



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



**DESEMPENHO DE UMA PENEIRA DESAGUADORA NO
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO**

RAFAELA MEIRELLES ALMEIDA

OURO PRETO - MG

2020

RAFAELA MEIRELLES ALMEIDA

**DESEMPENHO DE UMA PENEIRA DESAGUADORA NO
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Tratamento de minérios.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Érica Linhares Reis

OURO PRETO – MG

2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A447d Almeida, Rafaela Meirelles.
Desempenho de uma peneira desaguadora no beneficiamento de
minério de ferro. [manuscrito] / Rafaela Meirelles Almeida. - 2020.
54 f.

Orientadora: Profa. Dra. Erica Linhares Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração. 2. Beneficiamento de minério. 3. Peneiramento
(Mineração). I. Reis, Erica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 622.723

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafaela Meirelles Almeida

DESEMPENHO DE UMA PENEIRA DESAGUADORA NO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 08 de outubro de 2020

Membros da banca

Dra- Érica Linhares Reis- Orientadora
MSc -Letícia Maria de Melo Silva Cheloni - IFMG/Campus Ouro Branco
MSc - Paôlla de Carvalho Barbosa - VALE

Érica Linhares Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Erica Linhares Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/04/2023, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0514728** e o código CRC **253C4547**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Maria Paula e José Roberto, pelo apoio e dedicação, vocês me guiaram e inspiraram para a conclusão desta etapa. Às minhas irmãs, Júlia e Laura, por todo amor e incentivo.

A todos os meus familiares, amigas e amigos pelo carinho e por estarem sempre ao meu lado, trazendo força e alegria.

À professora e orientadora Érica Linhares Reis, por sua dedicação, orientação e ensinamentos durante a realização deste trabalho.

A todos os profissionais da empresa, em especial, ao César de Paula Pinheiro e ao Rodrigo da Conceição Gomes, pela paciência, disposição e conhecimentos repassados.

*“Sabemos o que somos, mas não sabemos o que
podemos ser.”
(William Shakespeare)*

RESUMO

Dentre as etapas do beneficiamento de minérios, a classificação, o peneiramento e a separação sólido-líquido, têm como objetivo basicamente a adequação do material para processos subsequentes ou atender às características específicas de um produto. O objeto de estudo deste trabalho é a uma peneira vibratória horizontal, que opera como peneira desaguadora no circuito de recuperação de *sinter feed* de uma usina de beneficiamento de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero. Esse equipamento que é alimentado por polpas e produz um material drenado, opera com movimentos retilíneos e um leve aclave, o que proporciona maior intensidade no desaguamento. O presente trabalho propõe a avaliação de um processo de desaguamento por peneiras vibratórias horizontais, também conhecidas como *low head*, por meio de curvas de partição. Essas curvas representam o desempenho de qualquer separação de sólidos por tamanhos, podendo ser interpretadas como as curvas de probabilidades que as partículas têm de se direcionarem para um dos dois produtos, no caso das peneiras, será analisado o *oversize*. A partir de análises granulométricas, utilizou-se o método descrito por Wills e Munn (2006) e construiu-se a curva de partição. Ainda que o processo de desaguamento por peneiras vibratórias horizontais tenha se mostrado satisfatório, com 97% da alimentação destinada ao *oversize*, a umidade encontrada foi de 14,39%, valor acima da meta para essa variável.

PALAVRAS CHAVE: peneiras vibratórias horizontais, curvas de partição, desaguamento.

ABSTRACT

Among the stages of ore processing, classification, screening and solid-liquid separation, basically aim at adapting the material for subsequent processes or meeting the specific characteristics of a product. The object of study of this work is a horizontal vibrating screen that operates as a dewatering screen in the sinter feed recovery circuit of an iron ore beneficiation plant located in the Cuadrilátero Ferrífero. This equipment is fed by pulps and then produces drained material, it operates with straight movements and a slight slope, which provides greater dewatering intensity. The present work proposes the evaluation of a dewatering process by horizontal vibrating screens, also known as low head, by means of partition curves. These curves represent the performance of any separation of solids by sizes, and can be interpreted as the probability curves that the particles have to direct to one of the two products, in the case of sieves, the oversize will be analyzed. From granulometric analyzes, the method described by Wills and Munn (2006) was used and the partition curve was plotted. Although the dewatering process through horizontal vibrating screens has proved satisfactory, with 97% of the feed destined for oversize, the calculated moisture was 14,39%, value above the target for this variable.

KEY WORDS: horizontal vibrating screens, partition curves; dewatering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma típico beneficiamento de minérios (CORREIA, 2010).....	14
Figura 2 - Fluxograma tratamento de minérios da usina em estudo.....	16
Figura 3 - Comportamento coletivo das partículas (CHAVES e PERES, 2003)	18
Figura 4 - Comportamento individual das partículas (CHAVES e PERES, 2003)	19
Figura 5 - Peneira vibratória horizontal (CHAVES e PERES, 2003)	21
Figura 6 - Representação esquemática para um classificador (CORREIA, 2010)	23
Figura 7 - Tipos de classificadores (CORREIA, 2010).....	24
Figura 8 - Representação esquemática de um hidrociclone convencional (CORREIA, 2010).....	25
Figura 9 - Fluxograma das etapas de classificação da usina em estudo	26
Figura 10 - Fluxograma do circuito para recuperação de uma das frações do produto <i>sínter feed</i> usina em estudo.....	26
Figura 11 - Curva de partição para hidrociclones (CARISSO e CORREIA, 2004).....	27
Figura 12 - Curva de partição para peneiras (WILLS e MUNN, 2006)	28
Figura 13 - Pontos de amostragem do circuito de recuperação de uma das frações de <i>sínter feed</i>	35
Figura 14 - Peneira desaguadora estudada (METSO, 2005)	38
Figura 15 - Sistema de fixação Snapdeck das telas (Adaptada de VIMAX).....	38
Figura 16 - Curva de distribuição granulométrica do <i>underflow</i> dos ciclones	39
Figura 17 - Curva de distribuição granulométrica do <i>oversize</i> das peneiras desaguadoras	40
Figura 18 – Rompimento da tela da peneira desaguadora.....	42
Figura 19 - Flambagem na tela da peneira desaguadora.....	42
Figura 20 - Curva de partição real e corrigida.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação granulométrica dos produtos	15
Tabela 2- Tabela de apoio para construção de uma curva de partição (Adaptada, WILLS e MUNN, 2006)	31
Tabela 3 - Premissas das amostragens	34
Tabela 4 - Especificações da peneira vibratória horizontal (METSO, 2005)	37
Tabela 5 - Análises químicas das amostras realizadas por meio de fluorescência de raio X	44

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Eficiência de peneiramento	21
Equação 2 - Eficiência de peneiramento quanto ao passante	22
Equação 3 - Eficiência de peneiramento quanto ao retido.....	22
Equação 4 – Imperfeição da eficiência de separação	28
Equação 5 – Fração mássica de água corrigida	29
Equação 6 – Porcentagem de sólidos.....	29
Equação 7 – Taxa de diluição	30
Equação 8 – Balanço das taxas de diluição do classificador	30
Equação 9 – Cálculo de umidade.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Geral.....	12
2.2	Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Aspectos gerais do minério de ferro	13
3.2	Tratamento de minérios de ferro.....	13
3.2.1	Tratamento de minérios da usina de beneficiamento em estudo	15
3.3	Classificação e peneiramento.....	16
3.3.1	Peneiramento industrial	17
3.3.2	Classificação em meio fluido.....	23
3.3.3	Classificação na usina em estudo	25
3.4	Curvas de partição	27
3.5	Avaliação de equipamentos de classificação	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1	Levantamento dos dados.....	34
4.2	Análise granulométrica	35
4.3	Análise química	36
4.4	Curvas de partição	36
4.5	Análise das características construtivas e operacionais das peneiras desaguadoras	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1	Análise granulométrica	39
5.2	Teor de umidade	43
5.3	Análise química	44
5.4	Eficiência de separação por peneiramento.....	45
5.5	Curvas de partição	45
6	CONCLUSÕES	48
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
	APÊNDICE A – Tabelas de distribuição granulométrica	53

1 INTRODUÇÃO

Segundo Luz e Lins (2010), beneficiamento de minérios consiste em operações aplicadas aos bens minerais que visam modificar a granulação e/ou a concentração relativa das espécies minerais presentes, sem alteração química ou física dos minerais. Essas operações, em síntese, podem ser elencadas como cominuição, peneiramento e classificação, concentração e desaguamento. As etapas descritas objetivam a adequação do material para o processo subsequente ou para atender às características estabelecidas como produto.

A indústria metalúrgica tem especificações rígidas referentes à matéria prima e, portanto, exigem um avançado controle de qualidade da mineração. O crescente aumento da demanda e a diminuição das jazidas com minérios de ferro de altos teores são um desafio para o setor mineral, pois demandam reformulação e inovação dos processos produtivos a fim de atender ao mercado de forma sustentável e economicamente viável.

Comumente as etapas de cominuição, peneiramento, classificação e concentração são realizados à úmido, ou seja, com a presença de grande quantidade de água. Isso ocorre devido a parâmetros operacionais e técnicos que variam com os processos e equipamentos utilizados, podendo auxiliar na separação por tamanhos ou por densidades, ou ainda atuar como agente transportador. Em decorrência disso, nasce a necessidade de aplicar processos de separação sólido-líquido, que objetivam atender às especificações de qualidade, armazenamento e/ou transporte. E assim como nos outros processos, é fundamental que o dimensionamento e o controle sejam feitos de forma correta para minimizar custos, aumentar produção e assegurar qualidade.

O presente trabalho propôs a avaliação de um processo de desaguamento por peneiras vibratórias horizontais, as chamadas peneiras desaguadoras, também conhecidas como *low head*.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o desempenho de uma peneira vibratória horizontal, que opera como peneira desaguadora em uma usina de beneficiamento de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero.

2.2 Específicos

A partir de amostragem realizado, o estudo será baseado em:

- i. Análise granulométrica;
- ii. Análise química;
- iii. Cálculo do teor de umidade do produto;
- iv. Cálculo de eficiência de separação;
- v. Curvas de partição.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada aos temas abordados no trabalho, com ênfase na classificação e peneiramento de minérios de ferro. Além disso, características e aspectos relevantes dos processos de uma grande mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero, onde esse trabalho foi desenvolvido. São apresentados, também, métodos para calcular eficiência de peneiramento.

3.1 Aspectos gerais do minério de ferro

O termo minério de ferro refere-se a uma grande gama de minerais minérios contendo o elemento Ferro (Fe). A mina em estudo está localizada no município de Congonhas, Minas Gerais, e é composta pelos seguintes litotipos de minério de ferro: hematitas brandas e compactas, itabiritos silicosos brandos e compactos, e itabiritos carbonáticos predominantemente compactos (ALKMIM; TRZASKOS E ZAVAGLI, 1999 *apud* RIBEIRO, 2011).

3.2 Tratamento de minérios de ferro

O beneficiamento ou tratamento de minérios consiste em um conjunto de operações com a finalidade de adequar espécies minerais para o consumo de diferentes segmentos industriais sem, contudo, modificar a identidade química e física dos minerais (LUZ e LINS, 2010).

Segundo Valadão e Araújo (2007), esse processo é constituído pelas seguintes etapas: fragmentação, separação por tamanho, concentração, separação sólido-líquido, entre outras operações auxiliares. Essas operações são organizadas de modo a maximizar a recuperação dos minerais úteis do minério e adequar os produtos à qualidade exigida. Há algumas variações nas combinações e sequência das chamadas operações unitárias, mas com um mesmo objetivo que é a adequação do minério.

Para Figueira *et al.* (2010), a fragmentação é o conjunto de técnicas que tem a finalidade de reduzir um sólido de determinado tamanho em fragmentos menores e liberar os minerais úteis para as etapas posteriores.

A classificação e o peneiramento, visam separar o material em partes que se diferem pela granulometria, podendo ser realizada em meio fluído ou não, tomando como

base seu tamanho geométrico ou velocidade em que as partículas atravessam o meio fluído (CORREIA, 2010). A etapa seguinte é a concentração que separa as partículas de diferentes espécies. No entanto, é necessário que haja diferenças físicas ou físico-químicas entre os minerais de interesse e os demais. Essas propriedades diferenciadoras podem ser: densidade, susceptibilidade magnética, cor, molhabilidade superficial, condutividade magnética e solubilidade (SOUZA, 2010).

De acordo com França e Massarani (2010), a separação sólido-líquido tem dois objetivos básicos: a produção de um sólido desaguado, produto ou rejeito final, e um líquido clarificado adequando, portanto, o produto à qualidade requerida e/ou possibilitando o transporte e armazenagem.

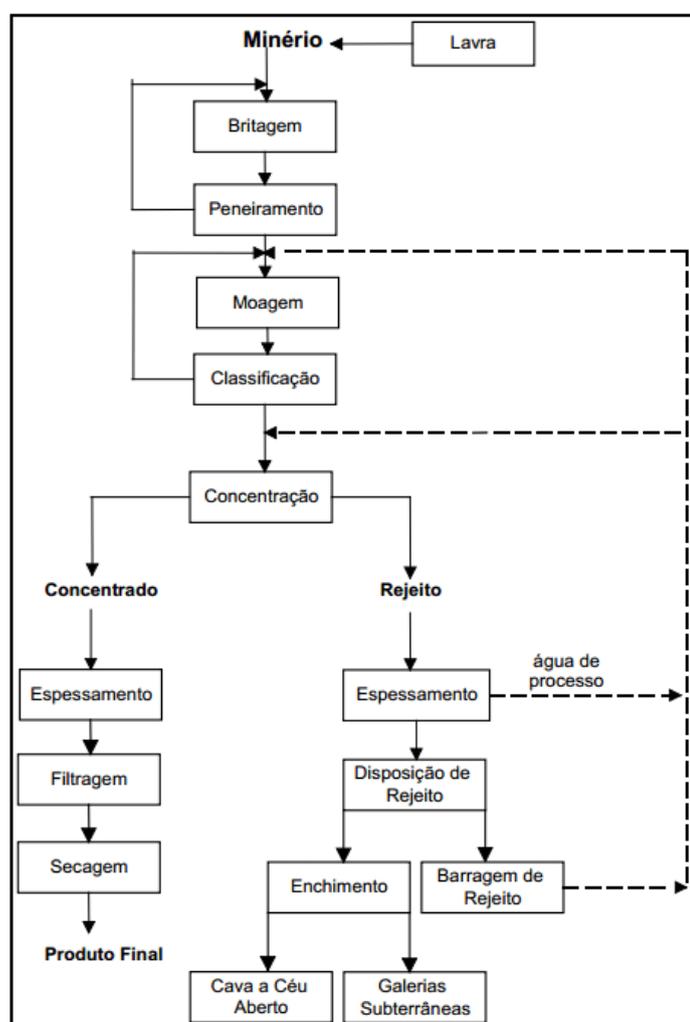


Figura 1 - Fluxograma típico beneficiamento de minérios (CORREIA, 2010)

3.2.1 Tratamento de minérios da usina de beneficiamento em estudo

A usina de beneficiamento desse estudo gera três tipos de produtos, esses são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificação granulométrica dos produtos

PRODUTOS	FAIXA GRANULOMÉTRICA
Granulado	-50 +10 mm
<i>Sínter feed</i>	-10 +0,3 mm
<i>Pellet feed</i>	-0,15 mm

O processo se inicia com a britagem, que é dividida em primária, secundária e terciária. A primeira etapa recebe o *run of mine* (ROM), material proveniente da mina, que é fragmentado através de britadores de mandíbula até cerca de 165 mm e então o material segue através de correias transportadoras até as britagens secundária e terciária. Nessas etapas, britadores cônicos fragmentam o material controlando seu tamanho máximo de 50 mm, e evitando a geração de grande quantidade de finos.

Posteriormente, o minério britado é empilhado simultaneamente em duas pilhas no formato Chevron a fim de garantir sua homogeneização. Logo após, as pilhas são retomadas por retomadoras e, através de correias transportadoras, esse material alimenta a etapa de classificação.

A etapa de classificação de minérios objetiva a separação das partículas por tamanho e o desaguamento adequa os produtos aos parâmetros de qualidade e aos processos posteriores. Na usina em estudo, a classificação se inicia com o peneiramento, que dá origem a dois produtos: o granulado, *oversize* (material retido) da peneira classificadora com abertura de 10 mm, e o *sínter feed* grosso, fruto do *oversize* da peneira escalpe com abertura de 1,4 mm, cujo *undersize* alimenta os hidrociclones, que direcionam o *underflow* para uma etapa de recuperação do *sínter feed* em que gera o chamado *sínter feed* fino, e o *overflow* para etapas de concentração. Ao final dos processos de classificação e peneiramento tanto o *sínter feed* grosso quanto o fino são empilhados juntos e tratados como um só produto.

Em seguida, após a ciclonagem, etapa dedicada à deslamagem do *overflow* dos hidrociclones, é realizada a flotação catiônica reversa. Nessa etapa de concentração, os minerais de quartzo são flotados pelo emprego do coletor amina. Esses compõem o flotado e os minerais de ferro deprimidos por amidos não modificados, compõem o afundado. O produto *pellet feed* com granulometria abaixo de 0,15 mm é filtrado e estocado. O rejeito da flotação passa por uma terceira etapa de concentração, a separação magnética de alta intensidade, o concentrado magnético é recuperado e o rejeito desta etapa de concentração é o rejeito final. Tanto o rejeito quanto o concentrado final passam por separação sólido-líquido nos espessadores e, posteriormente, são filtrados e empilhados. O fluxograma da usina de beneficiamento desse estudo está apresentado na Figura 2.

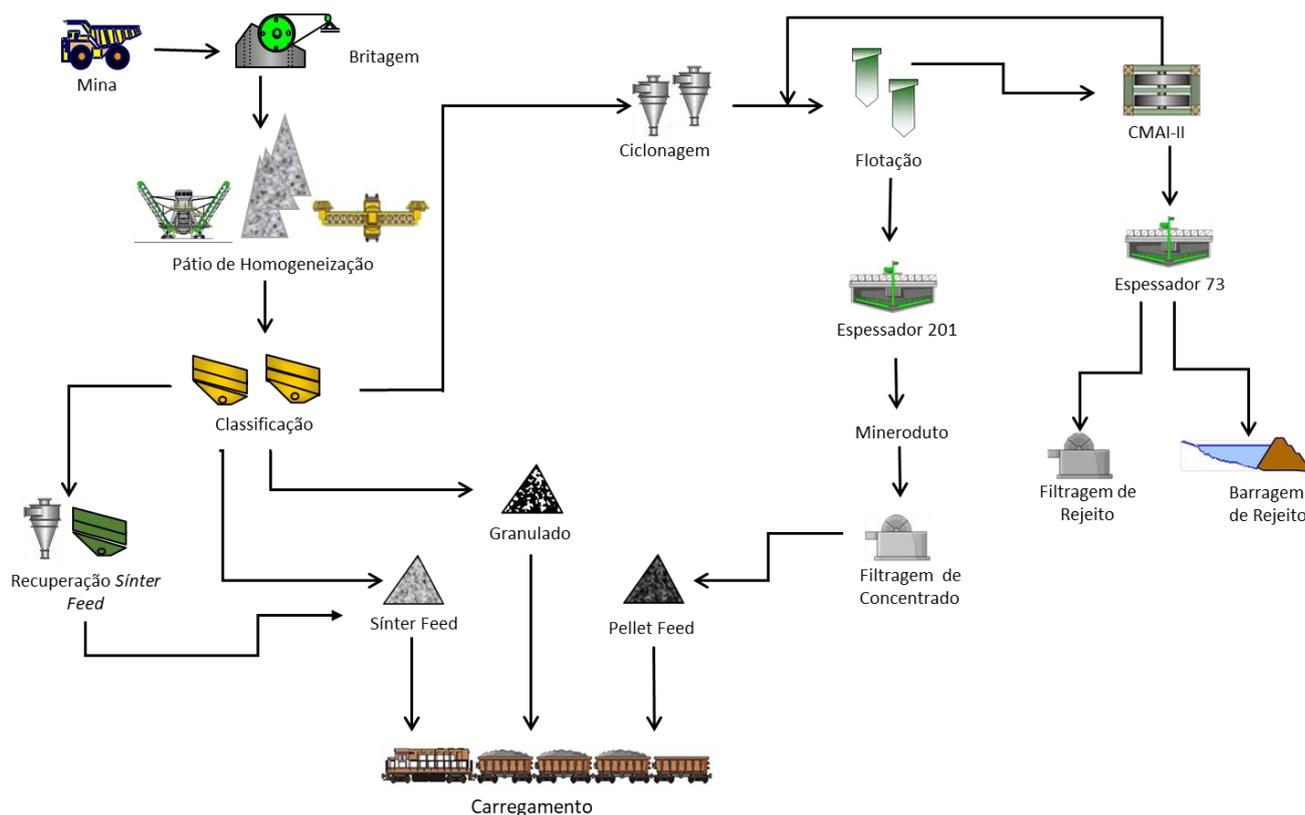


Figura 2 - Fluxograma tratamento de minérios da usina em estudo

3.3 Classificação e peneiramento

As operações unitárias que envolvem classificação e peneiramento objetivam a separação do material em frações de tamanhos distintos, gerando produtos ou adequando

sua granulação e porcentagem de sólidos às etapas posteriores. Para que ocorra a separação por tamanhos pelo peneiramento, o tamanho geométrico das partículas é levado em conta. Já na classificação em meio fluído, toma-se como base a velocidade em que as partículas atravessam o meio fluído, geralmente a água (CORREIA, 2010).

Na usina de beneficiamento em estudo, os equipamentos utilizados nas etapas de peneiramento e classificação são:

- Peneiras vibratórias inclinadas com malha de 10 mm;
- Peneiras vibratórias inclinadas com malha de 1,4 mm;
- Peneiras vibratórias horizontais com malha de 0,3 mm;
- Hidrociclones.

3.3.1 Peneiramento industrial

Esta operação consiste em um processo de separação de partículas em duas frações de tamanhos distintos. Aquelas com tamanho superior à abertura da superfície utilizada para a separação tendem a ficar retidas, compondo o *oversize*. As partículas menores tendem a atravessar as aberturas e compõem o *undersize* (CHAVES e PERES, 2003).

Segundo Correia (2010), o peneiramento pode ser realizado à seco, geralmente aplicados às frações granulométricas de até 6 mm, no entanto, é possível aplicar esse método em frações de até 1,7 mm. O peneiramento à úmido é adotado para partículas de granulação mais fina, normalmente em frações de até 0,4 mm, podendo chegar a 50 μm .

De acordo com Rao (2011), o peneiramento industrial é utilizado para remover materiais de granulação superiores, inferiores ou em uma fração aproximada à característica granulométrica ideal para o processo subsequente, assim como para classificar materiais em uma classe específica de tamanho, gerando produtos.

Para Chaves e Peres (2003), uma peneira deve exercer três ações independentes e diferentes sobre o conjunto de partículas que é alimentada sobre ela, relativo ao comportamento coletivo das partículas (Figura 3). Estas ações devem ser:

- Transporte das partículas através das telas que deve ser garantido pelo movimento de vibração da peneira;

- Estratificação do leito, ou seja, as partículas devem se organizar de maneira que as de granulação mais grossa se mantenham por cima das partículas mais finas, pois estas são capazes de percolar pelos interstícios entre as partículas maiores;
- Peneiramento em si, em que as partículas finas remanescentes no leito executam diversas tentativas até conseguirem atravessar a abertura da tela.

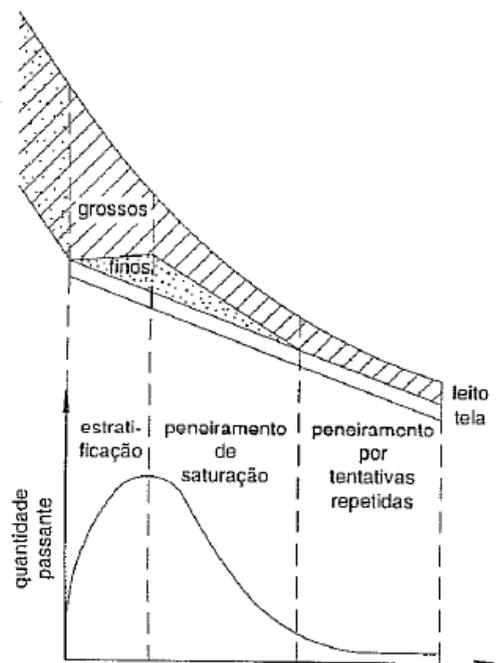


Figura 3 - Comportamento coletivo das partículas (CHAVES e PERES, 2003)

Ainda segundo Chaves e Peres (2003), quanto ao aspecto individual (Figura 4), as partículas sofrem comportamentos diferentes ao passarem pela abertura de uma tela (a), de acordo com o seu diâmetro (d):

- $d > 1,5 a$: partículas uma vez e meia maiores que a abertura da tela não conseguem passar pela peneira, sendo encaminhadas para *oversize*. Em grande quantidade podem acarretar problemas com as telas, tais como deformação, rompimento e desgaste acelerado;
- $1,5 a > d > a$: partículas maiores que a abertura da malha e menores que uma vez e meia que esse tamanho, ficam retidas na peneira, mas irão fazer diversas tentativas para passar, podendo ficar presas em alguma abertura. Em grande quantidade podem reduzir a capacidade de peneiramento;

- $a > d > 0,5 a$: partículas menores que abertura da tela e maiores que metade dessa abertura estão na faixa crítica. Logo, elas passarão somente se caírem em uma posição conveniente, precisando de um número elevado de tentativas;
- $d < 0,5 a$: partículas menores que metade da abertura, irão atravessar com facilidade e não promovem interferência no peneiramento;
- $d \ll 0,5 a$: partículas muito menores que a abertura, se dividem tanto para o *oversize* quanto para o *undersize*. Isso ocorre devido a sua área de superfície elevada que as fazem aderir às partículas maiores e então, ficarão retidas, enquanto a outra parte acompanhará o material passante.

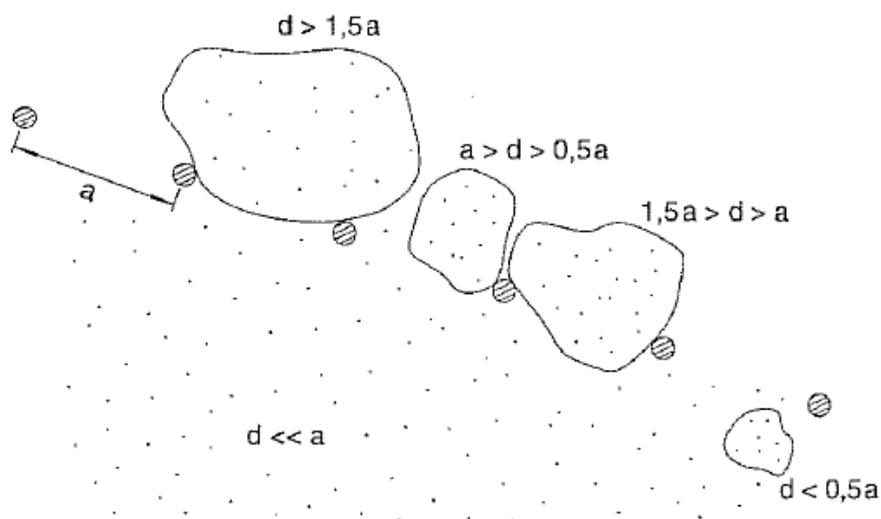


Figura 4 - Comportamento individual das partículas (CHAVES e PERES, 2003)

3.3.1.1 Equipamentos

Segundo Correia (2010), os equipamentos utilizados no peneiramento podem ser divididos em três tipos:

- grelhas: barras metálicas dispostas paralelamente, mantendo um espaçamento regular;
- crivos: formados por chapas metálicas planas ou curvas, perfuradas por um sistema de furos de várias formas e dimensões;

- telas: constituídas por fios metálicos trançados geralmente em duas direções ortogonais, de forma a deixarem entre si “malhas” ou “aberturas” de dimensões determinadas, podendo estas serem quadradas ou retangulares.

Além disso, esses equipamentos podem ser classificados em duas categorias de acordo com o seu movimento: fixas, em que a única força atuante é a da gravidade e por isso esses equipamentos possuem superfícies inclinadas, como as grelhas fixas e peneiras DSM (Dutch State Mines), e móveis, onde o movimento é executado a partir de vibração mecânica do equipamento, como é o caso das peneiras vibratórias (CORREIA, 2010).

3.3.1.2 Peneiras vibratórias

De acordo com Wills e Munn (2006), peneiras vibratórias tem uma superfície de peneiramento retangular com descarga de *oversize* e alimentação em lados opostos. Elas trabalham com intervalos de separação de 300 mm até 0,045 mm e são utilizadas com diversos propósitos, são eles:

- escalpamento – removem a parcela grossa do material;
- classificação – separando partículas por tamanho e adequando-as às etapas posteriores ou a intervalos específicos de tamanhos dos produtos;
- desaguamento - que objetiva remover umidade do material.

De acordo com Chaves e Peres (2003), as peneiras vibratórias inclinadas têm um movimento vibratório circular ou elíptico, esse faz com que as partículas sejam lançadas para cima e para frente, causando uma estratificação do leito e submetendo as partículas várias vezes sobre aberturas sucessivas. A direção de rotação no mesmo sentido do fluxo acarreta maior capacidade, mas diminui a eficiência do peneiramento. Por outro lado, a rotação no sentido oposto dificulta o escoamento e aumenta a probabilidade das partículas de atravessar a tela. Ainda segundo Chaves e Peres (2003), as peneiras vibratórias horizontais Figura 5 têm um movimento vibratório retilíneo, tendo uma capacidade 40% maior que outras peneiras vibratórias. Essas operam de maneira eficiente na faixa de 63,5 mm a 0,3 mm, fora desse intervalo, funcionam muito bem como equipamento desaguador.

As peneiras desaguadoras são alimentadas por uma polpa e produzem material drenado. Elas são instaladas com um leve acive para assegurar que a água não será destinada para os produtos. Dessa forma, uma grossa camada de partículas é formada, retendo partículas mais finas do que a abertura da peneira (WILLS e MUNN, 2006).

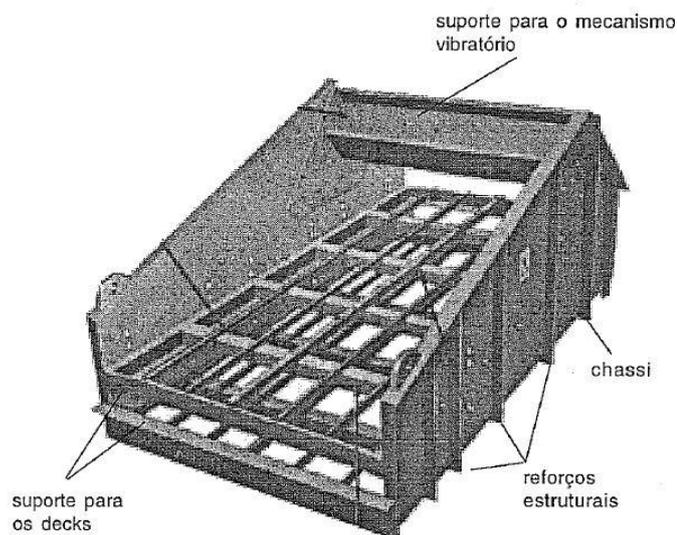


Figura 5 - Peneira vibratória horizontal (CHAVES e PERES, 2003)

3.3.1.3 Eficiência de peneiramento

Em peneiramento industrial a palavra eficiência é empregada para expressar a avaliação do desempenho da operação de peneiramento, em relação a separação granulométrica ideal desejada, ou seja, a eficiência de peneiramento é definida como a relação entre a quantidade de partículas mais finas que a abertura da tela de peneiramento e que passam por ela e a quantidade delas presente na alimentação (CORREIA, 2010).

$$E = \frac{P}{aA} * 100$$

Equação 1 – Eficiência de peneiramento

Onde,

E = eficiência (%);

P = taxa do material passante (t/h);

A = taxa de alimentação (t/h);

a = percentagem de material menor que a malha da alimentação.

Segundo Correia (2010), industrialmente os valores de eficiência situam-se entre 80 e 90%, podendo chegar a 95%. De acordo com Valadão e Araújo (2007), uma operação de desaguamento por peneiras é tida como bem sucedida quando a eficiência por peneiramento é muito baixa, pois sua função é manter os sólidos no *oversize* e permitir a passagem de água para *undersize*.

É possível também calcular a eficiência considerando-se o material passante (E_p) ou o material retido (E_r), a depender do objetivo da análise a ser feita. De acordo com o Metso (2005), o cálculo é feito de acordo com a Equação 2 e a Equação 3:

$$E_p = \frac{\% \text{ alimentação que relamente é passante}}{\% \text{ alimentação menor que abertura da tela}} * 100$$

Equação 2 - Eficiência de peneiramento quanto ao passante

$$E_r = \frac{\% \text{ alimentação maior que a abertura da tela}}{\% \text{ alimentação que relamente fica retida}} * 100$$

Equação 3 - Eficiência de peneiramento quanto ao retido

Para Sampaio e Silva (2007) os fatores que afetam a eficiência do peneiramento são: a taxa de alimentação, sendo um dos mais críticos pois seu excesso pode causar desvios na direção das partículas e do fluido para o fluxo retido, além de uma redução na vida útil das telas. E o outro fator citado pelos autores é a percentagem de sólidos, que no caso de peneiramento a úmido, tem a água como responsável pelo transporte de partículas para o passante, com isso, o volume de água necessário ao peneiramento afeta sua eficiência, uma vez que ela aumenta quando a percentagem de sólidos de alimentação diminui. Na prática, utiliza-se valores na ordem de 20% de sólidos, podendo ter a eficiência maximizada com percentagem de sólidos na ordem de 10 a 15%.

É possível levantar outros fatores que afetam a eficiência do peneiramento como a amplitude e a frequência de operação do equipamento, os quais têm efeito direto sobre as ações exercidas pela peneira durante o peneiramento, sendo elas o transporte, a estratificação do leito e o peneiramento em si (CHAVES e PERES, 2003). Rao (2011)

relata que capacidade de peneiramento e sua eficiência são opostas, isto é, se a capacidade aumenta, a eficiência diminui e se a capacidade diminui, a eficiência aumenta. Chaves e Peres (2003) têm uma explicação semelhante, relatando que peneiras mais longas tendem a ser mais eficientes, pois as partículas, principalmente as da faixa crítica, têm maiores chances de serem expostas às telas. Por outro lado, peneiras mais largas têm maiores capacidade e, conseqüentemente, menos eficiência.

3.3.2 Classificação em meio fluido

Classificação em meio fluido é um método de separação de mistura de minerais em dois ou mais produtos com base na velocidade que as partículas atravessam um meio fluido. No processamento mineral normalmente esse meio é a água, e a classificação a úmido é aplicada para partículas minerais que são consideradas muito finas, em que o peneiramento não é eficiente, menores que $50\ \mu\text{m}$ (WILLS e MUNN, 2006).

O classificador em meio fluido recebe a alimentação com partículas de diferentes tamanhos e a separa em duas frações ou produtos: o *underflow*, que contém maior proporção das partículas mais grossas, e o *overflow*, onde se encontram as partículas de menores dimensões (CHAVES, 2002). De acordo com Wills e Munn (2006), os classificadores são colunas em que as partículas afundam ou ascendem se suas velocidades terminais são maiores ou menores do que a velocidade fluído. O *overflow* é composto por partículas com velocidade terminal menor do que a velocidade ascendente do fluído e o *underflow*, por aquelas com velocidade terminal maior (Figura 6).

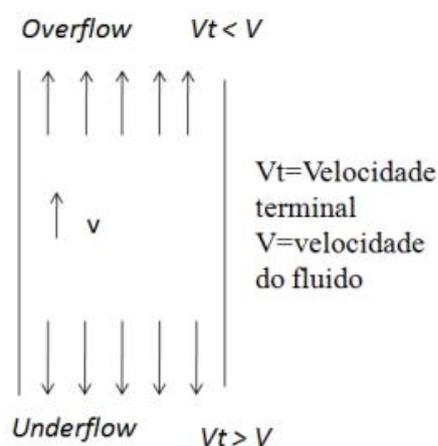


Figura 6 - Representação esquemática para um classificador (CORREIA, 2010)

Existem, conforme a Figura 7, diversos tipos de classificadores dependendo do mecanismo de funcionamento, do fluido, da força atuante na classificação, entre outros.

Autor	Tipos de Classificação	
Trajano (1)	<ul style="list-style-type: none"> -Úmido -Ar 	<ul style="list-style-type: none"> Mecânico Não mecânico Gravidade Centrífugo Mecânico
Perry (2)	<ul style="list-style-type: none"> -Mecânico -Não Mecânico -Hidráulico -Horizontais 	
Wills (3)*	<ul style="list-style-type: none"> -Verticais 	

Figura 7 - Tipos de classificadores (CORREIA, 2010)

Os classificadores horizontais são do tipo sedimentação em queda livre e têm ampla utilização quando se pretende uma separação por apenas por tamanho, sendo eles: cones de sedimentação, classificadores mecânicos e classificadores espirais (CORREIA, 2010).

Ainda segundo Correia (2010), os classificadores verticais levam em conta o efeito da densidade das partículas, e sua operação é baseada na injeção de água, em sentido oposto ao das partículas, à polpa de alimentação. Esses vêm sendo substituídos por hidrociclones, equipamentos que se baseiam na sedimentação centrífuga. Os hidrociclones (Figura 8) são equipamentos muito versáteis e amplamente utilizados na indústria mineral, possuindo aplicações como espessamento, deslamagem, classificação, classificação seletiva e pré-concentração, apresentando vantagens como alta capacidade, controle operacional simples e baixo custo de investimento (CORREIA, 2010).

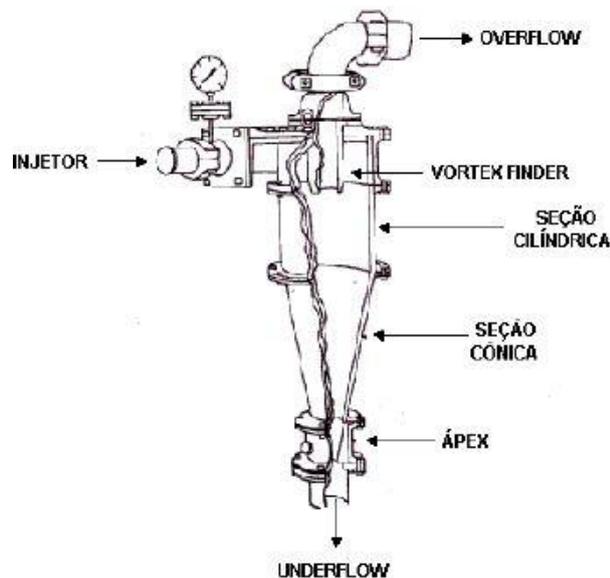


Figura 8 - Representação esquemática de um hidrociclone convencional (CORREIA, 2010)

3.3.3 Classificação na usina em estudo

Na usina em estudo, a etapa de classificação granulométrica (Figura 9) é composta sequencialmente por peneiras classificadoras (aberturas de 10 mm), peneiras escalpadoras (aberturas de 1,4 mm) e hidrociclones. O *oversize* (material retido) da peneira classificadora já é o produto granulado, com granulometria entre 50 e 10 mm. O *undersize* (material passante) é destinado para peneiras escalpadoras, em que o material retido é *sinter feed* grosso, com granulação menor que 10 mm e maior que 1,4 mm, e o passante destina-se para os hidrociclones. Esses equipamentos geram dois produtos: o *underflow*, nesse caso, material maior que 0,15 mm e o *overflow*, material menor que 0,15 mm, que é destinado para as etapas de concentração. A ciclonação é a primeira, sendo responsável pela deslamagem do material que será, posteriormente, destinado para a flotação, gerando o produto *pellet feed*. O *underflow* dos ciclones é destinado para outro circuito, chamado circuito de recuperação de *sinter feed*, em que o material passa por outros hidrociclones e peneiras vibratórias horizontais, as desaguadoras (com abertura de 0,3 mm), a fim de ajustar sua umidade e granulação, conforme a Figura 10.

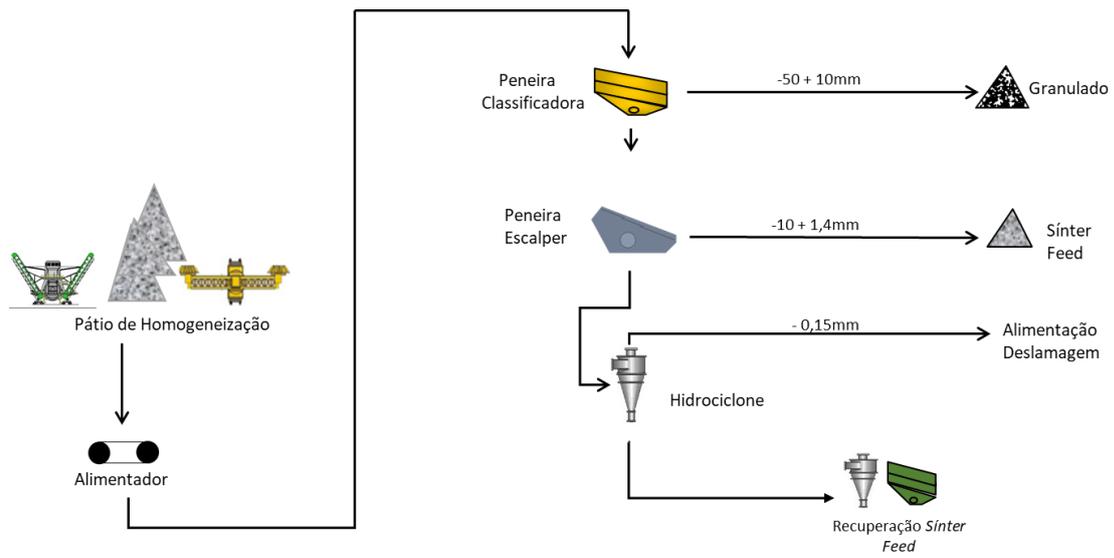


Figura 9 - Fluxograma das etapas de classificação da usina em estudo

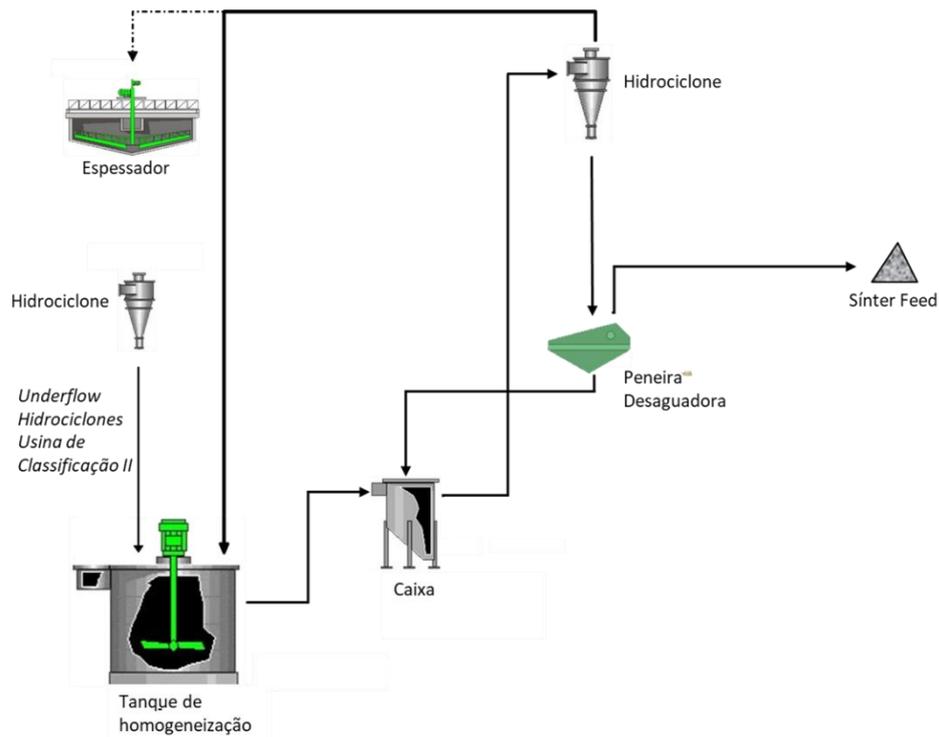


Figura 10 - Fluxograma do circuito para recuperação de uma das frações do produto *sínter feed* usina em estudo

3.4 Curvas de partição

Na avaliação da eficiência de separação dos classificadores, é empregada a curva de partição, também conhecida como curva de desempenho, de eficiência e de distribuição. Se um material possui uma densidade uniforme, então a separação se baseia inteiramente no tamanho das partículas (CORREIA, 2010).

De acordo com Wills e Munn (2006), as curvas de partição relacionam a fração em peso ou porcentagem de cada tamanho de partícula na alimentação que é destinado a um dos produtos. No caso de uma separação perfeita, um dos produtos do processo de classificação seria composto por partículas finas, o *overflow*, e o outro, por partículas grossas, o *underflow*. Entretanto, na prática isso não ocorre, sendo encontradas partículas grossas e finas em ambos os produtos, o que aponta que a classificação não ocorre de forma ideal e perfeita.

Na curva de partição (Figura 11 e Figura 12) é possível identificar o ponto de corte que pode ser definido como o ponto em que 50% das partículas da alimentação são destinadas ao *underflow*, ou seja, partículas deste tamanho tem chances iguais de serem encaminhadas ao overflow ou ao *underflow*, este ponto é conhecido como d_{50} (WILLS e MUNN, 2006).

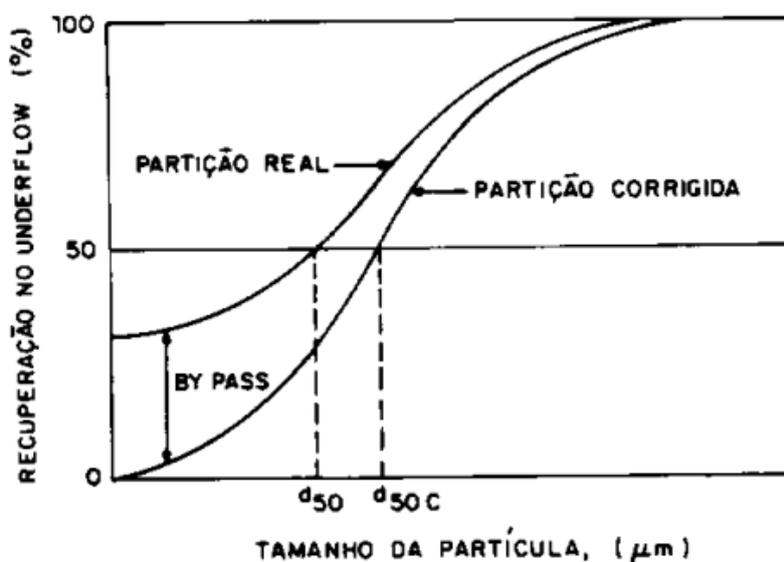


Figura 11 - Curva de partição para hidrociclones (CARISSO e CORREIA, 2004)

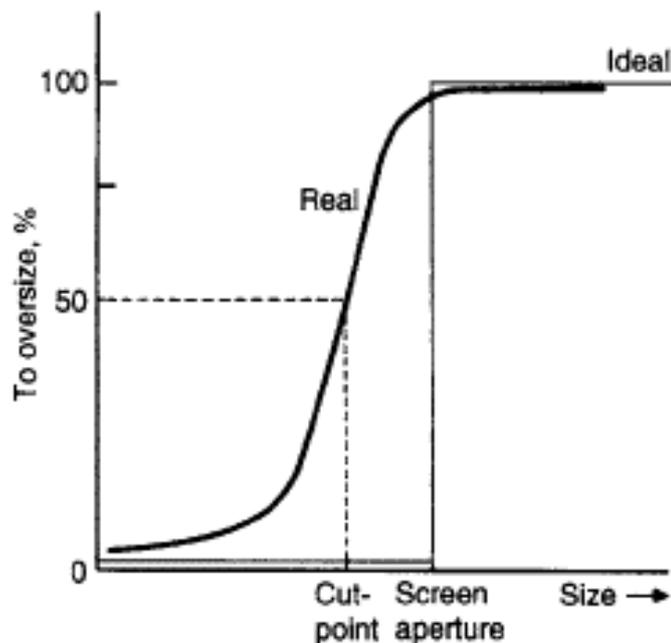


Figura 12 - Curva de partição para peneiras (WILLS e MUNN, 2006)

A inclinação da curva pode ser expressa pelos pontos conhecidos como d_{75} e d_{25} , em que 75 e 25% das partículas destinam-se ao *underflow*, respectivamente. Essa inclinação representa a imperfeição do corte. A eficiência de separação ou imperfeição I , é dada pela Equação 4:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 * d_{50}}$$

Equação 4 – Imperfeição da eficiência de separação

Quanto mais próximo à vertical for a inclinação da curva, maior será sua eficiência (WILLS e MUNN, 2006), ou seja, quanto mais próximo de zero o valor de I , melhor a eficiência do processo.

Muitos autores discutem sobre uma curva de partição corrigida e um d_{50} corrigido, isto é, que desprezam a ação do curto-circuito, também conhecido como *by-pass*, que é o efeito em que as partículas finas são carreadas pela partição de água para o *underflow*, ou seja, essas partículas não sofrem classificação. Kelsall (1953) propõe que sólidos de todos

os tamanhos são arrastados pela fração líquida por curto-circuito, em proporção direta à fração de água da alimentação transportada para o *underflow*. A Equação 5 demonstra a curva.

$$y' = \frac{y-R}{1-R}$$

Equação 5 – Fração mássica de água corrigida

Onde:

y' = fração mássica corrigida de um determinado tamanho direcionada ao *underflow*;

y = fração mássica real de um determinado tamanho direcionada ao *underflow*;

R = fração de líquido da alimentação recuperado no *underflow*.

Para encontrar o valor R faz-se a porcentagem em peso do *underflow* multiplicado pela sua taxa diluição, dividido pela multiplicação de cem pela taxa de diluição da alimentação.

Para Wills e Munn (2006), a curva de partição correta descreve as partículas que são recuperadas no *underflow* devido verdadeiramente a classificação e não, pela ação da água. Importante ressaltar que há o efeito do curto circuito no *overflow*, ou seja, partículas grossas presentes no *overflow* devido à ação da água, no entanto, esse efeito não é tão significativo quanto no *underflow*.

Ainda segundo Wills e Munn (2006), a construção de uma curva de partição pode ser iniciada pelo cálculo da porcentagem de sólidos em peso na alimentação do classificador, utilizando a Equação 6.

$$\% \text{ Sólidos em peso} = 100 * \frac{s(D - Da)}{D(s - Da)}$$

Equação 6 – Porcentagem de sólidos

Onde:

s = densidade dos sólidos (kg/m³);

D = densidade da polpa (kg/m³);

D_a = densidade da água (kg/m³).

Em seguida, é possível calcular a taxa de diluição da alimentação, de acordo com a Equação 7:

$$\text{taxa de diluição} = \frac{100 - \% \text{sólidos em peso}}{\% \text{sólidos em peso}}$$

Equação 7 – Taxa de diluição

Calcula-se também as taxas de diluição do *underflow* e do *overflow* com base nos valores calculados de % de sólidos em peso dos respectivos produtos. Sendo,

F = taxa de alimentação de sólidos (t/h);

U = taxa em massa do *underflow* (t/h);

V = taxa em massa do *overflow* (t/h).

Desde que a quantidade de água que alimenta o classificador seja igual à quantidade de água que o deixa em uma mesma unidade de tempo, tem-se a Equação 8:

$$\text{Taxa de diluição da alimentação} * F = \text{taxa de diluição do underflow} * U + \text{taxa de diluição do overflow} * V$$

Equação 8 – Balanço das taxas de diluição do classificador

O método exposto a seguir para a construção da curva de partição refere-se ao método descrito por Wills e Munn (2006).

Utilizando a Equação 8 encontra-se a proporção $\frac{U}{F}$, isso é possível realizando as substituições de taxas de diluição e taxa em massa do *overflow*. O valor encontrado representa a porcentagem em peso da alimentação que é destinado ao *underflow* e consequentemente, encontra-se a parcela destinada ao *overflow*.

A partir de então, deve-se construir uma tabela conforme Tabela 2 que contém a análise granulométrica do *underflow* e *overflow* nas colunas 2 e 3, respectivamente. Na sequência tem-se a quarta coluna, que resulta da multiplicação da coluna 2 pela proporção

de *underflow* em relação à alimentação, valor encontrado por meio da Equação 8. Idem para a quinta coluna, no entanto ela se refere ao *overflow*. A soma das colunas 4 e 5, resultam na sexta coluna que é a reconstituição da alimentação. A coluna seguinte da tabela refere-se ao tamanho nominal das peneiras e por fim, a oitava e última coluna é composta pela divisão de cada peso da coluna 4, que é multiplicação do retido naquele tamanho pela proporção da alimentação destinada ao *underflow*, pelo seu correspondente na coluna 6. Por fim, plota-se a coluna 8 pela coluna 7 e então é possível determinar a curva de partição.

Tabela 2- Tabela de apoio para construção de uma curva de partição (Adaptada, WILLS e MUNN, 2006)

1	2	3	4	5	6	7	8
Tamanho da abertura(μm)	% retido		% da alimentação		Reconstituição da alimentação	Tamanho nominal	% da alimentação destinada ao U/F
	U	O	U/F	O/F			

Segundo Nunes (2012), as curvas de partição representam o desempenho de qualquer separação de sólidos por tamanhos não relativo a um equipamento específico de processo e a partição é definida como a proporção de um determinado tamanho de partícula presente na alimentação que se distribui igualmente entre os produtos de maior e de menor granulação.

3.5 Avaliação de equipamentos de classificação

Reis (2016) discutiu o desaguamento por peneiras empregando o método da eletrorresistividade com interpolação de dados espaciais no interior do leito das telas, avaliando o desaguamento ao longo do equipamento de bancada e a umidade final. Além disso, avaliou a eficiência do peneiramento por meio da relação entre a quantidade de material de tamanho inferior à abertura da tela da peneira que passa por ela e a quantidade presente na alimentação, análogo ao apresentando na equação de eficiência de peneiramento (Equação 1) presente nesse trabalho. Os resultados obtidos foram uma baixa eficiência de peneiramento e a correlação do resistímetro com a umidade foi possível, portanto, a técnica mostrou-se viável.

Domingues (2019) analisou o desempenho de peneiras vibratórias de alta frequência na rota de finos de uma usina de beneficiamento. A alta frequência

proporciona a quebra da superfície de tensão do minério e um aumento da exposição de partículas finas nas telas. Com análises feitas a partir da coleta de amostras observou-se uma expressiva recuperação de finos (+0,15 mm), reduzindo a taxa de materiais dessa granulação no rejeito final, conseqüentemente, aumentando a recuperação mássica e produção da usina.

Teixeira (2013) abordou o dimensionamento de equipamentos, por meio de um *software*, em um circuito de preparação de minérios, incluindo britadores, moinhos, peneiras e hidrociclones. O autor citou o método de medição de capacidade de peneiras para avaliação de desempenho delas, realizado pelo programa computacional a partir de dados fornecidos pelo usuário, com base em toneladas de alimentação por unidade de tempo e dimensão da peneira, assim como fatores de capacidades que representam as alterações das condições de operação pré definidas e do material. Os resultados obtidos com base nos cálculos realizados pelo *software* se mostraram semelhantes aos indicados pelos fornecedores.

Guerreiro (2015) propôs o estudo do peneiramento vibratório por meio da avaliação dos efeitos da abertura das telas, concentração de sólidos e vibração sobre o teor de umidade, eficiência de separação e diâmetro de corte. Os testes são feitos em escala piloto utilizando suspensão de rocha fosfática. Para o cálculo do teor de umidade utilizou-se a técnica de diferença mássica do material úmido e seco. A avaliação da eficiência granulométrica foi feita calculando-se a proporção de partículas menores que a abertura da tela presentes no *undersize* em relação à quantidade presente na alimentação. O teor de corte foi obtido por meio de curvas de distribuição granulométrica. O autor ressaltou fatores que afetam o desempenho do peneiramento, tais como características das telas, magnitude da vibração, inclinação, teor de sólidos na alimentação, tamanho e formato das partículas, além da densidade e da viscosidade do fluído a ser peneirado.

Nunes (2012) utilizou modelos de curva de partição para análise do desempenho de hidrociclones e peneiras vibratórias. Diferentes modelos foram utilizados na calibração de curvas de partição para hidrociclones, assim como suas limitações e aplicações, incluindo Plitt (1976), Lynch e Rao (1975) e Nageswararao (1995). Quanto às peneiras, a autora evidenciou a complexidade dos modelos aplicados, pois são dotados de diversos parâmetros e de ensaios específicos. Além disso, o estudo não está relacionado ao dimensionamento dos equipamentos, apenas à eficiência do processo. Desse modo, o

modelo de curvas de partição simples, baseado em parâmetros como d_{50c} , inclinação e partição de água, foi satisfatório para a análise.

Silva (2014) avaliou hidrociclones de diferentes etapas de um circuito de beneficiamento mineral, aplicando o modelo de Lynch e Wills para a calibração da curva de partição utilizada para a análise do desempenho dos hidrociclones. A partir da curva construída e corrigida de acordo com o modelo citado, foram extraídos e calculados parâmetros como d_{50} , d_{25} , d_{50c} , d_{75} , d_{95} , α e m para, então, classificar a eficiência dos hidrociclones. O modelo se mostrou prático e útil para a avaliação de desempenho dos equipamentos.

Luz e Carvalho (2005) desenvolveram um sistema de dimensionamento de peneiras segundo uma adaptação do dimensionamento clássico de Allis-Chalmers, baseado no princípio de probabilidades de passagem das partículas pelas telas das peneiras. Essa, por sua vez, foi influenciada pelas condições operacionais e pela relação de tamanho entre partículas e a abertura das telas. Além disso, Carvalho e Luz (2005) apresentaram, em um segundo trabalho, o módulo de simulação do sistema computacional construído. Esse teve a possibilidade de simular e avaliar diferentes cenários do peneiramento industrial e piloto, além da quantificação do impacto de variáveis como abertura, frequência e amplitude, no processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Levantamento dos dados

Os dados para realização deste trabalho foram provenientes de uma usina de beneficiamento de minério de ferro. A equipe de profissionais do laboratório da mineradora em questão foi responsável por coletar amostras em pontos previamente planejados, conforme Figura 13 e, posteriormente, realizar as análises laboratoriais que embasaram os estudos realizados.

Para que as amostragens fossem efetuadas de forma representativa, foi necessário controlar e estabilizar o processo, em especial o circuito de recuperação de *sinter feed* onde a peneira desaguadora em estudo está alocada. Para isso foram estabelecidas as premissas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Premissas das amostragens

PREMISSAS DAS AMOSTRAGENS	
Taxa de alimentação circuito	500 t/h
Densidade de polpa alimentação do circuito	1,20 t/m ³
Vazão de alimentação do circuito	1.200 m ³ /h
Pressão de operação dos Hidrociclones	1,50 Kgf/cm ²

Com a operação do processo estável, foram coletadas amostras da alimentação, dos produtos dos hidrociclones que operam no circuito e do *oversize* da peneira desaguadora. A Figura 13 mostra o fluxograma do circuito em análise, no qual estão destacados os pontos de amostragem listados na sequência.

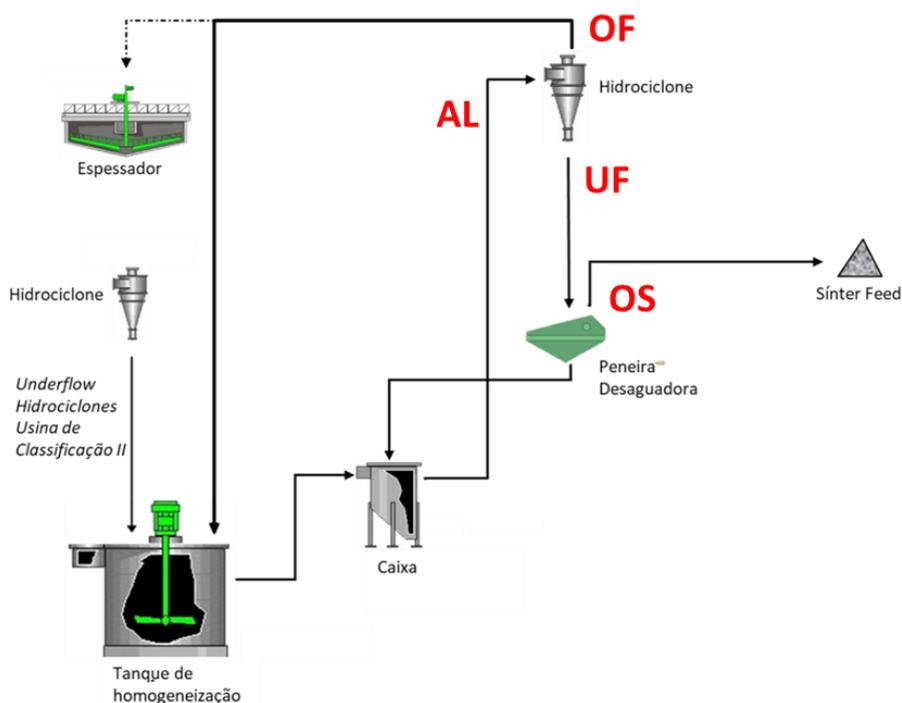


Figura 13 - Pontos de amostragem do circuito de recuperação de uma das frações de *sinter feed*

- AL = alimentação dos hidrociclones;
- OF = *overflow* dos hidrociclones;
- UF = *underflow* dos hidrociclones;
- OS = *oversize* das peneiras desaguadoras.

4.2 Análise granulométrica

Após a coleta das amostras, foram realizados ensaios de peneiramento à úmido, com uma série de peneiras com aberturas entre 2200 a 20 μm , a fim de obter a distribuição granulométrica das partículas que constituem as frações amostradas. E então, utilizando o *software* Microsoft Excel, foram construídas tabelas para a apresentação dos dados obtidos, as quais contêm massas retidas em cada peneira. Posteriormente, com base nessa tabela, foram traçadas curvas de distribuição granulométrica de todas as amostras coletadas.

O cálculo do teor de umidade do material retido na peneira desaguadora, ou seja, a determinação da quantidade de água presente na amostra é realizada por meio da Equação 9.

$$umidade(\%) = 100 * \frac{(massa \text{ úmida}) - (massa \text{ seca})}{(massa \text{ úmida})}$$

Equação 9 – Cálculo de umidade

A partir da pesagem das amostras úmidas e secas em estufa, fez-se o uso da Equação 9 e determinou-se o teor de umidade da amostra.

Além disso, também foi realizado o cálculo da eficiência do peneiramento por meio da Equação 2 e da Equação 3, apresentadas no item 3.3.1.3, relativas ao material passante e ao material retido, sendo essa eficiência de maior interesse pois o produto é o *oversize*. No entanto, trata-se de um cálculo somente para auxiliar na validação da hipótese de ineficiência do equipamento quanto a sua capacidade de peneiramento, pois refere-se a um processo de desaguamento.

4.3 Análise química

A determinação da composição química das amostras foi realizada pela equipe do laboratório da empresa, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X para a identificação e quantificação de elementos presentes nas amostras.

4.4 Curvas de partição

A construção da curva de partição foi baseada no método descrito por Wills e Munn (2006) explicitado na revisão da bibliografia desse trabalho. Em resumo, o procedimento aplicado foi a construção de uma tabela como o exemplo apresentado na Tabela 2, que parte dos resultados das análises granulométricas e, neste caso, do balanço de massas do processo. Posteriormente, calcula-se as porcentagens de sólidos e taxas de diluição para prosseguir seu preenchimento.

Nesse trabalho, o método foi aplicado para descrever o comportamento de uma peneira desaguadora, analisando assim seu *oversize*. Essa parcela foi utilizada pois detém a maior quantidade de grossos, fator determinante para a análise por meio das curvas de partição, independente do equipamento classificador operado.

4.5 Análise das características construtivas e operacionais das peneiras desaguadoras

O equipamento estudado nesse trabalho é uma peneira desaguadora Metso/Faço tipo “D” (Figura 14), projetadas com a função de recuperação de finos presentes na polpa. De acordo com Metso (2005), essas peneiras apresentam movimento retilíneos produzidos por dois eixos paralelos de vibradores que giram em sentidos opostos. Ainda segundo o fornecedor, para que ocorra a máxima separação do fluído pela compactação da camada de material, essa deve ser alta, sendo usualmente maior que a 100 mm de espessura. Para alcançar a máxima compactação, opera-se com alta aceleração e inclinação negativa. Com a inclinação negativa, em que o ponto de descarga é mais elevado do que o ponto de alimentação, o movimento do *oversize* é dificultado, proporcionando um desaguamento mais intenso, assim há um aumento do leito próximo ao ponto de descarga e a inclinação faz com a água escorra por trás da peneira (CHAVES, 2004).

As especificações técnicas da peneira de acordo com Metso (2005) são as apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações da peneira vibratória horizontal (METSU, 2005)

ESPECIFICAÇÕES DA PENEIRA VIBRATÓRIA HORIZONTAL	
Modelo	D6'X16''
Dimensões do quadro	1800mm x 4880mm
Área útil	8,6 mm
Comprimento	5210 mm
Altura máxima	1889 mm
Largura máxima	3183 mm
Motor HP	2 x 15

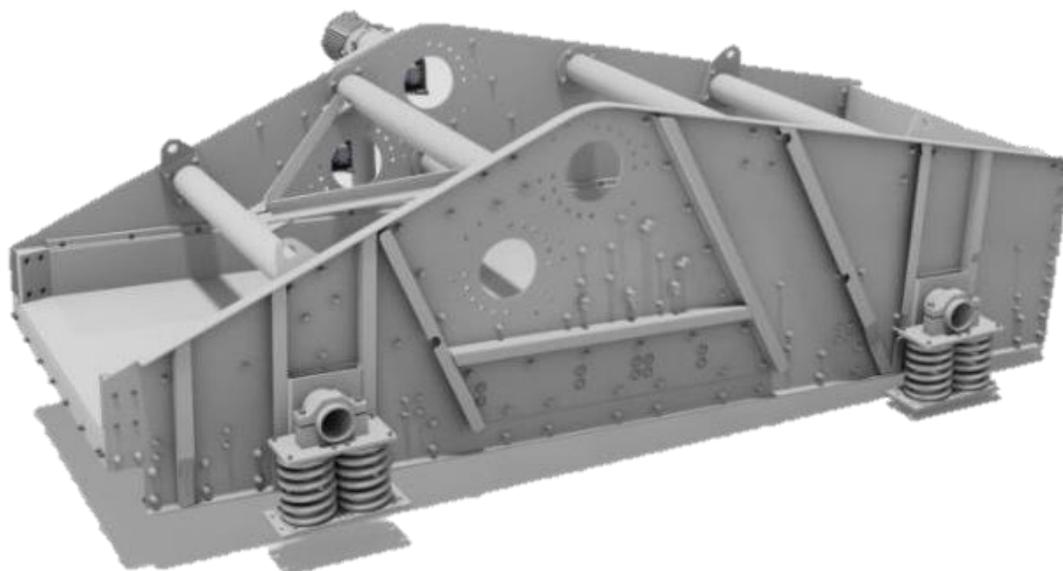


Figura 14 - Peneira desaguadora estudada (METSO, 2005)

As telas utilizadas são telas de poliuretano, pois apresentam maior durabilidade segundo recomendação do fabricante, do modelo *Snapdeck* (Figura 15). Esse é um modelo de fixação por pressão que apresenta vantagens por ter um encaixe rápido sem a necessidade de itens acessórios, como parafusos, pinos e barras de fixação, proporcionando também maior agilidade na troca.

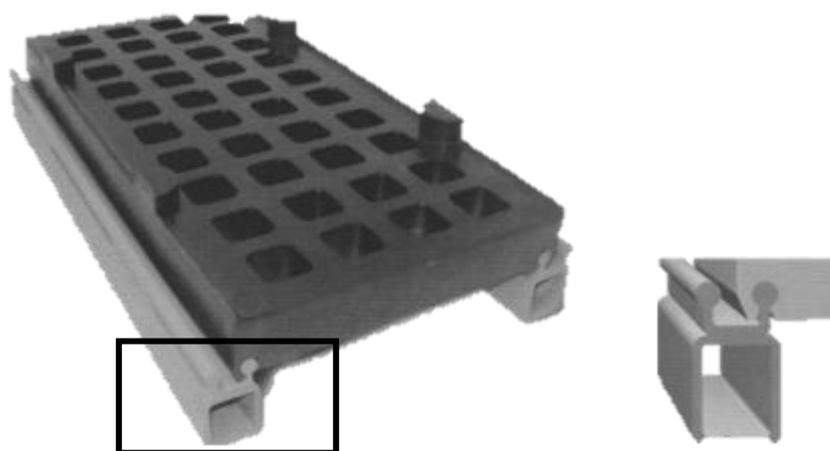


Figura 15 - Sistema de fixação Snapdeck das telas (Adaptada de VIMAX)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise granulométrica

Os resultados apresentados a seguir referem-se à campanha de amostragem realizada pela equipe de processo da empresa em questão, no circuito em que se encontra a peneira desaguadora, seguindo as premissas da Tabela 3. Nessa campanha foram coletadas quatro amostras, conforme mostrado na Figura 13.

Seguem na Figura 16 e na Figura 17 os resultados referentes à análise granulométrica das amostras de *underflow* dos hidrociclones e *oversize* da peneira desaguadora apresentados como curvas de distribuição granulométrica, respectivamente. Faz-se importante ressaltar que o *underflow* dos hidrociclones representa a alimentação das peneiras desaguadoras, objeto de estudo deste trabalho.

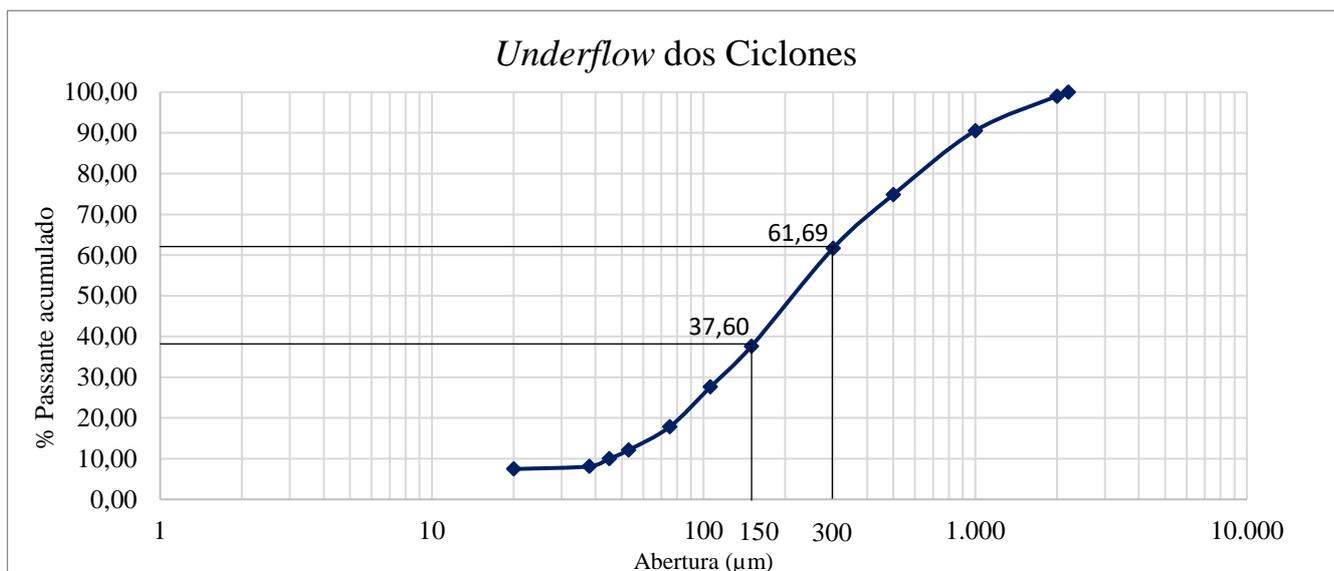


Figura 16 - Curva de distribuição granulométrica do *underflow* dos ciclones

Analisando o gráfico de distribuição granulométrica do *underflow* dos ciclones (Figura 16) observa-se que 61,69% das partículas são passantes em 300 µm, tamanho referente à abertura da peneira desaguadora que essa fração de material alimenta, ou seja, teoricamente seriam destinadas ao *undersize*. Além disso, é possível constatar que 37,60% das partículas são finas, ou seja, são passantes em 150 µm. Essas partículas, em

teoria, deveriam ser destinadas às etapas de concentração ao passarem pelos hidrociclones presentes na etapa que antecede o circuito de recuperação de frações de *sinter feed*.



Figura 17 - Curva de distribuição granulométrica do *oversize* das peneiras desaguadoras

O material retido na peneira desaguadora desse circuito é o produto *sinter feed*. Com base nas especificações de qualidade da empresa para o produto *sinter feed*, espera-se que o teor de umidade seja de até 10,5% e que a porcentagem de finos, partículas menores que 150 μm, seja de até 16%.

Com base na análise da distribuição granulométrica do *oversize* da peneira (Figura 17), constatou-se que a amostra está fora das especificações para porcentagem de finos, pois apresenta 29,02% de partículas menores do que 150 μm. Observa-se ainda que a amostra apresenta 54,36% de partículas passantes em 300 μm, tamanho correspondente à abertura das telas. Com isso, conclui-se que há muitas partículas que deveriam ser destinadas ao *undersize* presentes no *oversize*. No entanto, trata-se de peneira desaguadora, logo, não é esperada uma separação de tamanhos muito eficiente, pois seu objetivo é a separação sólido-líquido. Segundo Chaves (2004), nesses tipos de peneiras as partículas ficam aderidas umas às outras e se movem em conjunto sob a tela, tendo então um comportamento não individual. A água presente entre as partículas escorre, mas as partículas se mantêm coesas, passando apenas aquelas que são muito finas e estão em suspensão com a água, essas são carregadas pelo efeito do curto circuito.

Um problema enfrentado pela equipe responsável pelo processo, é o alto número de falhas nas telas da peneira desaguadora, seja por rompimento ou flambagem nas telas. Segundo dados da empresa, a média era de 30 telas danificadas por peneira ao mês, peças que teriam a durabilidade esperada de cerca de seis meses, falhavam em menos de um mês.

Na Figura 18 e na Figura 19, é possível observar as falhas de rompimento e flambagem nas telas das peneiras desaguadoras. Diante disso, sugere-se que uma possível causa para tais eventos seja a porcentagem de partículas grossas, pelo menos uma vez e meia maiores que abertura da tela. Então, analisando a distribuição granulométrica do *oversize* (Figura 17) percebe-se que cerca 12% das partículas têm dimensões de 1 mm ou mais, ou seja, partículas mais de três vezes maiores que a abertura da tela, ficam retidas no *oversize*. Ademais, conforme citado anteriormente, 29% das partículas têm uma vez e meia o tamanho da abertura da tela, o que é significativo e pode acarretar problemas com as telas.

Logo, a presença de partículas de granulação grossa, juntamente com as de granulação fina que ficam retidas devido à sua junção com partículas maiores, podem ser fatores contribuintes para a sobrecarga das telas, acarretando então, os eventos de falhas relatados acima.



Figura 18 – Rompimento da tela da peneira desaguadora

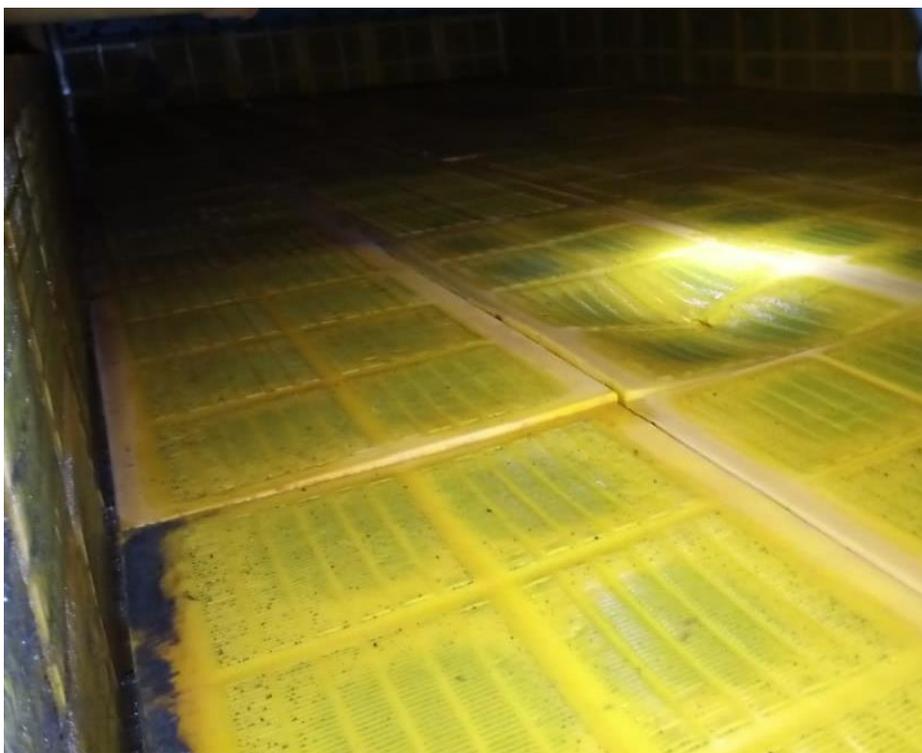


Figura 19 - Flambagem na tela da peneira desaguadora

Analisando a distribuição granulométrica alimentação da peneira, Figura 16, em paralelo com a teoria exposta por Chaves e Peres (2003) sobre o comportamento individual das partículas (Figura 4), constata-se, por meio de interpolação simples, que 71,56% são passantes na abertura de 450 μm , ou seja, cerca 29% das partículas ficam retidas e são pelo menos uma vez e meia maiores que a abertura da tela. Essa é uma quantidade considerável de partículas grossas que podem ocasionar problemas operacionais com as telas, conforme mostra a Figura 18 e a Figura 19. A presença de partículas situadas na faixa crítica, ou seja, com tamanhos entre a abertura e sua metade são determinantes quanto a capacidade e eficiência do peneiramento. Pela Figura 16, observa-se que partículas nessa faixa de tamanho são cerca de 24,09% dos passantes, essas partículas dependem da posição em que são expostas às telas, podendo então passar por elas, no entanto, o baixo índice de passantes afeta a negativamente a eficiência do equipamento enquanto avaliado como separador de tamanhos, porém esse baixo índice é tido como uma vantagem enquanto equipamento desaguador.

Como alternativa para o problema da presença notável de partículas de granulação grossa, pode-se instalar uma peneira de alívio no circuito, ou seja, o tanque de homogeneização do circuito (Figura 10) seria alimentado pelo *undersize* dessa nova peneira classificadora, reduzindo então o número de partículas grossas.

5.2 Teor de umidade

Foi realizado também o cálculo do teor de umidade da amostra de *oversize* da peneira desaguadora. Utilizando a Equação 9, obteve-se o resultado de 14,39% de umidade para o produto *sinter feed*, valor acima do valor de especificação para esse parâmetro, que é de 10,5%.

Conforme observado, ao analisar a curva distribuição granulométrica do *undersize* da peneira desaguadora (Figura 17) percebe-se que a presença de partículas muito finas, tamanhos de até 150 μm , que representam 29,02% do retido, ou seja, uma quantidade importante. Ainda nessa análise, constata-se que partículas ainda mais finas, por exemplo, aquelas menores que 75 μm , representam 12,88% do retido. Esses dados sugerem um comportamento coletivo dessas partículas, isto é, as partículas menores se aderem às partículas maiores e as acompanham para o *oversize*. Dessa forma, pode-se relacionar a quantidade de finos com o elevado teor de umidade, pois como as partículas finas têm

maior superfície de contato, o filme de água se distribui nessa superfície, portanto, a umidade tende a ser maior nesses casos (CHAVES e PERES, 2003).

Para a redução da umidade com o objetivo de alcançar a meta de 10,5%, é pertinente investigar o desempenho do hidrociclone antecedente para que haja uma diminuição na quantidade de finos presentes na alimentação das peneiras e então, possivelmente haver a redução do teor de umidade do produto *sinter feed*. Bem como, avaliar a taxa de alimentação, pois a sobrecarga do equipamento pode ser um fator contribuinte para a umidade elevada, além de investigar outros parâmetros operacionais tais como: amplitude e frequência de operação, tipo de tela e inclinação.

5.3 Análise química

Após realizar a análise química das amostras, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Análises químicas das amostras realizadas por meio de fluorescência de raio X

Amostras	Fe (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO₂ (%)
AL	59,31	12,44	1,01	0,25	0,05	0,02	0,02	0,10
UF	62,13	10,23	0,61	0,16	0,04	0,02	0,04	0,08
OF	50,26	18,00	5,08	0,67	0,12	0,03	0,10	0,28
OS	62,96	8,79	0,76	0,19	0,05	0,02	0,04	0,09

Analisando os resultados das análises químicas (Tabela 5) observa-se que a amostra proveniente do *oversize* da peneira (OS), equivalente ao produto *sinter feed*, é composta, principalmente, por 62,96 %Fe e 8,76 %SiO₂. Diante disso, conclui-se que o produto está fora das especificações de qualidade quanto ao teor de sílica (%SiO₂), pois de acordo com as especificações da empresa o limite superior é de 6,3%. E, dentro das especificações quanto ao teor de ferro, apresentando 62,96 %Fe, ligeiramente acima do limite inferior que é 62,5%, e quanto aos demais componentes. A sílica é um material abrasivo, portanto seu excesso desse mineral pode ser um fator contribuinte para os eventos de rompimento das telas (Figura 18).

Outro ponto importante da análise da Tabela 5 é a presença de 50,26 %Fe no *overflow* (OF) dos hidrociclones. Essa fração muito fina, predominantemente composta por partículas menores que 0,15 mm, será destinada ao espessador de lamelas e, posteriormente, filtrada e disposta como rejeito. No entanto, o teor de ferro dessa parcela

é significativo, logo, seria interessante avaliar a possibilidade de retornar com esse fluxo de material para o processo, contudo é importante ressaltar que o teor de sílica é de 18 % e que há a possibilidade de sobrecarga no circuito.

5.4 Eficiência de separação por peneiramento

Utilizando o método aplicado na análise de eficiência de peneiramentos para o passante e o retido explicito na Equação 2 e na Equação 3, os resultados obtidos foram eficiência do passante igual a 4,86% e eficiência do retido igual a 39,49%, valores bastantes inferiores àqueles praticados industrialmente, que se situam na faixa de 80 e 90% (CORREIA, 2010). Entretanto, esses resultados de baixa eficiência para separação são esperados quando se trata de peneiras vibratórias horizontais aplicadas à função de desaguamento. Essa desvantagem quanto à baixa eficiência para separação por tamanhos, é a causa do sucesso como equipamentos desaguador (CHAVES, 2004).

5.5 Curvas de partição

Segundo Chaves (2002), as curvas de partição podem ser interpretadas como uma curva de probabilidades que as partículas têm de se direcionarem para um dos dois produtos. As curvas de partição, nesse caso, também representam a eficiência da peneira desaguadora em termos de recuperação de sólidos e a proporção da alimentação contida em cada uma das classes de tamanhos que é destinada ao *oversize*, parcela dos produtos que contém a maior quantidade de partículas grossas, objeto de estudo das curvas de partição aplicadas em peneiras.

O resultado apresentado na Figura 20, refere-se à curva de partição construída com base na metodologia descrita por Wills e Munn (2006).

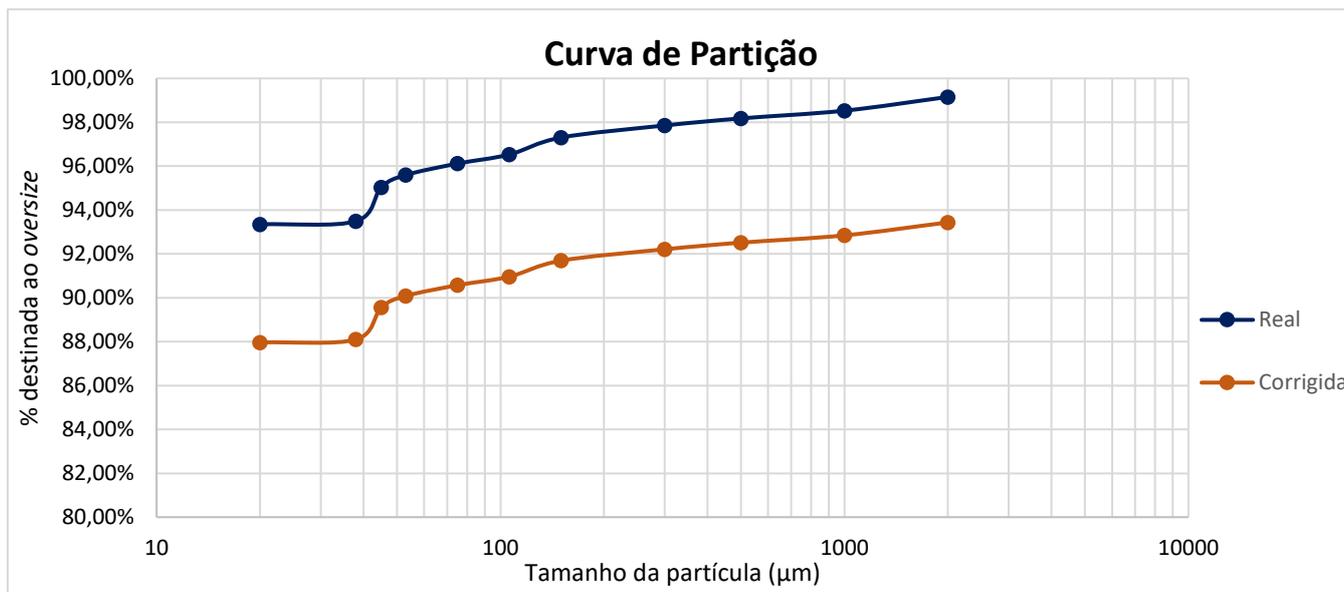


Figura 20 - Curva de partição real e corrigida

Ao analisar as curvas de partição real e corrigida (Figura 20), observa-se o efeito *by pass* para o *oversize*, isto é, partículas finas estão sendo direcionadas para a fração retida sem sofrer classificação. O efeito *by pass* também pode ocorrer no *undersize*, no entanto, os efeitos mais significativos são de partículas finas na parcela que se contém a maior parte de grossos. No caso estudado, parte do material a ser destinado ao *oversize* sem sofrer classificação não representa um problema, pois trata-se de um processo de desaguamento.

Observando a Figura 20 é possível perceber que não se trata de uma curva de partição típica esperada para hidrociclones ou peneiras, conforme mostrado na Figura 11 e na Figura 12. A curva está consideravelmente inclinada, o que de antemão já permite-se concluir que não possui alta eficiência enquanto equipamento separador de tamanhos, pois segundo Wills e Munn (2006) quanto mais vertical for a curva, melhor será o corte e maior será sua eficiência. No entanto, esse é um resultado conjecturado, pois trata-se de uma peneira desaguadora, ou seja, o equipamento não está exercendo uma função de classificação, mesmo que originalmente seja destinado para esse fim. Faz-se importante ressaltar que o resultado está de acordo com a posição de Valadão e Araújo (2007), de que uma operação por peneiras desaguadoras é proficiente quando a eficiência por peneiramento, ou seja, de acordo com sua separação por tamanhos, é muito baixa.

Ainda é possível constatar que como peneira desaguadora o equipamento tem um desempenho satisfatório. Ao analisar a curva é possível concluir que as partículas de até 300 μm , abertura da tela, variam entre 93,35% e 97,85% de probabilidade de serem destinadas ao *oversize*, o que indica alta porcentagem de retenção de sólidos.

A proporção da alimentação destinada ao *oversize*, calculada com base na Equação 6 se mostrou satisfatória, sendo igual a 97%. Ou seja, apenas 3% da alimentação é destinado ao *undersize*, que por sua vez retorna ao processo, logo não há perda de material. De acordo com a distribuição granulométrica da alimentação das peneiras (Figura 16) observa-se que a fração de material que apresenta maior quantidade de passante são as partículas entre a faixa de 20 e 45 μm .

Nesse trabalho não foi possível calcular parâmetros como o d_{50} , d_{25} e d_{75} e, conseqüentemente, a imperfeição (I) da curva de partição. Isso se deve ao fato de que todas as partículas presentes na amostra tem probabilidades maiores que 25%, 50% e 75% de se reportarem ao *oversize*, conforme exibido no gráfico das curvas de partição real e corrigidas (Figura 20).

6 CONCLUSÕES

Após a realização de experimentos e análises dos resultados obtidos, constata-se, para as condições estudadas, que:

- A peneira vibratória horizontal estudada exerce a função de equipamento desaguador com um desempenho satisfatório, sendo 97% da alimentação reportado ao *oversize*;
- O teor de umidade do produto desaguado é igual a 14,39%, estando acima da meta de 10,5%. Isso sugere que pode haver melhorias operacionais no equipamento e/ou em processos antecedentes;
- Métodos de análise de eficiência descritos majoritariamente para hidrociclones e peneira vibratórias inclinadas são aplicáveis para peneiras desaguadoras, no entanto, os resultados esperados são contrastantes àqueles aplicados para classificadores;
- Falhas ocasionadas nas telas das peneiras podem ser decorrentes da vazão de alimentação, granulometria e composição do material desaguado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIN, F.F; TRZASKOS, B.; ZAVAGLIA, G. 1999. **Geologia estrutural, mineralogia e texturas dos minérios de ferro da Mina de Casa de Pedra – CSN: Resultados Preliminares**. Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. 1999.

CARISSO, C.C.R. e CORREIA, G.C.J. Classificação e Peneiramento. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J.A. e DE ALMEIDA, M.L.S (Eds). **Tratamento de Minérios**. CETEM – MCT. Rio de Janeiro, 2004. p. 254 – 272.

CARVALHO, S. C. de; LUZ, J. A. M. da. Modelamento matemático de peneiramento vibratório (Parte 2): simulação. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 58, n. 2, p. 121-125, jun. 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672005000200005. Acesso em: 26 set. 2020.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Volume 2. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2004.

CHAVES, A.P. e PERES, A.E.C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Volume 3. São Paulo: Editora Signus, 2003.

CHAVES, A.P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Volume 1. São Paulo: Editora Signus, 2002.

CORREIA, G.C.J. Classificação e Peneiramento. In: LUZ, A.B, SAMPAIO, J.A e FRANÇA, A.C.S. (Eds). **Tratamento de Minérios**. CETEM – MCT. Rio de Janeiro, 2010.

DOMINGUES, G. M. **Peneiras de alta frequência para recuperação da fração +0,15 mm do rejeito da usina de manganês do azul**. 2019. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FERREIRA, D. H. O. **Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**. 2011. 50 f. Monografia (Especialização) -

Curso de Engenharia de Recursos Minerais, CEERMIN, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6GNJ/1/pdf__monografia__revisada__final__diego__26_07_2011.pdf. Acesso em: 29 de maio 2020.

FIGUEIRA, H.V.O.; LUZ, A.B.; ALMEIDA, S.L.M. de . Britagem e Moagem. In: LUZ, A.B, SAMPAIO, J.A e FRANÇA, A.C.S. (Eds). **Tratamento de Minérios**. CETEM – MCT. Rio de Janeiro, 2010.

FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: LUZ, A.B, SAMPAIO, J.A e FRANÇA, S.C.A. (Eds). **Tratamento de Minérios**. CETEM – MCT. Rio de Janeiro, 2010.

GUERREIRO, F. S. **Estudo experimental do peneiramento vibratório em batelada de suspensão diluída de rocha fosfática: determinação do teor de umidade de material retido, eficiência granulométrica e diâmetro de corte**. 2015. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

KELSALL, D.F. **A further study of the hydraulic cyclone**. Chemical Engineering Science, Volume 2, 1953.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: LUZ, A. B. da *et al* (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT 2010. p. 3-18.

LUZ, J. A. M. da; CARVALHO, S. C. de. Modelamento matemático de peneiramento vibratório (Parte 1): dimensionamento clássico. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 58, n. 1, p. 57-60, mar. 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672005000100010&script=sci_arttext. Acesso em: 26 set. 2020.

METSO. **Manual de Britagem Metso**. 6ª Edição. 2005. p.501.

MONTENEGRO, L.C.M; GALERY, R.; VALADÃO, G.E.S.; Separação por Tamanho. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. (Orgs). **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

NUNES, A. L. **Modelagem e simulação do circuito de moagem da Votorantim Metais Zinco Morro Agudo**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-14062013142637/publico/Dissertacao_Andreia.pdf. Acesso em: 17 abr. 2020.

RAO, D. V. S. **Mineral Beneficiation: A Concise Basic Course**. Andhra Pradesh, Índia: CRC Press, 2011.

REIS, J. L. M. **Eletroperfilagem do desaguamento de granéis**: volume I. 2016. 227 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

RIBEIRO, E.Q. **Caracterização Tecnológica do Itabirito Pobre Compacto – “IPC” da Minas Casa de Pedra**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F.A.N.G da. Determinação das densidades de sólidos e polpas. In: SAMPAIO, J. A. *et al.* **Tratamento de Minérios: Práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 3-53.

SILVA, J. P. da. **Caracterização dos Hidrociclones utilizados nas etapas de classificação dos concentradores I e II da Samarco Mineração**. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SOUZA, N. A. F. **Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos**. 2010. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:

<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003574.pdf>. Acesso em: 22 maio 2010.

TEIXEIRA, H. G. **Desenvolvimento de um sistema para dimensionamento, análise e otimização de circuitos de preparação de minérios**. 2013. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

VIMAX. **Telas de borracha para Peneiras Vibratórias**. Disponível em: <https://silo.tips/queue/telas-de-borracha-para-peneiras-vibratorias-vimax?&queue_id=-1&v=1601562613&u=MTY4LjIwNS4yMjUuNjg=/>.

WILLS, B.A. e NAPIER-MUNN, T.J. **Wills' Mineral Processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral**. 7th ed. Amsterdam: Elsevier Science and Technology Books, 2006.

APÊNDICE A – Tabelas de distribuição granulométrica

Distribuição granulométrica do *underflow* dos ciclones

UNDERFLOW CICLONE				
Malha (μm)	Massa (g)	% Ret. simples	% Ret. Ac.	%Pass. Ac.
2.200	0,0	0,00	0,00	100,00
2.000	5,1	1,00	1,00	99,00
1.000	43,3	8,48	9,48	90,52
500	80,0	15,67	25,15	74,85
300	67,2	13,16	38,31	61,69
150	123,0	24,09	62,40	37,60
106	51,1	10,01	72,41	27,59
75	50,0	9,79	82,21	17,79
53	29,0	5,68	87,89	12,11
45	11,0	2,15	90,04	9,96
38	9,5	1,86	91,90	8,10
20	3,4	0,66	92,56	7,44
-20	38,0	7,44	100,00	0,00
TOTAL	510,6	100,00		

Distribuição granulométrica do *underflow* dos ciclones

OVERSIZE PENEIRA DESAGUADORA - Dia 02				
Malha (μm)	Massa (g)	% Ret. simples	% Ret. Ac.	%Pass. Ac.
2.200	0,0	0,00	0,00	100,00
2.000	3,6	0,84	0,84	99,16
1.000	47,3	11,00	11,83	88,17
500	74,4	17,30	29,13	70,87
300	71,0	16,51	45,64	54,36
150	109,0	25,34	70,98	29,02
106	36,4	8,46	79,45	20,55
75	33,0	7,67	87,12	12,88
53	20,0	4,65	91,77	8,23
45	7,0	1,63	93,40	6,60
38	6,4	1,49	94,88	5,12
20	5,0	1,16	96,05	3,95
-20	17,0	3,95	100,00	0,00
TOTAL	430,1	100,00		