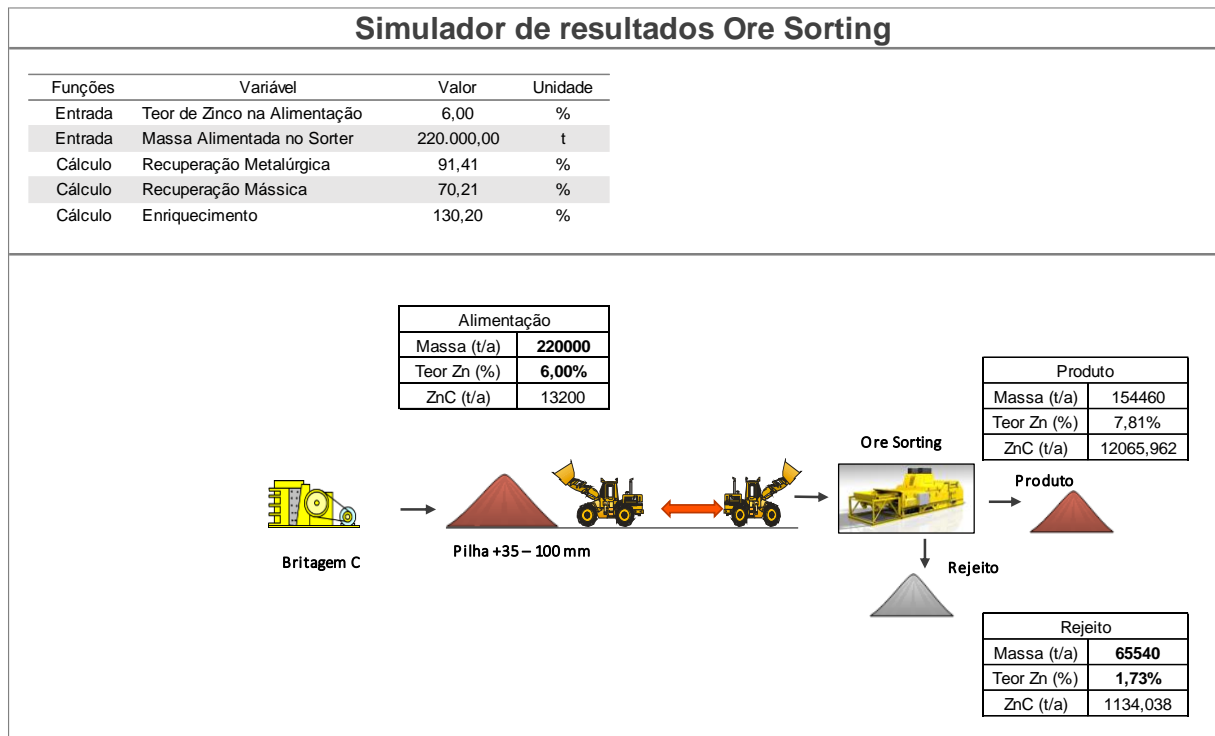
O simulador de resultados do ore sorting foi gerado a partir de duas informações principais: o teor de alimentação e massa alimentada, sendo essas as entradas da simulação.

A simulação tomou por base duas equações principais, retiradas do estudo detalhado, sendo elas a equação 1 que nos fornece a recuperação metalúrgica em função do teor de alimentação e a equação 2 que nos fornece o teor de rejeito em função do teor de alimentação. Ambas as equações foram retiradas da faixa granulométrica 35 a 100 mm, em função da maior quantidade de dados e aplicação atual.

Apesar do coeficiente de determinação da equação 2 ser menor que os das demais, a curva representa uma realidade operacional do ore sorting onde se aceita uma maior variação da recuperação mássica em função de menores teores de rejeito.

A Figura 32 representa o simulador do ore sorting, onde a parte superior demonstra as entradas e as variáveis calculadas, já a parte inferior traz o balanço metalúrgico em função das informações imputadas.

Figura 32: Simulador de resultados ore sorting



Fonte: autoria própria

6.5 Balanço de massa da usina e aplicação global do ore sorting

Conforme demonstrado pela Figura 18 o balanço de massa envolveu doze fluxos principais da usina de beneficiamento para concentração de Zn, onde quatro desses são referentes ao ore sorting. O balanço da usina ficou atrelado ao simulador do ore sorting, assim era feito as mudanças para cada caso registrado. A seguir demonstraremos os casos e suas especificidades.

6.5.1 Caso base

O caso base apresentado no anexo A, contempla as informações gerais da usina, porém com os fluxos referentes ao ore sorting zerados, pode-se perceber que o teor do ROM e da alimentação da flotação é o mesmo, demonstrando assim que não houve enriquecimento na alimentação da usina.

6.5.2 Caso 1

O caso 1 (anexo B) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade com alimentação de 220.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação. Percebe-se no anexo B que para esse caso a massa alimentada na usina fica abaixo da sua capacidade, mostrando assim os impactos da retirada do rejeito na pré-concentração.

Tabela 2: Dados de simulação ore sorting para o caso 1

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	6,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	220.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	91,41	%
Cálculo	Recuperação Mássica	70,21	%
Cálculo	Enriquecimento	130,20	%

Fonte: Autoria própria

6.5.3 Caso 2

O caso 2 (anexo C) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade com alimentação de 220.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação. Percebe-se no anexo C que para esse caso a massa alimentada na usina fica no máximo da sua capacidade, aumentando assim a massa de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting.

Tabela 3: Dados de simulação ore sorting para o caso 1

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	6,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	220.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	91,41	%
Cálculo	Recuperação Mássica	70,21	%
Cálculo	Enriquecimento	130,20	%

Fonte: Autoria própria

6.5.4 Caso 3

O caso 3 (anexo D) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade com alimentação de 220.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 8% de Zn na alimentação. Percebe-se no anexo D que para esse caso a massa alimentada na usina fica no máximo da sua capacidade, aumentando assim a massa de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting.

Tabela 4: Dados de simulação ore sorting para o caso 3

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	8,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	220.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	92,22	%
Cálculo	Recuperação Mássica	68,28	%
Cálculo	Enriquecimento	135,07	%

Fonte: Autoria própria

6.5.5 Caso 4

O caso 4 (anexo E) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade com alimentação de 220.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 10% de Zn na alimentação. Percebe-se no anexo E que para esse caso a massa alimentada na usina fica no máximo da sua capacidade, aumentando assim a massa de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting.

Tabela 5: Dados de simulação ore sorting para o caso 4

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	10,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	220.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	94,86	%
Cálculo	Recuperação Mássica	76,55	%
Cálculo	Enriquecimento	123,91	%

Fonte: Autoria própria

6.5.6 Caso 5

O caso 5 (anexo F) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade de alimentação, mais a implantação de um novo ore sorting com a mesma capacidade do atual, somando assim uma capacidade de 440.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação. Percebe-se no anexo F que para esse caso a massa alimentada na usina fica no máximo da sua capacidade, aumentando assim a massa de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting.

Tabela 5: Dados de simulação ore sorting para o caso 5

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	6,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	440.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	91,41	%
Cálculo	Recuperação Mássica	70,21	%
Cálculo	Enriquecimento	130,20	%

Fonte: Autoria própria

6.5.7 Caso 6

O caso 6 (anexo G) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade de alimentação, mais a implantação de um novo ore sorting com o dobro da capacidade do atual, somando assim uma capacidade de 660.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação. Percebe-se no anexo G que para esse caso a massa alimentada na usina fica no máximo da sua capacidade, aumentando assim a massa de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting.

Tabela 6: Dados de simulação ore sorting para o caso 6

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	6,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	660.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	91,41	%
Cálculo	Recuperação Mássica	70,21	%
Cálculo	Enriquecimento	130,20	%

Fonte: Autoria própria

6.5.8 Caso 7

O caso 7 (anexo H) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade de alimentação, mais a implantação de um novo ore sorting com o dobro da capacidade do atual, somando assim uma capacidade de 660.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação. Percebe-se na no anexo H que para esse caso a massa alimentada na usina fica no máximo da sua capacidade, aumentando assim a massa de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, nesse caso foi realizado a redução do teor do ROM de 10% para 9,5% de Zinco.

Tabela 7: Dados de simulação ore sorting para o caso 7

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	6,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	660.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	91,41	%
Cálculo	Recuperação Mássica	70,21	%
Cálculo	Enriquecimento	130,20	%

Fonte: Autoria própria

6.5.9 Caso 8

O caso 8 (anexo I) traz aplicação do ore sorting já instalado em sua máxima capacidade de alimentação, mais a implantação de um novo ore sorting com o dobro da capacidade do atual, somando assim uma capacidade de 660.000 toneladas de ROM por ano, trabalhando com teores de 6% de Zn na alimentação. Percebe-se no anexo I que para esse caso a massa alimentada na usina fica no máximo da sua capacidade, aumentando assim a massa de ROM equivalente ao rejeito do ore sorting, nesse caso foi realizado a redução do teor do ROM de 10% para 9,0% de Zinco.

Tabela 8: Dados de simulação ore sorting para o caso 8

Funções	Variável	Valor	Unidade
Entrada	Teor de Zinco na Alimentação	6,00	%
Entrada	Massa Alimentada no Sorter	660.000,00	t
Cálculo	Recuperação Metalúrgica	91,41	%
Cálculo	Recuperação Mássica	70,21	%
Cálculo	Enriquecimento	130,20	%

Fonte: Autoria própria

6.5.10 Análise de resultados

O anexo J traz a compilação de resultados obtidos com a implementação do ore sorting no balanço de massa da usina.

Os resultados apresentados nos ajudam a gerar algumas análises, sendo as principais:

Comparando o caso base com o caso 1, pode se perceber uma produção de ZnC muito similar, porém com uma diferença de 65.540 toneladas de massa alimentada na usina que foram retiradas pelo ore sorting na pré-concentração, assim o teor de alimentação da usina se eleva de 10% para 10,37%. A comparação dos dois casos pode demonstrar os benefícios trazidos pelo ore sorting em relação a redução de custos com moagem, reagentes de flotação, empilhamento a seco e outros custos associados a alimentação desse material na usina.

Agora comparando o caso base com o caso 2, onde foi mantido a máxima capacidade de alimentação da usina e aumento a disponibilidade ROM, percebe-se um aumento significativo na produção de ZnC chegando em 4% a mais da produção do caso base, isso se dá pelo enriquecimento do material a ser alimentado na usina, mantendo um cenário de alimentação em massa. Nesse cenário é importante ressaltar que o ore sorting irá exigir uma maior produtividade da mina.

Estudando os casos 2, 3 e 4 onde variamos o teor de alimentação da etapa de pré-concentração e se trabalhara com o ore sorting atual e a alimentação da planta em suas máximas capacidades, pode-se perceber que o equipamento trabalhando com teores de 6% a 8% podem trazer ganhos significativos para produção de ZnC, porém com o aumento do teor para 10% percebe-se que o teor de rejeito da etapa fica acima de 2% de Zinco e há uma queda no enriquecimento devido a maior recuperação mássica, esse cenário reflete em perda da produção de ZnC na usina, sendo assim para teores maiores recomenda-se estudos para se trabalhar com mais de uma etapa de pré-concentração.

Nos casos 5 e 6 foram realizadas simulações com a implementação de novos equipamentos, sendo o caso 5 dobrando e o caso 6 triplicando a capacidade atual. Pode se perceber que para ambos os casos trabalhamos com teor de 6% na alimentação e consideramos um acréscimo na produção de ROM equivalente a geração de rejeito da etapa. Observamos que para ambos os casos há um aumento significativo no teor de alimentação da usina, aumentando assim a produção de ZnC em 4% e 8% respectivamente quando comparados ao caso 2.

Os casos 7 e 8 foram utilizados para observar os impactos da queda do teor do ROM na usina de beneficiamento, para esse cenário mantivemos o teor de alimentação da etapa de ore sorting em 6% e uma alimentação considerando a implementação de mais um equipamento com dobro da capacidade do atual. Com a queda do teor do ROM para 9,5% e 9% pode se perceber que a produção de ZnC cai abruptamente quando comparadas ao cenário 6, porém quando comparamos essa com o cenário base, podemos constatar que o ore sorting pode ser utilizado para segurar a produção anual de ZnC mesmo com a queda do teor do ROM.

7 CONCLUSÕES

Os resultados do teste industrial foram bastante promissores e viabilizaram a permanência da planta de ore sorting na unidade de Vazante. Através dos testes pode se entender melhor sobre as faixas de teores de alimentação no ore sorting e seus ganhos potenciais, assim como a necessidade de buscar a ejeção da menor massa, onde para teores de alimentação abaixo de 4% recomenda-se a ejeção de minério e para teores entre 4 e 8% recomendam-se a ejeção de estéril. Os testes mostraram ainda que para teores de alimentação mais altos existe uma tendência de aumentar a perda metálica no rejeito.

A aplicação do projeto *six sigma* após a passagem da fase de testes para uma operação contínua trouxe diversos benefícios, tais como: aumento da massa alimentada em mais de 40% e aumento de utilização do equipamento em mais de 10%. O projeto demonstra aumento de ganhos com ideias simples e de baixo custo, onde com a participação do público operacional pode se colocar o equipamento no máximo de sua capacidade.

O estudo das curvas de recuperações, enriquecimento e teores rejeito em função do teor de alimentação permitiu enxergar um leque de oportunidades para simulação do ore sorting, para esse trabalho decidiu-se trabalhar com recuperação metalúrgica e teores de rejeito na faixa de 35 a 10 mm buscando se aproximar da realidade operacional do equipamento, onde diariamente existe uma busca para menores teores de rejeito variando assim a ejeção e consequentemente a recuperação em massa.

A criação do simulador de ore sorting para o minério silicato de Zinco de Vazante traz uma boa representatividade para teores entre 2,5% e 10% de Zn na alimentação na faixa granulométrica em 35 e 100 mm.

Os estudos da aplicação do simulador no balanço de massa da usina permitiram a aplicação de diversos cenários de operação, assim como perceber o impacto da operação do ore sorting na produção de ZnC e alimentação de ROM na planta.

Olhando para o caso base e caso 1 percebe-se que para uma mesma produção de ZnC, o ore sorting permite a retirada de 4% da massa alimentada na usina, mas caso a opção seja por manter

a usina no máximo de sua capacidade, tendo disponibilidade de ROM o equipamento permite um incremento de 4% na produção de ZnC.

Os casos 2, 3 e 4 quando comparados demonstram a sensibilidade do equipamento com aumento do teor de alimentação, onde para teores mais altos recomenda-se mais de uma etapa de concentração.

Já os casos 5 e 6 trazem os potenciais ganhos com a implementação de mais equipamentos na unidade, podendo gerar ganhos de até 8% na produção de ZnC.

Nos casos 7 e 8 foi demonstrado a importância do ore sorting para manter ou minimizar a queda da produção de ZnC que é gerada pela queda do teor de Zinco no ROM.

O equipamento pode ser utilizado para diversas aplicações, tais como: redução de custos com moagem, flotação, disposição a seco e outros custos atrelados a alimentação de ROM na usina, sem impactar a produção de ZnC, aumento da produção de ZnC mantendo os teores do ROM e a capacidade de processamento da usina de beneficiamento, manter a produção de ZnC com a queda dos teores de ROM sem alterar a capacidade de processamento da usina de beneficiamento.

8 TRABALHOS FUTUROS

Para minérios fora dos parâmetros utilizados recomenda-se um novo modelamento contemplando setorialmente essas faixas de teores e granulometria.

O balanço de massa da usina está voltado para aplicação do ore sorting, nesse trabalho foi desconsiderado a flotação de Pb e outras operações unitárias que não possuíam impacto direto no estudo. Recomenda-se um estudo detalhado para as demais operações unitárias como impacto na flotação de Pb.

Para realização do trabalho foi travado alguns parâmetros como teor de concentrado, rejeito e capacidade da usina, recomenda-se um estudo aprofundado entendendo o impactado do ore sorting nessas variáveis.

O trabalho foi baseado somente em parâmetros de processo e operacionais, recomenda-se também a implementação da viabilidade financeira incrementando os custos de produção de ROM, processamento e empilhamento do material da ore sorting, processamento e empilhamento do material da usina, assim como os investimentos necessários para aquisição e implementação de mais equipamentos.

9 REFERÊNCIAS

BERGERMAN, Maurício Guimarães et al. **Pré-concentração de minerais sulfetados de zinco, chumbo e cobre utilizando-se beneficiamento gravimétrico**. In: Anais do 67º Congresso Internacional da ABM. 2012.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2003.

CHAVES, A. colaboradores, **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**, Vol. II, Desaguamento, Espessamento e Filtragem. São Paulo, 2004.

CHAVES, A. P.; FILHO, L. D. S. L.; BRAGA, P. F. A. **Flotação**. In: Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2010

DE FREITAS NETO, Alberto Leite et al. Avaliação da flotação em circuito de concentração mineral de zinco e chumbo alimentados com o produto da pré-concentração. **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, 19 ed., out. 2018. Disponível em: <abmproceedings.com.br >. Acesso em: 30 Setembro de 2020.

DE MORES PERES, Larissa; MASSOLA, Camila Peres; BERGERMAN, Mauricio Guimarães. Influência da pré concentração no índice de abrasividade de minérios de cobre e chumbo. **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, 18 ed., out. 2017. Disponível em: <abmproceedings.com.br >. Acesso em: 30 Setembro de 2020.

Engendrar, Engenheiros Associados. Produtos e Catálogos. Amostrador tipo Cross-Belt. Disponível em: <<http://www.engendrar.com.br/produtos>> Acesso em: 15 set. 2020.

IBRAM. Nexa Resources patrocina o II Workshop de Galvanização a Fogo - Experiências e Aplicações. **Portal da Mineração**, 2018. Disponível em: <<http://portaldamineracao.com.br/>>. Acesso em: 30 Setembro 2020.

JOSÉ NETO, D.; BERGERMAN, M. G.; YOUNG, A. S.; PETTER, C. O. Pre-concentration potential evaluation for a silicate zinc ore by density and sensor-based sorting methods. **Rem - International Engineering Journal**, [S.L.], v. 72, n. 2, p. 335-343, jun. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672018720155>. Disponível em: <<https://www.scielo.br/scielo.php>>. Acesso em: 15 set. 2020.

JOSÉ NETO, D. **Análise técnica de alternativas de pré-concentração para o minério de zinco silicatado de Vazante/MG**. Dissertação – Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2019, 109p.

LESSARD, J.; BAKKER, J.; MCHUGH, L. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 65, p. 88-97, out. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.019>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs>>. Acesso em: 15 set. 2020.

LI, G.; KLEIN, B.; SUN, C.; KOU, J. Applying Receiver-Operating-Characteristic (ROC) to bulk ore sorting using XRF. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 146, p. 1-9, jan. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106117>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs>>. Acesso em: 15 set. 2020.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MAGALHÃES, M. F. O uso de tecnologia ore sorting para aumento em recuperação de Au em minério de transição. **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Belo Horizonte, nov. 2019. Disponível em: <<https://www.artigos.entmme.org/download/2019>>. Acesso em: 15 set. 2020.

MONTE, M. B. D. M.; PERES, A. E. C. **Química de superfície na flotação**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

NASCIMENTO-DIAS, Bruno L. do; OLIVEIRA, Davi F.; ANJOS, Marcelino J. dos. A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, 2017.

NORGATE, T.; HAQUE, N. The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. **Minerals Engineering**, vol 42, 2013, p. 13-21.

PERES, A. E. C.; ARAÚJO, A. C. **Flotação: o estado da arte no Brasil** (Coleção Teoria e Prática do Tratamento de Minérios). São Paulo: Signus, v. 4, 2006.

SILVA, T.A.V. Estudos de Reagentes na Flotação de Minério de Zinco. 119 f. **Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2006.

SOUSA, R.; FUTURO, A.; FIOZA, A.; LEITE, M. M. Pre-concentration at crushing sizes for low-grade ores processing – Ore macro texture characterization and liberation assessment. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 147, p. 106156-106156, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106156>.

STRYDOM, H. The application of dual energy x-ray transmission sorting to the separation of coal from torbanite. **Tese de Mestrado, Universidade de Witwatersand**, Joanesburgo, África do Sul, 2019, p. 98

VALENTE, B. A. Aplicação de tecnologia de Ore sorting para aproveitamento de minérios de baixo teor de zinco em Vazante/MG. *In.*: **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, nov. 2019, Belo Horizonte **Anais...** Belo Horizonte: UFMG/DEMIN, 2019. Disponível em: <<http://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/024.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2020.

VIVES, AES; BRIENZA, Sandra Maria Boscolo. Emprego de Fluorescência de Raio X dispersiva para avaliação da poluição por metais pesados em amostras de água e sedimentos de lagos, 2002. **Faculdade de Engenharia e Ciências Químicas FECQ/UNIMEP**. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2002/ENAN/E03/E03_413.PDF >. Acesso em: 15 set. 2020.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Wills' mineral processing technology**: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 8.ed. [S.L]: Butterworth-Heinemann, 2015. 512p.

WILLS, B. A.; NAPPIER-MUNN, T. J. **Mineral Processing Technology**. 7. ed. [S.l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2006.

ANEXOS

Anexo A: Balanço de massa da usina para o caso base.

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.550.000	0	0	0	0	1.209.000	341.000	1.209.000	341.000	1.550.000	337.135	1.212.865
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	37.392	10.546	2.569.125	724.625	3.293.750	52.616	165.391
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.246.392	351.546	3.778.125	1.065.625	4.843.750	389.752	1.378.255
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	85,0%
t/h	-	0,00	0,00	0,00	0,00	197,8	50,9	143,7	40,5	184,2	40,1	144,2
t/h (massa total)	-	-	-	-	-	-	-	449,1	126,7	575,7	46,3	163,8
Vazão (m3)	-	-	-	-	-	-	-	2.946.937	831.188	3.778.125	148.941	554.552
m3/h	-	-	-	-	-	-	-	350	99	449	18	66
Teor Zn	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	39,50%	1,80%
ZnC	155.000	0	0	0	0	120.900	34.100	120.900	34.100	155.000	133.168	21.832

Fonte: Autoria própria

Anexo B: Balanço de massa da usina para o caso 1

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da briagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.550.000	220.000	220.000	65.540	154.460	1.143.460	341.000	1.143.460	341.000	1.484.460	337.256	1.147.204
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	35.365	10.546	2.429.853	724.625	3.154.478	52.635	156.437
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.178.825	351.546	3.573.313	1.065.625	4.638.938	389.892	1.303.640
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h	-	32,87	35,20	10,49	24,72	187,0	50,9	135,9	40,5	176,4	40,1	136,4
t/h (massa total)	-	-	-	-	-	-	-	424,7	126,7	551,4	46,3	155,0
Vazão (m³)	-	-	-	-	-	-	-	2.787.184	831.188	3.618.371	148.994	525.099
m³/h	-	-	-	-	-	-	-	331	99	430	18	62
Teor Zn	10,00%	6,00%	6,00%	1,73%	7,81%	10,47%	10,00%	10,47%	10,00%	10,37%	39,50%	1,80%
ZnC	155.000	13.200	13.200	1.134	12.066	119.766	34.100	119.766	34.100	153.866	133.216	20.650

Fonte: Autoria própria

Anexo C: Balanço de massa da usina para o caso 2

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.615.540	220.000	220.000	65.540	154.460	1.194.581	355.419	1.194.581	355.419	1.550.000	351.512	1.198.488
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	36.946	10.992	2.538.485	755.265	3.293.750	54.860	163.430
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.231.527	366.411	3.733.066	1.110.684	4.843.750	406.372	1.361.918
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h (massa total)	-	32,87	35,20	10,49	24,72	195,4	53,1	142,0	42,2	184,2	41,8	142,5
Vazão (m3)	-	-	-	-	-	-	-	443,7	132,0	575,7	48,3	161,9
m3/h	-	-	-	-	-	-	-	2.911,792	866,333	3.778,125	155,292	548,547
Teor Zn	10,00%	6,00%	6,00%	1,73%	7,81%	10,45%	10,00%	10,45%	10,00%	10,35%	39,50%	1,80%
ZnC	161.554	13.200	13.200	1.134	12.066	124.878	35.542	124.878	35.542	160.420	138.847	21.573

Fonte: Autoria própria

Anexo D: Balanço de massa da usina para o caso 3

N° do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Znico
Massa de minério (t)	1.619.790	220.000	220.000	69.790	150.210	1.193.646	356.354	1.193.646	356.354	1.550.000	352.015	1.197.985
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	36.917	11.021	2.536.498	757.252	3.283.750	54.939	163.362
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.230.563	367.375	3.730.144	1.113.606	4.843.750	406.954	1.361.347
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h	-	32,87	35,20	11,17	24,04	195,2	53,2	141,9	42,4	184,2	41,8	142,4
Vazão (m3)	-	-	-	-	-	-	-	443,4	132,4	575,7	48,4	161,8
Vazão (m3/h)	-	-	-	-	-	-	-	2.909,513	868,612	3.778,125	155,514	548,337
Teor Zn	10,00%	8,00%	8,00%	1,96%	10,81%	10,47%	10,00%	10,47%	10,00%	10,36%	39,50%	1,80%
ZnC	161.979	17.600	17.600	1.369	16.231	124.974	35.635	124.974	35.635	160.610	139.046	21.564

Fonte: Autoria própria

Anexo E: Balanço de massa da usina para o caso 4

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.601.583	220.000	220.000	51.583	168.417	1.197.652	352.348	1.197.652	352.348	1.550.000	347.816	1.202.184
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	37.041	10.897	2.545.010	748.740	3.293.750	54.283	163.934
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.234.693	363.246	3.742.662	1.101.088	4.843.750	402.099	1.366.118
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h	-	32,87	35,20	8,25	26,95	195,9	52,6	142,4	41,9	184,2	41,3	142,9
t/h (massa total)	-	-	-	-	-	-	-	444,9	130,9	575,7	47,8	162,4
Vazão (m3)	-	-	-	-	-	-	-	2.919,276	856,849	3.778,125	153,659	550,091
m3/h	-	-	-	-	-	-	-	347	102	449	18	65
Teor Zn	10,00%	10,00%	10,00%	2,19%	12,39%	10,34%	10,00%	10,34%	10,00%	10,26%	39,50%	1,80%
ZnC	160.158	22.000	22.000	1.132	20.868	123.792	35.235	123.792	35.235	159.027	137.387	21.639

Fonte: autoria própria

Anexo F: Balanço de massa da usina para o caso 5

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.681.080	440.000	440.000	131.080	308.920	1.180.162	369.838	1.180.162	369.838	1.550.000	365.888	1.184.112
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	36.500	11.438	2.507.845	785.905	3.293.750	57.104	161.470
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.216.662	381.276	3.688.008	1.155.742	4.843.750	422.992	1.345.581
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h (massa total)	-	65,73	70,41	20,97	49,43	193,0	55,2	140,3	44,0	184,2	43,5	140,7
Vazão (m3)	-	-	-	-	-	-	-	438,4	137,4	575,7	50,3	159,9
m3/h	-	-	-	-	-	-	-	2.876.646	901.479	3.778.125	161.644	542.544
Teor Zn	10,00%	6,00%	6,00%	1,73%	7,81%	10,92%	10,00%	10,92%	10,00%	10,70%	39,50%	1,80%
ZnC	168.108	26.400	26.400	2.268	24.132	128.856	36.984	128.856	36.984	165.840	144.526	21.314

Fonte: Autoria própria

Anexo G: Balanço de massa da usina para o caso 6

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.746.620	660.000	660.000	196.620	463.380	1.165.744	384.256	1.165.744	384.256	1.550.000	380.265	1.168.735
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	36.054	11.884	2.477.205	816.545	3.293.750	59.348	159.509
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.201.798	396.141	3.642.949	1.200.801	4.843.750	439.613	1.328.244
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h	-	96,60	105,61	31,46	74,15	190,7	57,4	138,6	45,7	184,2	45,2	139,0
t/h (massa total)	-	-	-	-	-	-	-	433,0	142,7	575,7	52,3	158,0
Vazão (m3)	-	-	-	-	-	-	-	2.841.500	936.625	3.778.125	167.995	536.542
m3/h	-	-	-	-	-	-	-	388	111	449	20	64
Teor Zn	10,00%	6,00%	6,00%	1,73%	7,81%	11,39%	10,00%	11,39%	10,00%	11,05%	39,50%	1,80%
ZnC	174.662	39.600	39.600	3.402	36.198	132.834	38.426	132.834	38.426	171.260	150.205	21.055

Fonte: Autoria própria

Anexo H: Balanço de massa da usina para o caso 7

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.746.620	660.000	660.000	196.620	463.380	1.165.744	384.256	1.165.744	384.256	1.550.000	357.100	1.192.900
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	36.054	11.884	2.477.205	816.545	3.293.750	55.732	162.668
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.201.798	396.141	3.642.949	1.200.801	4.843.750	412.833	1.355.568
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h	-	96,60	105,61	31,46	74,15	190,7	57,4	138,6	45,7	184,2	42,4	141,8
t/h (massa total)	-	-	-	-	-	-	-	433,0	142,7	575,7	49,1	161,1
Vazão (m3)	-	-	-	-	-	-	-	2.841.500	936.625	3.778.125	157.761	546.213
m3/h	-	-	-	-	-	-	-	398	111	449	19	65
Teor Zn	9,50%	6,00%	6,00%	1,73%	7,81%	10,81%	9,50%	10,81%	9,50%	10,49%	39,50%	1,80%
ZnC	165.929	39.600	39.600	3.402	36.198	126.022	36.504	126.022	36.504	162.627	141.055	21.472

Fonte: Autoria própria

Anexo I: Balanço de massa da usina para o caso 8

Nº do Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variável	ROM	Produto Britado para o ore sorting	Alimentação ore sorting	Rejeito ore sorting	Produto Sorter	Produto Britagem W	Produto da britagem C	Produto da moagem W	Produto da moagem C	Alimentação da Flotação de Zn	Concentrado da Flotação de Zn	Rejeito de Zinco
Massa de minério (t)	1.746.620	660.000	660.000	196.620	463.380	1.165.744	384.256	1.165.744	384.256	1.550.000	333.935	1.216.065
Massa de água (t)	-	-	-	-	-	36.054	11.884	2.477.205	816.545	3.293.750	52.117	165.827
Massa total (t)	-	-	-	-	-	1.201.798	396.141	3.642.949	1.200.801	4.843.750	386.053	1.381.891
% sólidos	-	-	-	-	-	97,0%	97,0%	32,0%	32,0%	32,0%	86,5%	88,0%
t/h	-	96,60	105,61	31,46	74,15	190,7	57,4	138,6	45,7	184,2	39,7	144,5
Vazão (m³)	-	-	-	-	-	-	-	433,0	142,7	575,7	45,9	164,3
m³/h	-	-	-	-	-	-	-	2.841.500	936.625	3.778.125	147.527	555.889
Teor Zn	9,00%	6,00%	6,00%	1,73%	7,81%	10,23%	9,00%	10,23%	9,00%	9,92%	39,50%	1,80%
ZnC	157.196	39.600	39.600	3.402	36.198	119.211	34.583	119.211	34.583	153.794	131.905	21.889

Fonte: Autoria própria

Anexo J: Compilação de resultados dos casos simulados.

	ROM		Alimentação do ore sorting		Produto do ore sorting		Rejeito do ore sorting		Alimentação da usina		Produto da usina		Rejeito da usina		Produção de Znc (t)	Recuperação Metalúrgica (%)
	Massa (t)	Teor de Zn (%)	Massa (t)	Teor de Zn (%)	Massa (t)	Teor de Zn (%)	Massa (t)	Teor de Zn (%)	Massa (t)	Teor de Zn (%)	Massa (t)	Teor de Zn (%)	Massa (t)	Teor de Zn (%)		
Caso Base	1.550.000	10,00%	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	1.550.000	10,00%	337.135	39,50%	1.212.865	1,80%	133.168	85,92%
Caso 1	1.550.000	10,00%	220.000	6,00%	154.460	7,81%	65.540	1,73%	1.484.460	10,37%	337.256	39,50%	1.147.204	1,80%	133.216	86,58%
Caso 2	1.615.540	10,00%	220.000	6,00%	154.460	7,81%	65.540	1,73%	1.550.000	10,35%	351.512	39,50%	1.198.488	1,80%	138.847	86,55%
Caso 3	1.619.790	10,00%	220.000	8,00%	150.210	10,81%	69.790	1,96%	1.550.000	10,36%	352.015	39,50%	1.197.985	1,80%	139.046	86,57%
Caso 4	1.601.583	10,00%	220.000	10,00%	168.417	12,39%	51.583	2,19%	1.550.000	10,26%	347.816	39,50%	1.202.184	1,80%	137.387	86,39%
Caso 5	1.681.080	10,00%	440.000	6,00%	308.920	7,81%	131.080	1,73%	1.550.000	10,70%	366.888	39,50%	1.184.112	1,80%	144.526	87,15%
Caso 6	1.746.620	10,00%	660.000	6,00%	463.380	7,81%	196.620	1,73%	1.550.000	11,05%	380.265	39,50%	1.169.735	1,80%	150.205	87,71%
Caso 7	1.746.620	9,50%	660.000	6,00%	463.380	7,81%	196.620	1,73%	1.550.000	10,49%	357.100	39,50%	1.192.900	1,80%	141.055	86,79%
Caso 8	1.746.620	9,00%	660.000	6,00%	463.380	7,81%	196.620	1,73%	1.550.000	9,92%	333.935	39,50%	1.216.065	1,80%	131.905	85,77%

Fonte: Autoria própria