



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

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

**PENEIRAS DE ALTA FREQUÊNCIA PARA RECUPERAÇÃO DA FRAÇÃO +
0,15 MM DO REJEITO DA USINA DE MANGANÊS DO
AZUL**

Geovar Miranda Domingues

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
PORTO ALEGRE



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Março, 2019

**PENEIRAS DE ALTA FREQUÊNCIA PARA RECUPERAÇÃO DA FRAÇÃO +
0,15 MM DO REJEITO DA USINA DE MANGANÊS DO
AZUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Prof.^a Dra. Vlândia Cristina Gonçalves de Souza.

Linha de Pesquisa: Tecnologia Mineral e Ambiental.

Geovar Miranda Domingues

PORTO ALEGRE



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Março, 2019

**PENEIRAS DE ALTA FREQUÊNCIA PARA
RECUPERAÇÃO DA FRAÇÃO + 0,15 MM DOREJEITO DA USINA DE
MANGANÊS DO AZUL.**

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

Aprovada em 26 de fevereiro de 2019.

Banca Examinadora:

Dr. Raul Oliveira Neto

-Minerar Consultoria e Projetos Em Mineração Meio Ambiente

Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues

-Departamento de Engenharia de Minas- DEMIN - UFRGS

Dr. Neymayer Pereira Lima

Desenvolvimento de Projetos de Tratamento de Minérios – Vale S.A

Orientadora:

Prof.^a Dra. Vlória Cristina Gonçalves de Souza

-Departamento de Engenharia de Minas- DEMIN - UFRGS

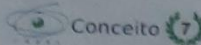


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM



minas
metalúrgica
materiais

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA



ATA Nº 1496

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ao vigésimo sexto dia do mês de fevereiro de 2019, às dez horas, na Sala 126 do Prédio 43427 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, realizou-se a defesa da Dissertação de Mestrado Acadêmico de **Geovar Miranda Domingues**, intitulada "**Peneiras de Alta Frequência para Recuperação da Fração + 0,15mm do Rejeito da Usina de Manganês do Azul**". A Comissão Examinadora, presidida pela orientadora do candidato, Profa. Dra. Vlândia Cristina Gonçalves de Souza (PPGE3M/UFRGS), constituiu-se dos seguintes membros: Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues (PPGE3M/UFRGS), Dr. Raul Oliveira Neto (Minerar Consultoria) e Dr. Neymayer Pereira Lima (VALE). Após a apresentação do candidato pela Presidente da Comissão, o mesmo expôs seu trabalho de Dissertação, sendo logo a seguir, arguido pelos membros da Comissão Examinadora. O candidato prestou esclarecimentos sobre sua Dissertação, respondendo às perguntas formuladas. Às 11 horas e 10 minutos, a Comissão Examinadora procedeu ao julgamento do trabalho. Consultados individualmente, os membros da Comissão Examinadora justificaram e emitiram os seguintes pareceres: Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues aprovado, Dr. Raul Oliveira Neto aprovado e Dr. Neymayer Pereira Lima aprovado. Desta forma e de acordo com o regimento interno do PPGE3M a Dissertação foi aprovada e considerada adequada para a concessão do título de "**Mestre em Engenharia – Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa**". O candidato deve efetuar as correções indicadas pelos examinadores dentro do prazo regimental. A professora Vlândia Cristina Gonçalves de Souza agradeceu aos membros da Comissão Examinadora pela presença e colaboração recebida quando foi lida a presente Ata, que vai assinada por todos os membros da Comissão Examinadora, orientadora e aluno.

Profa. Dra. Vlândia Cristina Gonçalves de Souza

Dr. Raul Oliveira Neto

Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues

Dr. Neymayer Pereira Lima

Geovar Miranda Domingues



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

RESUMO

Esta dissertação está baseada na expectativa de reduzir a perda de minério de manganês no rejeito final, na fração +0,15 mm na Usina de Manganês do Azul (Vale S.A.) situada na Floresta Nacional de Carajás – Parauapebas-Pará, Brasil. Devido ao consumo expressivo das reservas de litologias nobres, e aos 31 anos de exploração da mina, já era prevista uma queda significativa na produção a partir de 2018. Neste contexto, foi proposto recuperar parte da fração +0,15 mm que estava sendo descartada para a barragem de rejeitos, utilizando peneiras vibratórias de alta frequência que fossem capazes de processar o rejeito final.

Palavras-chave: Peneiramento de alta frequência, Barragem de Rejeito, Rejeito, Minério de Manganês, Manganês do Azul, Depósito do Azul.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

ABSTRACT

This dissertation is based on the expectation of reducing the loss of manganese ore in the final reject, in the fraction of +0.15 mm in the Azul mining complex (Vale S.A.) plant located in the Carajás National Forest – Parauapebas - Pará, Brazil. Due to the significant consumption of noble lithology reserves, and to the 31 years of mine exploitation, it was expected a significant drop in production from 2018 onwards. In this context, it was proposed to recover part of the fraction +0.15 mm (which was being discarded into tailings dam), applying high frequency vibrating screens that were capable to process the final tailing.

Keywords: High frequency screen, Tailing Dam, Tailing, Manganese Ore, Azul Manganese, Azul Deposit.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Superfície de peneiramento.	21
Figura 2: Tela.....	22
Figura 3: Crivo	22
Figura 4: Padrões geométricos das aberturas.....	23
Figura 5: Grelha fixa.....	24
Figura 6: Grelha fixa inclinada.	24
Figura 7: Grelha móvel.	25
Figura 8: Grelha vibratória com crivo de finos.....	25
Figura 9: Grelha de barras in situ.	26
Figura 10: Peneira vibratória.....	26
Figura 11: Peneiras vibratórias inclinadas.	27
Figura 12: Peneira vibratória.....	27
Figura 13: Movimentos das partículas nas peneiras.	28
Figura 14: Estratificação e separação das partículas.....	29
Figura 15: Peneira vibratória horizontal.	31
Figura 16: Peneira DSM.	31
Figura 17: Esquema das peneiras tipo banana.....	33
Figura 18: Peneiras moduladas ou banana	34
Figura 19: Peneira Banana	35
Figura 20: Peneiras moduladas de três decks.....	35
Figura 21: Peneiras rotativas (Trommel).....	36
Figura 22: Classificação das peneiras rotativas.....	37
Figura 23: Peneiras rotativas em moinhos SAG (semi autógeno).....	37



Figura 24: Peneira desaguadora	38
Figura 25: Esquema das desaguadoras.	39
Figura 26: Peneira desaguadoras.....	40
Figura 27: Stack sizers -Mina de ferro no Brasil.....	42
Figura 28: Stack sizers (estante de cinco decks).	43
Figura 29: Stack sizers vista de cima in loco.....	43
Figura 30: Princípios de operação da Stack Sizer.	44
Figura 31: Curvas de partição.....	49
Figura 32: Regiões chaves no peneiramento.	52
Figura 33: Mecanismos de peneiramento.....	53
Figura 34: Comportamento individual das partículas.....	56
Figura 35: Localização, Província Mineral de Carajás.	73
Figura 36: Imagens da Mina de Manganês do Azul.....	74
Figura 37: Dados de produção	75
Figura 38: Fluxo Operacional do Manganês do Azul.	75
Figura 39: Geologia da Província Mineral de Carajás	78
Figura 40: Minas do Azul, Mosaico (2002)	78
Figura 41: Minas e Barragem do Azul.	79
Figura 42: Região de Carajás, Imagem de satélite.	79
Figura 43: Distribuição do ROM por litologia	80
Figura 44: Pontos de amostragem.....	82
Figura 45: Local de amostragem do rejeito final.....	83
Figura 46: Dados de densidade de polpa	84
Figura 47: Dados do percentual de sólidos.....	84



Figura 48: Dados da alimentação do 1º deck	86
Figura 49: Dados da amostra do oversize do 1º deck.....	86
Figura 50: Dados da amostra da alimentação do 2º deck	87
Figura 51: Dados da amostra do oversize do 2º deck.....	88
Figura 52: Dados da amostra da alimentação do 3º deck.....	89
Figura 53: Dados da amostra do oversize do 3º deck.....	89
Figura 54: Dados da amostra da alimentação do 4º deck.....	90
Figura 55: Dados da amostra do oversize do 4º deck.....	90
Figura 56: Dados da amostra da alimentação do 5º deck.....	91
Figura 57: Dados da amostra do oversize do 5º deck.....	92
Figura 58: Percentual de partículas + 0,15 mm no rejeito	93
Figura 59: Teores de Manganês no rejeito.....	93
Figura 60: Exemplo dos dados de entrada (input).....	99
Figura 61: Modelagem e simulação (validação) do deck 1.....	99
Figura 62: Modelagem e simulação (validação) do deck 1.....	100
Figura 63: Curvas de eficiência de peneiramento.....	101
Figura 64: Passo a passo no ModSim.....	102
Figura 65: Passo a passo no ModSim.....	102
Figura 66: Passo a passo no ModSim.....	102
Figura 67: Passo a passo no ModSim.....	103
Figura 68: Passo a passo no ModSim.....	103
Figura 69: Passo a passo no ModSim.....	103
Figura 70: Passo a passo no ModSim.....	120



Figura 71: Passo a passo no ModSim.....	104
Figura 72: Passo a passo no ModSim.....	104
Figura 73: Passo a passo no ModSim.....	105
Figura 74: Passo a passo no ModSim.....	105
Figura 75: Visualizando resultados.....	106
Figura 76: Passante acumulado da alimentação.....	109
Figura 77: Passante acumulado do oversize.....	110
Figura 78: Passante acumulado do undersize.....	110
Figura 79: Eficiência Global simulada.....	111
Figura 80: Curva de alimentação do deck 1.....	111
Figura 81: Eficiência do undersize do deck 1.....	112
Figura 82: Eficiência do global do deck 1.....	112
Figura 83: Eficiência global do deck 2.....	113
Figura 84: Curva de alimentação do deck 2.....	113
Figura 85: Somente desaguadora (dewater).....	114
Figura 86: Somente peneira (Stack Sizer).....	114
Figura 87: Stack Sizer + Dewater.....	114
Figura 88: OS para as simulações 1, 2 e 3.....	116
Figura 89: Curvas de eficiência de recuperação.....	117
Figura 90: Comparação entre dewater e stack sizer.....	118
Figura 91: Somente desaguadora.....	118
Figura 92: Stack Sizer e desaguadora.....	119
Figura 93: Stack Sizer, dewater e Feed "mais fina"	120
Figura 94: ModSim Version 3.6.....	120
Figura 95: Somente dewater com Feed "mais fina"	120



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Figura 96: Parâmetros do modelo usado para desaguadora.....121

Figura 97: Granulometria Desaguadora e Stack Sizer.....122



LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de peneiras vibratórias e inclinações.....	29
Tabela 2: Fator de capacidade K8	66
Tabela 3: Fator de capacidade K10	67
Tabela 4: Reserva do Azul	80
Tabela 5: Dados das litologias, ROM e produtos.	81
Tabela 6: Dados da mina de Manganês da Vale.....	81
Tabela 7: Resultados químicos, recuperação mássica e metalúrgica.	85
Tabela 8: Dados do 1º deck.....	87
Tabela 9: Dados do 2º deck.....	88
Tabela 10: Dados do 3º deck.....	89
Tabela 11: Dados do 4º deck.....	91
Tabela 12: Dados do 5º deck.....	91
Tabela 13: DGs da alimentação, oversize e rejeito	94
Tabela 14: Dados do circuito da usina de Manganês do Azul	107
Tabela 15: Dados de produção com Stack Sizer	107
Tabela 16: Dados de produção sem Stack Sizer..	108
Tabela 17: Dados do projeto.....	109
Tabela 18: Resultados da Simulação	113



LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

USGS – *United States Geological Survey*;

DGs – Distribuição granulométrica;

ROM – *Run of Mine*;

REM – Relação estéril e minério;

DSM – *Dutch State Mines*;

SAG – Semi autógeno;

Mt – Milhões de toneladas;

FOB – *Free on Board*;

RPM – Rotação por minuto;

GADON – Gerência de Área de Desenvolvimento, Otimização de Processo, Norte –
VALE S/A;

TBN – Taxa com umidade natural;

HT – Horas trabalhadas;

DF – Disponibilidade física;

UT – Utilização física;

RM – Rendimento mássico;

PAC – Passante acumulado;

MR – Massa recuperada;

DWSC – *DeWatering Screen*;

SCRN – *Single-deck vibrating screen*;

SCR1 - *Single-deck vibrating screen (Software ModSim)*;



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

dmtu – *dry metric tons unit*;

JKMRC – *Julius Kruttschinnit Mineral Research Centre*;

CTt – Capacidade teórica de transmissão de peneiramento;

Fm – Fatores modificadores;

t/h – Tonelada métrica por hora;

t -Tonelada métrica;

OS – *Oversize*;

US – *Undersize*;

I_U – Capacidade unitária básica;

d_{pi} – Tamanho geométrico na classe i;

K - Fator de redução;

Ret – Retido;

E_u – Eficiência de *undersize*;

Hz – Hertz;

p.p – Ponto percentual;

ft – Pés;

μm - *Micrômetros*;

α – Alfa (ângulo de inclinação em graus);

#- *Mesh*;

π – Pi;

” – Polegada.



SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Importância da pesquisa	17
1.2.	Objetivos	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1.	Introdução ao peneiramento	20
2.2.	Equipamentos utilizados no peneiramento	21
2.2.1.	Grelhas	23
2.2.2.	Peneiras vibratórias	26
2.2.3.	Peneiras Moduladas	32
2.2.4.	Peneiras rotativas (trommel)	36
2.2.5.	Desaguadoras	38
2.2.6.	Peneiras Stack Sizers	41
2.3.	Quantificação do Processo	46
2.4.	Mecanismo do peneiramento	51
2.4.1.	Comportamento coletivo	51
2.4.2.	Comportamento individual das partículas	54
2.5.	Fatores que afetam o peneiramento	56
2.5.1.	Termos Básicos do peneiramento	57
2.6.	Modelagem e simulação	59
2.7.	Dimensionamento dos Equipamentos	61
2.8.	Fatores modificadores e equacionamento	63
2.8.1.	Eficiência de transmissão	67



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

2.9.	Estudos de casos com Stack Sizers	69
2.9.1.	Estudo de caso 1	69
2.9.2.	Estudo de caso 2	70
2.9.3.	Estudo de caso 3	70
2.9.4.	Estudo de caso 4	71
2.10.	Escrubagem	72
3.	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	73
3.1.	Localização da jazida e da usina	73
3.2.	Geologia Regional	76
3.3.	Geologia Local	77
4.	METODOLOGIA	82
4.1.	Amostragens	82
4.2.	Modelagem e simulação	95
5.	RESULTADOS	107
5.1.	Resultados da modelagem e simulação	108
6.	CONCLUSÕES	123
7.	REFERÊNCIAS	125

1. INTRODUÇÃO

O manganês é o quarto metal mais utilizado no mundo, e sua utilização é peça chave para a fabricação de diversos tipos de aço. O manganês residual aumenta a dureza e resistência dos aços de baixo carbono. Na fabricação dos aços conhecidos como manganês austeníticos, com elevada dureza superficial, o manganês atua como elemento de liga. Na fabricação das ferramentas o manganês atua como elemento que melhora a temperabilidade do aço. Na produção dos aços de fácil usinagem o manganês é associado ao enxofre.

Portanto a demanda por manganês está diretamente ligada ao consumo de aço global. A comercialização do manganês depende de suas características químicas e físicas (teores e granulometria), correspondente ao teor de manganês contido e as suas impurezas, sendo as mais significativas a sílica e a alumina.

Com o crescimento da demanda de aço na última década houve também o aumento da demanda por manganês e isto resultou na aceleração da exaustão das jazidas compostas por litologias nobres de alto teor, e com isto, algumas usinas tiveram que buscar alternativas para viabilizar o aproveitamento de reservas com litologias menos nobres como é o caso dos pelitos tabular e pelito siltitos.

O trabalho que será apresentado foi desenvolvido como sendo uma das alternativas que precisarão ser implantadas para a continuidade da operação da Mina de Manganês do Azul.

1.1. Importância da pesquisa

O manganês está presente no dia-a-dia das pessoas, juntamente com o aço ele é utilizado na fabricação dos carros, na construção civil e em diversos setores. Isto explica por que cerca de 90% de todo manganês consumido anualmente no mundo vai para siderúrgicas como elemento de liga.

De acordo com a USGS (United States Geological Survey 2018)¹ a reserva mundial de manganês é estimada em torno de 680Mt de minério ROM (Run of Mine), distribuídas nos seguintes países: África do Sul, com 200Mt; Ucrânia, com 140Mt; Brasil com 120Mt e Austrália com 94Mt. O aumento nos valores das reservas brasileiras em relação aos anos anteriores foi provocado pela reavaliação de reservas, principalmente,

àquelas localizadas no estado do Pará, Brasil. A produção mundial em 2017 foi liderada pela China e África do Sul com mais de 2 milhões de concentrado (Brasil e Gabão tiveram uma produção representativa com cerca de metade destes).

Este trabalho foi elaborado na usina de tratamento de Manganês do Azul situada na Floresta Nacional de Carajás – Parauapebas - Pará, norte do Brasil. A usina de Manganês do Azul, até 2015, foi alimentada com litologias consideradas nobres: “Maciço Metalúrgico”, “Maciço Químico”, “Pelito Rico”, “Detríticos” e “Pelito Tabular” e, com isto, produzia (cerca de 1,7Mt/ano). Devido ao consumo expressivo das reservas de litologias nobres, e aos 31 anos de exploração da Mina do Azul, já era prevista uma queda na produção.

Diante desta situação, foi necessário pensar em alternativa para evitar que a Mina de Manganês do Azul se tornasse inviável. A partir desta realidade surgiu a ideia de recuperar parte da fração +0,15 mm que estava sendo descartada para o rejeito destinado à barragem do Azul. A decisão de recuperar apenas as frações + 0,15mm é justificada pelo alto percentual de sílica existente nas frações inferiores a 0,15 mm. Ou seja, buscar recuperar partículas menores do que 0,15 mm iria impactar negativamente a qualidade do produto final. Foi concebido então um projeto de um peneiramento em alta frequência que fosse capaz de processar todo o rejeito final da usina.

Este trabalho buscou definir junto com a equipe de operação, de manutenção e de processo o melhor circuito e a especificação das peneiras de alta frequência a serem utilizadas neste projeto.

1.2. Objetivos

O trabalho tem como objetivo principal verificar os ganhos de recuperação em massa obtidos com a implantação de peneiras de alta frequência nos circuitos de rejeito de Manganês do Azul.

Constam como objetivos específicos do trabalho:

- Descrever e analisar o circuito de tratamento de minérios da Usina de Manganês do Azul, com ênfase no circuito de rejeito, antes e depois da instalação das peneiras novas;

- Descrever e analisar o projeto de adequação do circuito de rejeito: o dimensionamento / simulação de desempenho das peneiras inclinadas de alta frequência do tipo Stack Sizers de acordo com o fabricante;

- Apresentar os efeitos das estratégias utilizadas na implantação do projeto para não prejudicar a produção orçada para 2016 e 2017.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução ao peneiramento

De acordo com Luz et al.(2010), o peneiramento é um processo mecânico que faz a separação de partículas através de sua passagem ou de sua retenção por uma superfície, que é uma malha de aço, borracha ou poliuretano normalmente.

No peneiramento a úmido adiciona-se água ao material a ser peneirado com o propósito de facilitar a passagem dos finos através da tela de peneiramento.

No beneficiamento mineral, são objetivos fundamentais das etapas de peneiramento:

- realizar o “escalpe” (remover parte do material fino alimentado e, assim, reduzir a quantidade de material que chega a um britador ou moinho, evitando que seja consumida energia e peças sem necessidade com este material, que já estaria abaixo do tamanho necessário para ir a próxima etapa do processo);
- realizar o “escalpe” (remover parte do material grosseiro alimentado e, assim, reduzir a quantidade de material que chega à malha de classificação final ou malha de corte) e, enfim,
- classificar o material para obter um produto dentro de uma faixa granulométrica específica, separando os finos dos grossos em função do tamanho de “corte” do material, visando a sua posterior concentração.

A Figura 1 ilustra uma superfície de peneiramento: o material que não passa pelas aberturas é chamado de “oversize” (retidos ou grossos) e o material que passa pelas aberturas, chama-se de “undersize” (abaixo do tamanho, passante ou “finos”).

Além dos objetivos citados anteriormente, esta operação pode servir para deslamagem: retirada da água do material para estocar em barragens (caso de rejeitos de usina de beneficiamento, por exemplo) ou em função de quaisquer outros processos subsequentes à concentração mineral.

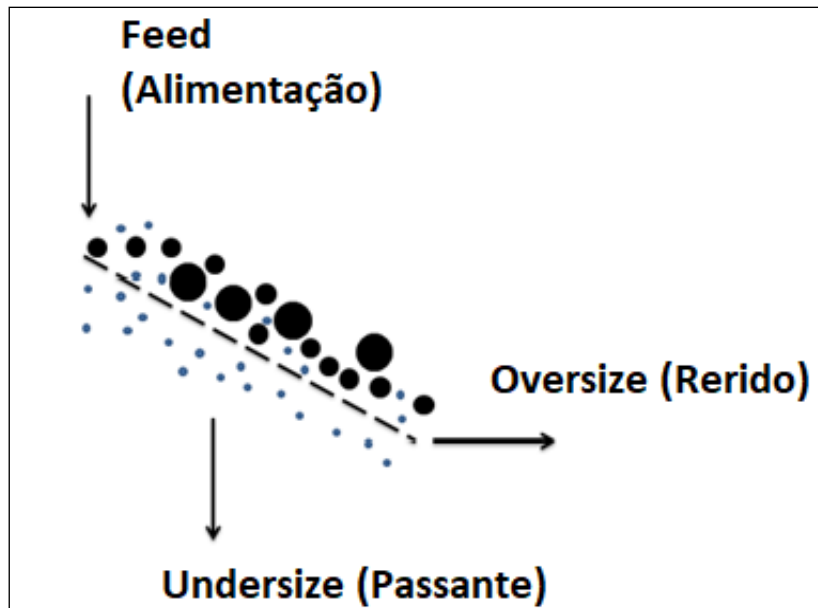


Figura 1: Superfície de peneiramento.

Fonte: Jesus et al. (2015)

Os peneiramentos industriais em umidade natural são realizados, normalmente, em frações granulométricas de até 6 mm. Entretanto, é possível peneirar em umidade natural com eficiência razoável em frações de até 1,7 mm. A úmido, o peneiramento industrial é normalmente aplicado para até 0,4 mm, mas, recentemente tem sido possível peneirar partículas mais finas, da ordem de 50 μm (CARRISSO; CORREIA, 2004).

2.2. Equipamentos utilizados no peneiramento

Os equipamentos utilizados no peneiramento podem ser divididos em três tipos: grelhas, crivos e telas.

As grelhas são constituídas por barras metálicas dispostas paralelamente, mantendo um espaçamento regular entre si.

Os crivos são formados por chapas metálicas planas ou curvas, perfuradas por um sistema de furos de várias formas e dimensão determinada (Figura 2).

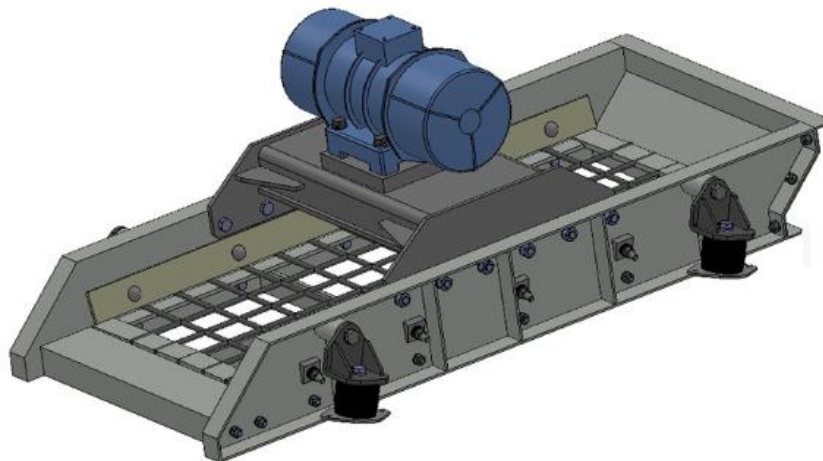


Figura 2: Tela

Fonte: ERALKI (2018)

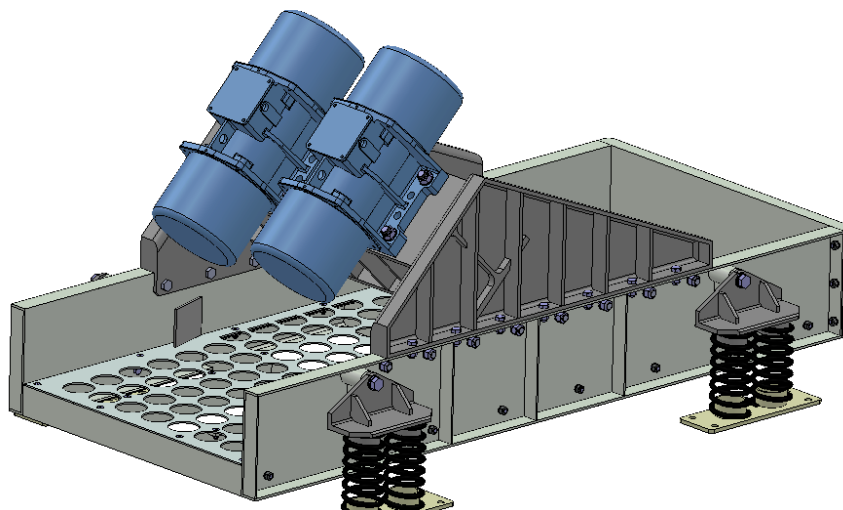


Figura 3: Crivo

Fonte: ERALKI (2018)

As telas são 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 (Figura 4).

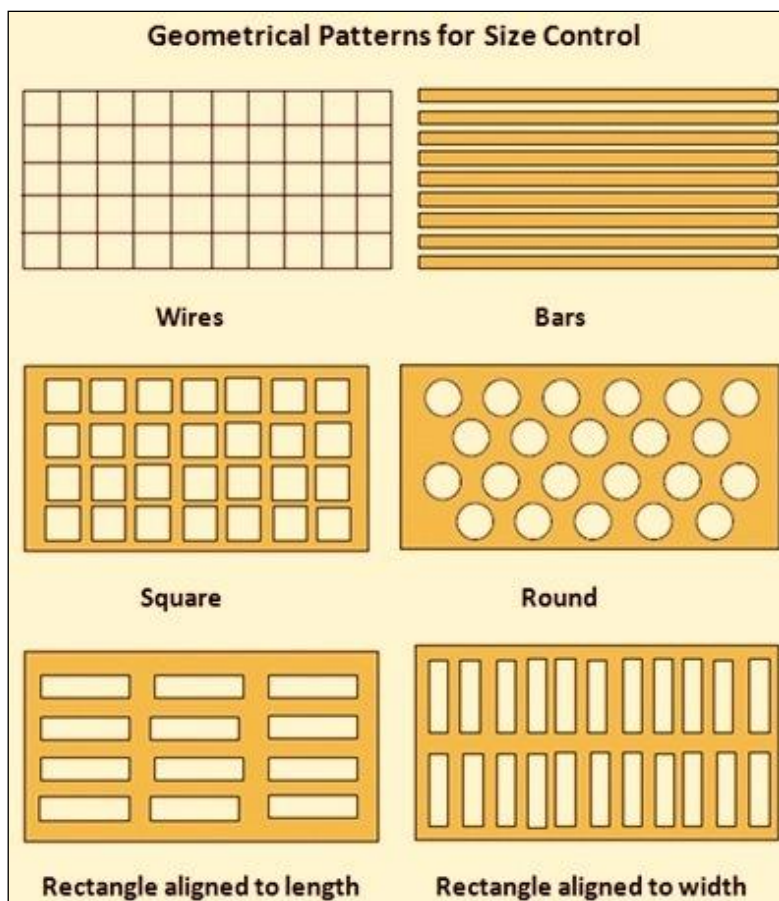


Figura 4: Padrões geométricos das aberturas.

Fonte: SHAH, K. P. (2018)

As telas também podem ter aberturas de formas diversas e serem constituídas de outros materiais, tais como poliuretano, ou ainda, serem estes furos abertos em chapa metálica.

Ainda, estes equipamentos podem ser classificados de acordo com o seu movimento, em duas categorias: “fixas” e “móveis”.

2.2.1. Grelhas

Nas peneiras ou grelhas “fixas”, a única força atuante é a força de gravidade e por isso esses equipamentos possuem superfície inclinada.

As grelhas fixas consistem de um conjunto de barras paralelas espaçadas por um valor pré-determinado e inclinadas na direção do fluxo da ordem de 35° a 45° (Figuras 5 e 6). São empregadas basicamente em circuitos de britagem para separação de blocos em

geral, sendo utilizadas invariavelmente em umidade natural. Sua eficiência é normalmente baixa (60%), porque não havendo movimento da superfície não ocorre a estratificação, que facilita a separação.

Um valor aproximado para a capacidade das grades é de 100 a 150 t de material por pé quadrado de área em 24h, quando as barras estão distantes entre si de 2,54 cm (CORREIA, 2004).

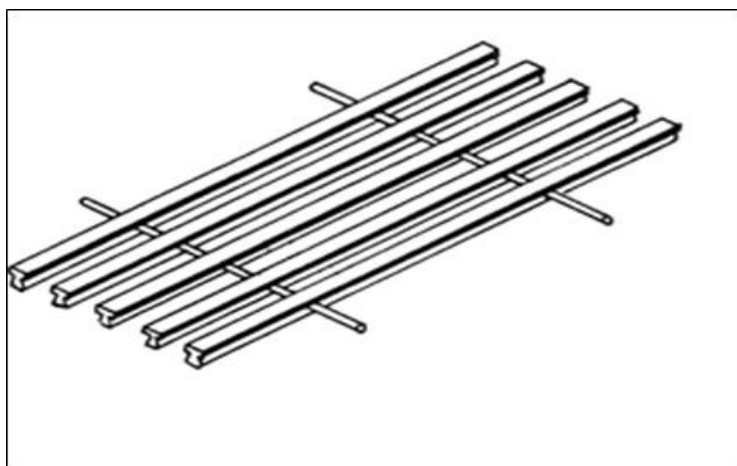


Figura 5: Grade fixa.

Fonte: Luz et al. (2010)

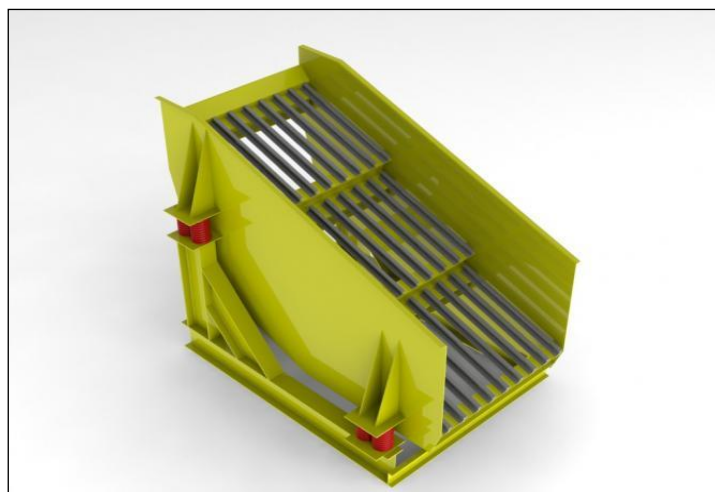


Figura 6: Grade fixa inclinada.

Fonte: SHAH, K. P. (2018)

As grades móveis podem ser vibratórias e semelhantes às grades fixas, mas sua superfície está sujeita a vibração (Figura 7). São utilizadas antes da britagem primária

(onde se utiliza britadores de mandíbulas) para a retirada de grande parte do material da alimentação com dimensões geralmente inferiores a 100 mm.

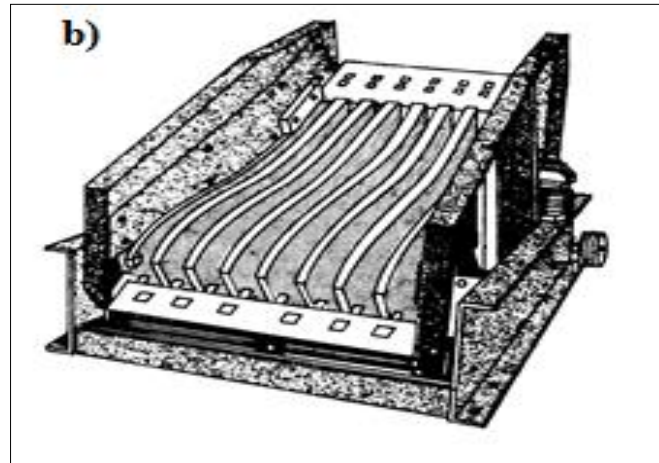


Figura 7: Grelha móvel.

Fonte: Luz et al. (2010)

A retirada do material “fino” pela grelha vibratória evita a presença deste na câmara de britagem. Vale ressaltar que a existência de materiais finos na câmara de britagem, reduz de forma significativa o desempenho do britador, uma vez que o material “fino” dificulta o impacto da mandíbula móvel sobre os blocos a serem britados (Figuras 8 e 9).



Figura 8: Grelha vibratória com crivo de finos.

Fonte: C & B Due (2018)



Figura 9: Grelha de barras in situ

Fonte: C & B Due (2018)

2.2.2. Peneiras vibratórias

Estas peneiras são as de uso mais frequente em mineração, sendo muito empregadas nos circuitos de britagem e de preparação de minério para os processos de concentração.

A Figura 10 é de uma peneira vibratória com movimento circular, duas linhas de vibradores.



Figura 10: Peneira vibratória

Fonte: Zlequipamentos (2017)

As peneiras vibratórias inclinadas são constituídas por um chassi robusto, apoiado em molas, um mecanismo acionado do movimento vibratório e um, dois ou três suportes para as telas (*decks*) - Figuras 11 e 12.

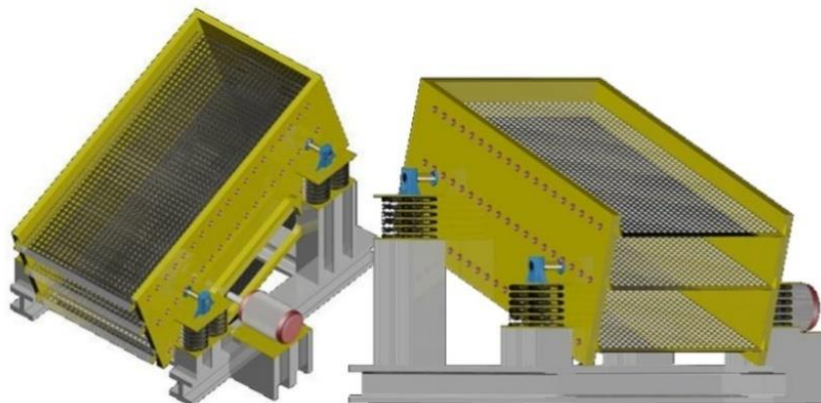


Figura 11: Peneiras vibratórias inclinadas.

Fonte: REIS, 2016



Figura 12: Peneira vibratória.

Fonte: *Mining Operating Training* (2018)

Quando são peneiradas, numa malha de abertura pequena, partículas de tamanho muito variável (“de grandes a pequenas”), é necessário colocar acima dela um *deck* de alívio ou proteção, com uma tela grossa e forte. Esta tela mais pesada recebe todo o impacto e esforço mecânico das partículas maiores, protegendo e aliviando tela de peneiramento. Ao final, os *oversize* das duas telas são reunidos, gerando um único produto.

O movimento vibratório é caracterizado por impulsos rápidos, normais à superfície, de pequena amplitude (1,5 a 25 mm) e de alta frequência (600 a 3.600 movimentos por minuto), sendo produzidos por mecanismos mecânicos ou elétricos (Figura 13).

As peneiras vibratórias podem ser divididas em duas categorias: aquelas em que o movimento vibratório é praticamente retilíneo, num plano normal à superfície de peneiramento (peneiras vibratórias horizontais “comuns”); e aquelas em que o movimento é circular ou elíptico neste mesmo plano (peneiras vibratórias inclinadas) - Figura 13.

Estes movimentos provocados pela vibração levam à formação de um leito estratificado sobre as telas: as partículas maiores são levadas ao topo do leito e as menores para o fundo até que passem pelas aberturas.

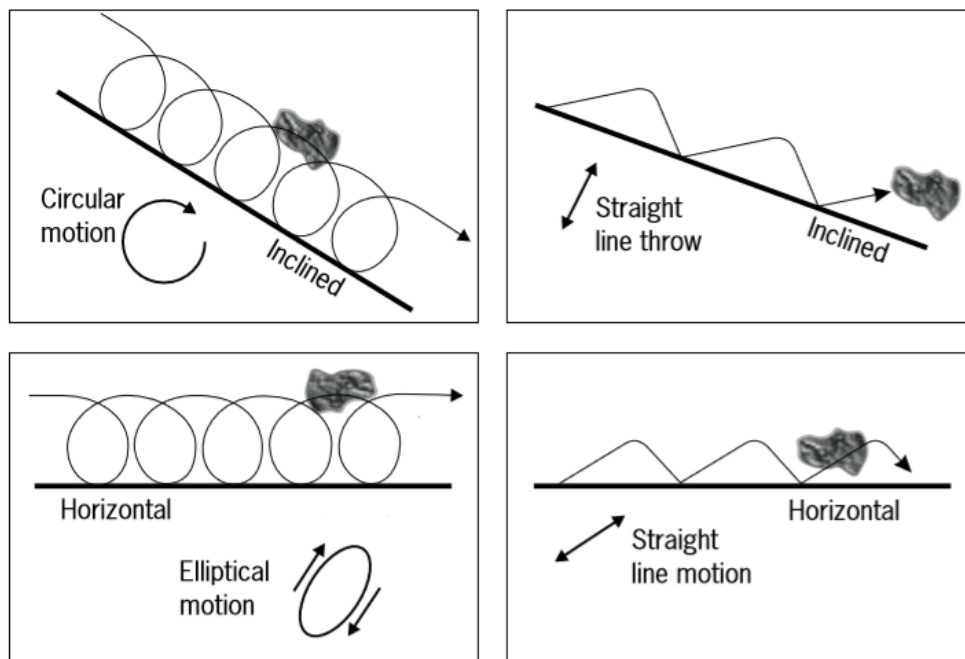


Figura 13: Movimentos das partículas nas peneiras.

Fonte: *Basics in Minerals Processing, Metso, 2016*

O processo das partículas passarem ou não pelas aberturas conforme seu tamanho com respeito à malha pode ser descrito de forma probabilística (Figura 14).

As peneiras vibratórias inclinadas têm inclinações que variam de 15° a 35° e transportam o material do leito a uma velocidade de 18 a 36 m/min, dependendo da inclinação. As peneiras horizontais transportam material a velocidade de 12 m/min.

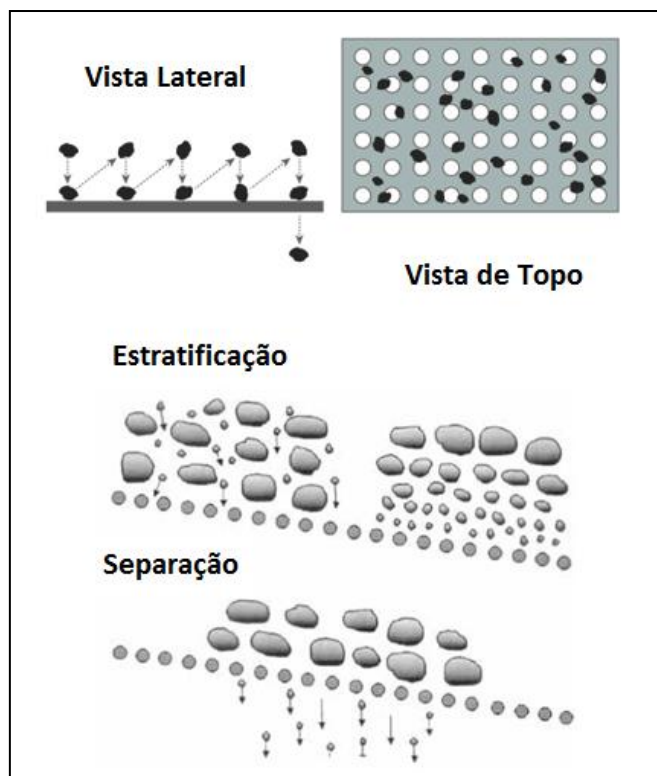


Figura 14: Estratificação e separação das partículas.

Fonte: Adaptado de SHAH, K. P. (2018).

Estas inclinações são em função da malha de abertura: quanto maior a malha, maior o ângulo de inclinação. Ainda, a Tabela 1 mostra as faixas de velocidade do leito de *oversize* sobre o *deck* de peneiramento de acordo com o equipamento.

Tabela 1: Tipos de peneiras vibratórias e inclinações

Tipos de peneiras vibratórias e inclinações	
TIPO	V (M/MIN)
Horizontal	dez/15
Inclinada, 20° (classificação grosseira)	30-35
Inclinada, 20° (classificação final)	25-30
Banana (Séries CBS)	Início 45-descarga 25
Banana, alta inclinação	Início 60-descarga 20-30

Fonte: Metso (2005)

A importância da inclinação do *deck* é que a altura do leito sobre ele varia com a inclinação (Chaves e Peres, 2012). As peneiras vibratórias inclinadas têm um movimento

vibratório circular que faz as partículas serem lançadas para cima e para frente, de modo que possam se apresentar à tela várias vezes, sempre sobre aberturas sucessivas. Este movimento vibratório causa também estratificação do conjunto de partículas sobre a tela, de modo que as partículas maiores fiquem por cima e sobre a tela, enquanto as partículas menores, por baixo.

A direção de rotação poderá ser a mesma do fluxo do *oversize*, situação referida como rotação pró-fluxo ou oposta a ele, situação referida como rotação contra fluxo.

A direção da rotação no mesmo sentido do movimento do *oversize* facilita o escoamento, dando maior capacidade, mas diminuindo a eficiência de classificação. A rotação no sentido oposto dificulta o escoamento, por outro lado, ajuda na classificação.

As peneiras vibratórias horizontais “tradicional” ou mais “comuns” (ângulos de inclinação 0°) têm um movimento retilíneo, como dito anteriormente. Se o movimento fosse circular como das peneiras inclinadas, a partícula não sairia do lugar em relação ao *deck*, pois seria lançada para cima, ao mesmo tempo em que o *deck* se moveria para frente, indo recebê-la no mesmo ponto da tela. A altura do voo imprimida a partícula é menor que na peneira inclinada, o que impede seu uso com aberturas “grandes”.

Essa diferença de movimento exige mecanismos diferentes de acionamento, o que acarreta aspectos importantes do ponto de vista do projeto:

- a capacidade de uma peneira horizontal é 40% menor do que a de uma peneira vibratória de mesma área em geral; sendo que esta funciona numa faixa restrita de tamanho, de 2 ½” a 1/8” em umidade natural e 2 ½” a 48 # a úmido e fora dessa faixa, sua eficiência é muito baixa.

Por estas razões as peneiras horizontais ou de baixo ângulo (até 10°) são usadas preferencialmente como desaguadores (trabalha muito mal como peneira), deixando passar somente água e mantendo todas as partículas no *oversize*. A área requerida destas peneiras costuma ser maior que das inclinadas para manter um leito fino e a eficiência de peneiramento (Figura 15).

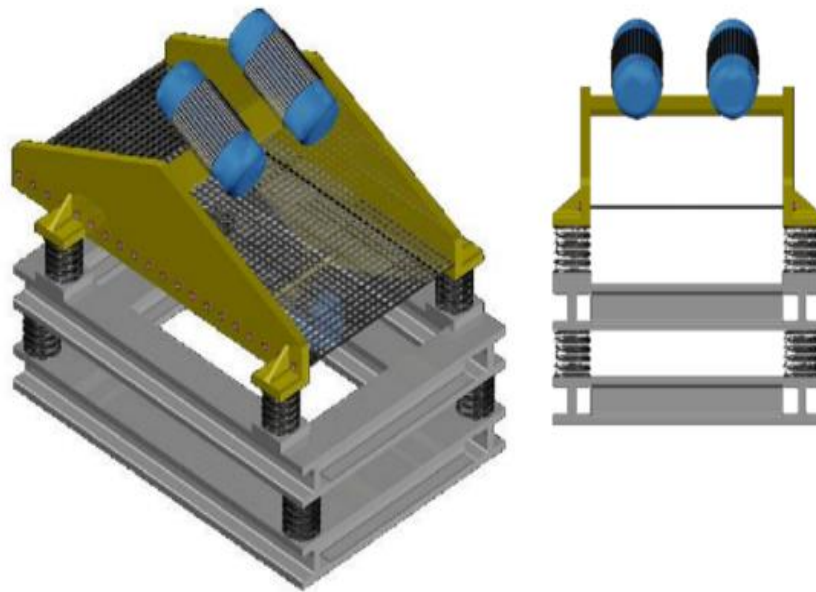


Figura 15: Peneira vibratória horizontal.

Fonte: REIS, 2016

Por outro lado, alguns autores consideram que como o movimento retilíneo sendo mais enérgico que a circular pode entupir menos a malha (Chaves e Peres, 2012).

Ainda, têm-se peneiras curvas estacionárias. O principal exemplo são as peneiras curvas DSM (sigla de *Dutch State Mines*, também referidas como *sieve bends* -Figura 16).

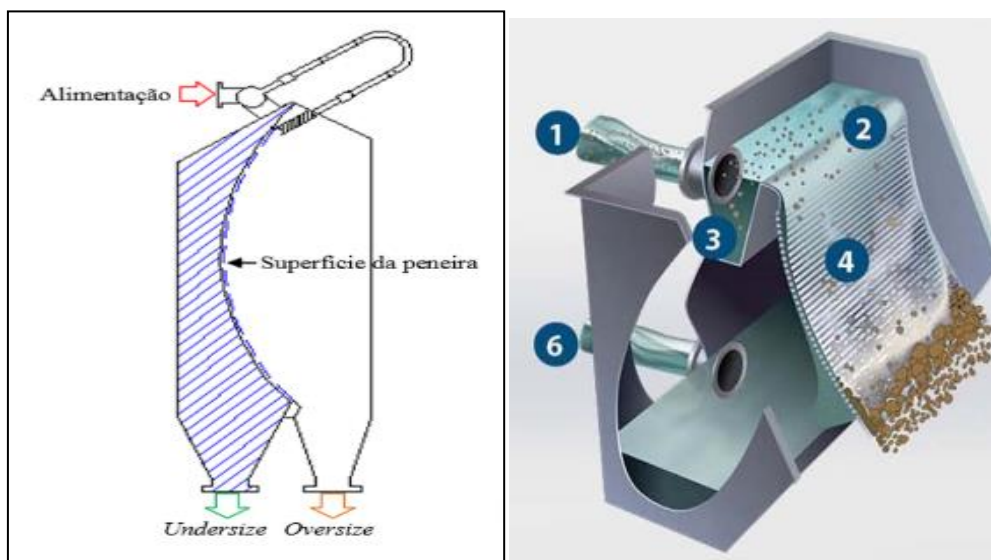


Figura 16: Peneira DSM.

Fonte: JWC-Environmental, (2018)

2.2.3. Peneiras Moduladas

Como visto antes, a inclinação do *deck* afeta a altura do leito, e o ideal seria poder aumentar a inclinação até ter um leito cuja espessura fosse a de uma única partícula, pois, dessa forma, o peneiramento seria imediato. Por outro lado, isso seria inconveniente, pois as partículas acabariam passando demasiadamente rápido (Chaves e Peres, 2012). Assim, as partículas mais difíceis de serem peneiradas não teriam tempo suficiente.

Banana screens ou peneiras do tipo “banana” são peneiras modulares que se caracterizam por zonas com inclinações diferentes: na alimentação de 24 a 45°, na parte intermediária de 8 a 24° e na descarga com 0 a 8° (Figuras 17, 18 e 19). Estas seções ou módulos com distintas inclinações tem o objetivo de aumentar a recuperação do passante (dos finos) na zona de alimentação.

O primeiro módulo com inclinação mais elevada terá uma espessura de leito pequena e isto ajudará as partículas finas a chegarem à tela. Também, o movimento de vibração mais a gravidade ajudarão as grosseiras a prosseguirem de forma mais rápida para seção intermediária, ajudando os finos que ficam para “trás” a passarem pela malha. O segundo trecho tem a vantagem de ter um volume menor de material para processar e, assim, o leito com espessura menor e já estratificado facilita o peneiramento.

Finalmente, o terceiro módulo tem inclinação bastante reduzida, dificultando a passagem do *oversize* sobre ele, aumentando a eficiência do peneiramento, por fornecer um maior tempo de residência e assim uma maior probabilidade de as partículas menores passarem pela malha.

Desta forma, a eficiência de peneiramento é aumentada e, como o movimento é retilíneo (CHAVES; PERES, 2012), a área necessária é, segundo os fabricantes, reduzida de 40% em relação à peneira vibratória inclinada.

A seguir o resumo dos princípios de funcionamento das peneiras tipo banana.

No estágio 1, alta velocidade para remover rapidamente o material fino. No estágio 2: velocidade moderada para facilitar a estratificação com leito mais fino.

O material remanescente abaixo do tamanho de corte é peneirado mais efetivamente do que seria possível num leito mais espesso e com menor velocidade.

No estágio 3, a menor de todas inclinações e, conseqüente velocidade, proporciona aumentar a eficiência de peneiramento do material com tamanho próximo da malha.

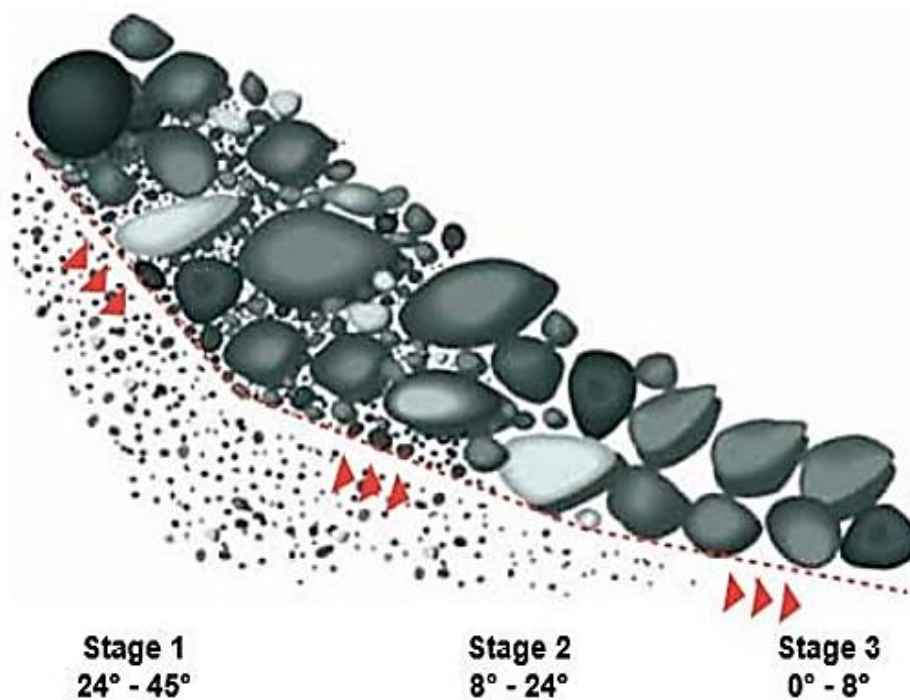
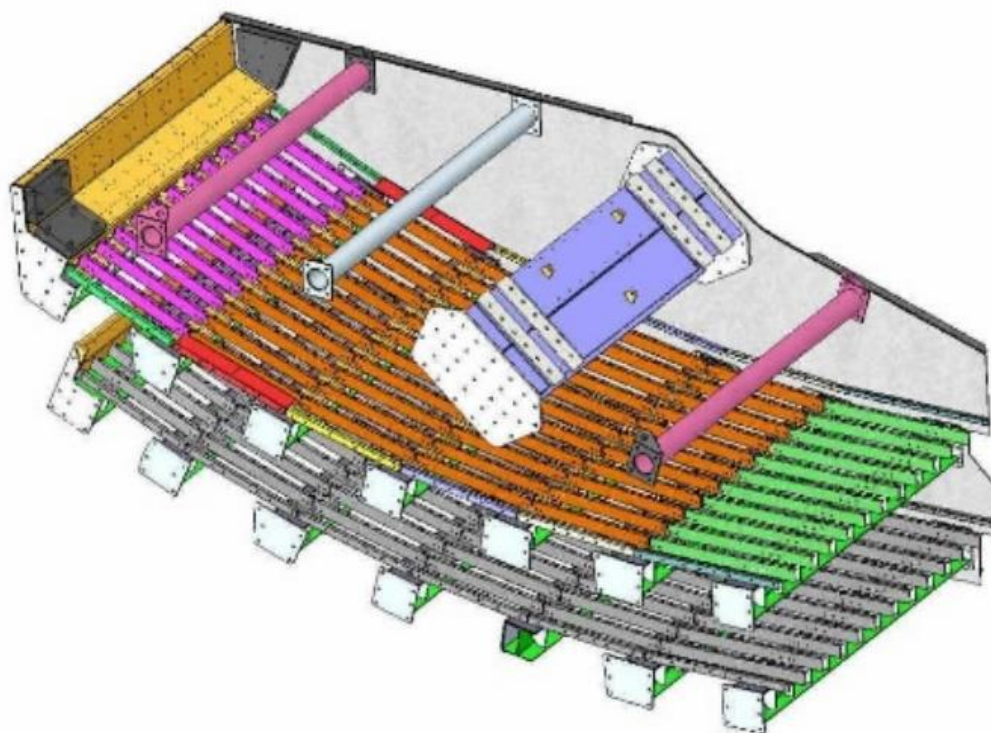


Figura 17: Esquema das peneiras tipo banana.

Fonte: *SHAH*, 2018



Figura 18: Peneiras moduladas ou banana

Fonte: MIFAMA OPA CARBO, 2018



Figura 19: Peneira Banana

Fonte: STC SCREENING AND FEEDING, 2018.

Na Figura 20, podem ser vistas outros tipos de peneiras moduladas: três *decks* de baixo e alto ângulo respectivamente.



Figura 20: Peneiras moduladas de três decks.

Fonte: Sandvik (2018).

2.2.4. Peneiras rotativas (trommel)

Peneiras rotativas (*trommel*) - Figuras 21 a 23 - possuem a superfície de peneiramento cilíndrica ou ligeiramente cônica, que gira em torno do eixo longitudinal. O eixo possui uma inclinação que varia entre 4° e 10°, dependendo da aplicação e do material nele utilizado (Chaves e Peres, 2012). Podem ser operadas a úmido (adicionando água) ou em umidade natural (“a seco”). A velocidade de rotação fica entre 35 - 40% da sua velocidade crítica (velocidade mínima na qual as partículas ficam presas à superfície cilíndrica). Nessas condições, a superfície efetiva utilizada no peneiramento está em torno de 30% da área total.



Figura 21: Peneiras rotativas (Trommel).

Fonte: WURDINGER MANUFACTURING (2018)

A alimentação é feita na extremidade superior, o material vem rodando e descendo, as partículas mais finas que a tela a atravessam, enquanto as mais grosseiras ficam retidas, sendo descarregadas na extremidade inferior (Figuras 22 e 23). A operação geralmente é feita a úmido, com jatos d'água sobre a tela.

As telas de diferentes aberturas (crescentes no sentido da alimentação para a descarga) são colocadas lado a lado, cada produto descarregando num chute próprio. Alternativamente, podem ser usados cilindros concêntricos, com telas sucessivamente mais finas de dentro para fora.

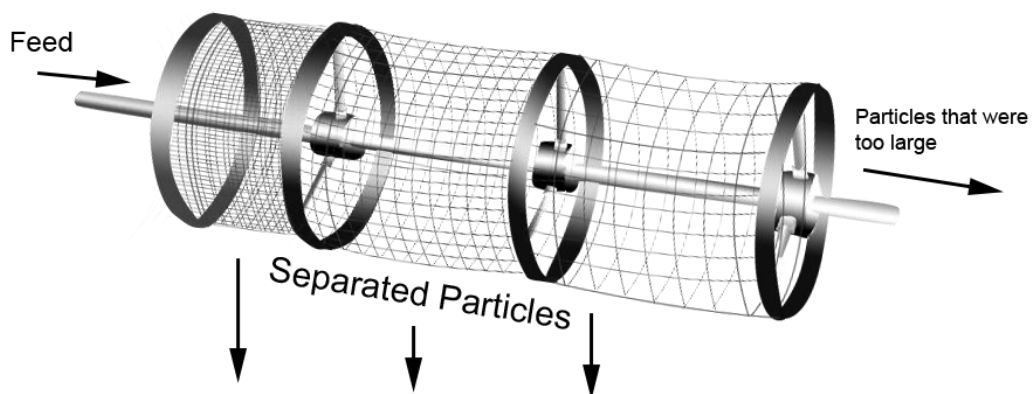


Figura 22: Classificação das peneiras rotativas.

Fonte: BRENTWOOD RECYCLING SYTEMS, 2018

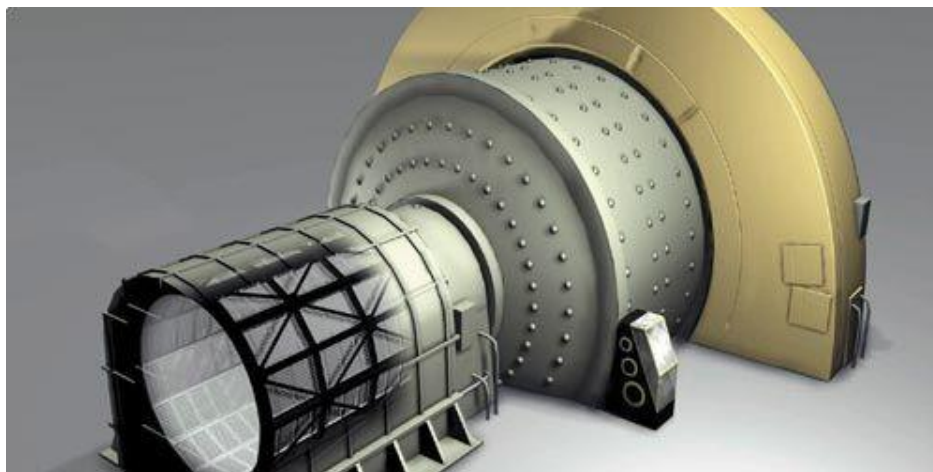


Figura 23: Peneiras rotativas em moinhos SAG (semi autógeno).

Fonte: B2BMAQUINAS, 2018

As principais vantagens dos *trommels* são sua simplicidade de construção e de operação, seu baixo custo de aquisição e durabilidade (Manual Metso, 6ª edição). Atualmente, são substituídos, parcialmente, por peneiras vibratórias que têm maior capacidade e eficiência, mas ainda são muito utilizados em lavagem e classificação de cascalhos e areias. Mais recentemente as peneiras rotativas têm sido utilizadas como peneiras de proteção para os separadores e concentradores magnéticos, evitando que partículas grosseiras causem entupimentos nos mesmos.

A eficiência destas peneiras é afetada diretamente pelo tempo de retenção. Quanto mais tempo o material demorar a passar maior a eficiência. Assim, a redução do ângulo do eixo do tambor ajuda a aumentar o tempo de residência, mas diminui a produtividade.

O aumento da área das telas ajuda no peneiramento e isto pode ser conseguido, aumentando o comprimento do tambor, usando de barras levantadoras ou aumentando o diâmetro.

2.2.5. Desaguadoras

Peneiras desaguadoras foram introduzidas na mineração, cerca de 40 anos atrás, como um meio mais eficiente de desaguamento de sólidos menores do que ¼” contidos em polpa.

Na maior parte das operações, eles substituíam “antigos” equipamentos tais como espirais, entregando um produto mais seco.

São equipamentos relativamente simples, ou seja, peneiras de baixo ângulo, de inclinação negativa (alimentação no ponto mais baixo e descarga no mais alto) e telas que podem chegar a aberturas de 0,15 mm - Figura 24.

O princípio de funcionamento das desaguadoras é explicado com base na Figura 25.

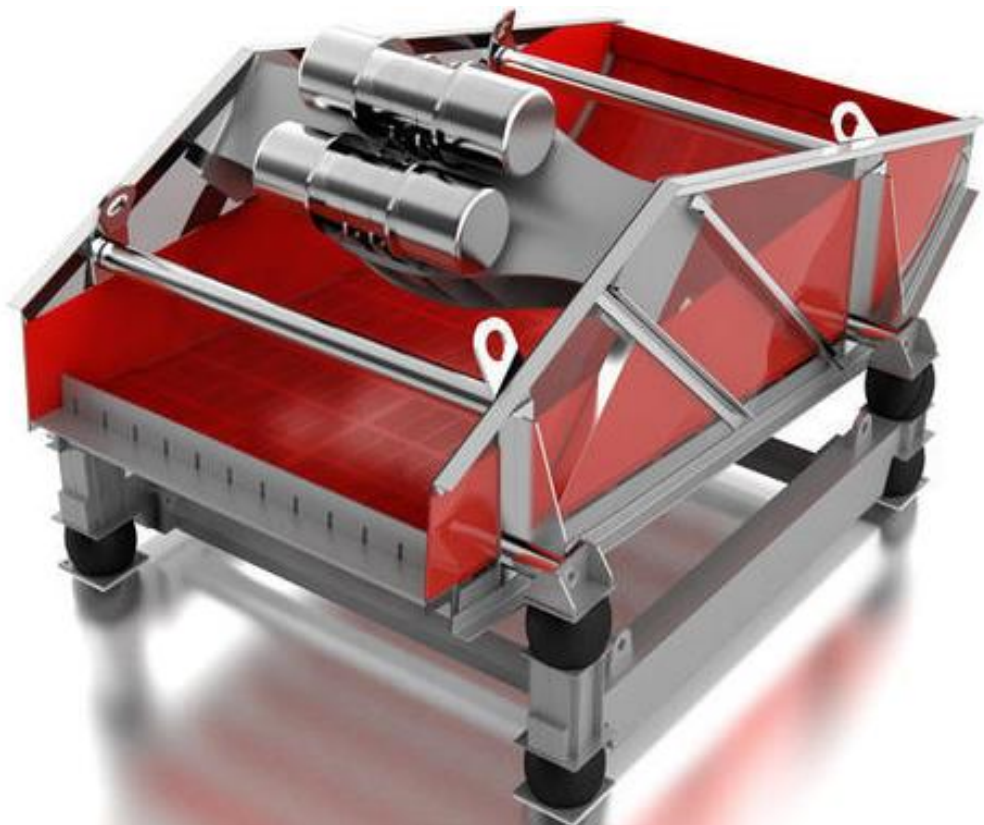


Figura 24: Peneira desaguadora

Fonte: *AGGREGATES MANAGER*, 2018

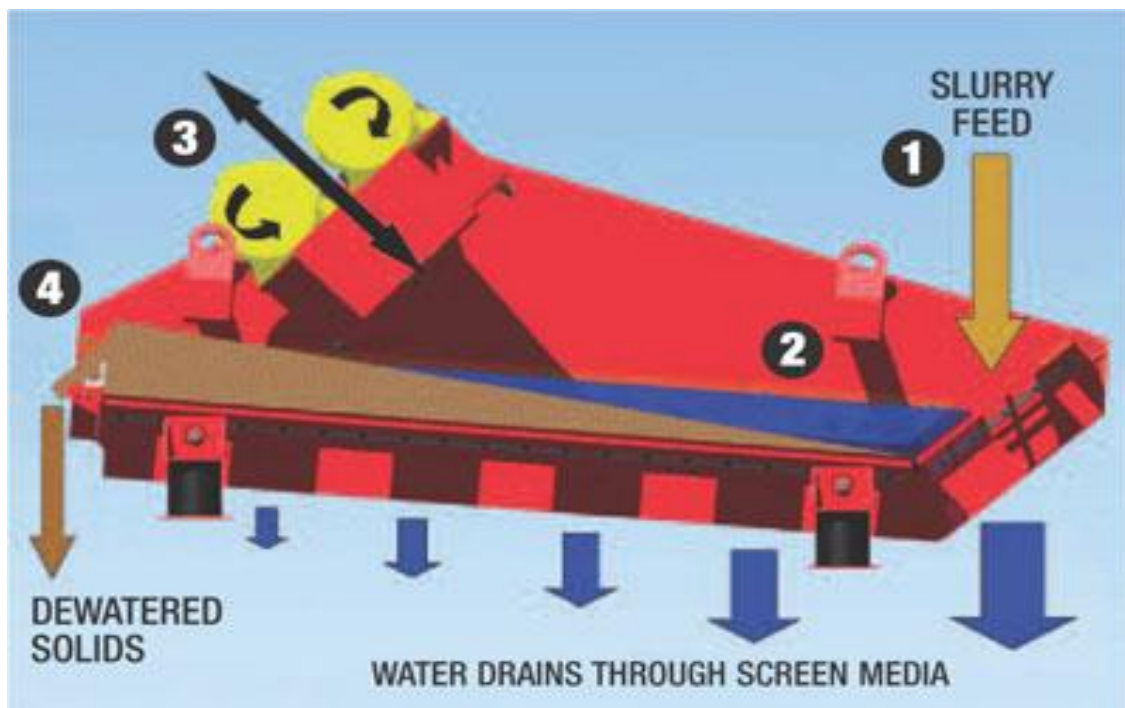


Figura 25: Esquema das desaguadoras.

Fonte: *AGGREGATES MANAGER*, 2018

Como algumas desaguadoras funcionam (peneiras inclinadas para cima com motores de vibração/rotação contra fluxo):

1. Uma polpa é alimentada de cima para baixo para dentro de uma peneira inclinada para adquirir rápida drenagem.
2. Uma piscina de água se forma na parte mais baixa enquanto os sólidos são lançados para cima no sentido da extremidade oposta no ponto de descarga.
3. A rotação no sentido contrário do movimento de descarga das partículas (contra fluxo) provoca um movimento retilíneo das partículas e de lançamento em direção ao ponto de descarga, enquanto a água é drenada através da tela.
4. A tela de inclinação ascendente com a descarga cria um leito profundo que atua como um filtro, permitindo a retenção de partículas sólidas de tamanho muito menor que a abertura da malha.

Estudos tem mostrado que a chave do desempenho destes equipamentos é essencialmente, a aceleração do material para cima e amplitude linear que impulsiona a água para o fundo da “torta” ou leito através do que melhor pode ser descrito como um

movimento tortuoso capilar formado entre os agrupamentos de grãos e através das aberturas para formar “gotas” antes do movimento descendente, embora uma parte da água possa voltar para dentro deste leito (CHAVES, 2010)²².

Na Figura 26, aparecem exemplos de peneiras desaguadoras processando areia e calcário bem fino (materiais da ordem de até 75 μm).



Figura 26: Peneira desaguadoras

Fonte: AGGREGATES MANAGER, 2018

O princípio fundamental, então, é o movimento contrafluxo, movimento circular e oposto ao movimento de descarga ou descendente das partículas, onde o movimento do oversize é dificultado pela inclinação negativa da peneira (ponto de descarga mais alto que da alimentação).

Isso aumenta a eficiência, embora a vazão seja reduzida. Com peneiras horizontais, isso não pode ser feito. Inverter o sentido do movimento vibratório retilíneo faria com que o oversize se deslocasse no sentido oposto.

O recurso para facilitar ou dificultar o movimento do *oversize* sobre a tela é variar a inclinação da mesma. Com inclinação positiva (a favor do movimento do *oversize*) aumenta a velocidade. Com inclinação negativa, o movimento do sólido, de certa forma, é dificultado para aumentar a eficiência (maior desaguamento).

2.2.6. Peneiras *Stack Sizers*

As peneiras vibratórias, tanto as horizontais quanto as inclinadas, podem operar com frequências de ordem de 600 a 3600 RPM (peneiras de altas frequência) e amplitudes entre 5 e 30 mm.

As horizontais dispõem de um sistema de vibração que atua numa direção paralela ao fluxo, para realizar o transporte do material numa razão entre 12 e 18 m/min. As inclinadas operam, normalmente, com ângulos que variam entre 15 e 35 graus, transportando material a uma velocidade de 18 a 36 m/min.

As peneiras de altas frequências oferecem pequenas amplitudes de vibrações, isso ocorre devido à vibração em alta frequência, fazendo com que a superfície do produto seja quebrada. Assim, minérios finos oscilam vigorosamente sobre a superfície da peneira, que prende a separação dos minerais úteis com gravidade específica elevada ou de alta densidade, permitindo assim que minérios de granulometria mais fina tenha mais contato com a peneira.

Nas usinas de processamento de mineral, objetivando peneirar minérios com granulometria fina variando de 6 mm até 45 micras, usa-se tradicionalmente as peneiras de alta frequências com telas de nylon ou poliuretano (Figura 27).

A Figura 27 mostra uma das 38 *Stack Sizers* operando em uma mina de ferro no Brasil. Nas Figuras 28 e 29, vemos em detalhe (de perto) e de perfil a estante de cinco *decks* (empilhamento) que são alimentados independentemente (funcionam em paralelo). Na Figura 29, vemos duas estantes – *Stack Sizers* (cinco *decks* cada) de cima.



Figura 27: *Stack Sizers* -Mina de ferro no Brasil.

Fonte: VALINE et al., 2009

A utilização de peneiras é bastante aplicada nas usinas de processamento mineral com o objetivo de classificar os materiais com granulometria fina, que podem variar de 75 mm a 6 mm, dependendo dos resultados que se pretende alcançar.

Porém, estas mesmas peneiras sempre foram consideradas ineficientes na separação / classificação de partículas finas (6 mm a até 45 micras), isto devido à baixa capacidade de unitária, as constantes obstruções das telas e à pequena vida útil das telas.

Após anos de pesquisa tecnológica, a “*Derrick Corporation*” chegou a conclusão que a largura da tela é o item mais influente para se alcançar uma alta eficiência das peneiras. Com esta descoberta a empresa concentrou seus esforços técnicos e financeiros

para desenvolver em 2001 a peneira conhecida como “*Multifeed*”. Esta peneira de alta frequência foi amplamente utilizada nos circuitos de moagem com o objetivo de aumentar os resultados do processo em 90% (VALINE et al.,2009)



Figura 28: Stack sizers (estante de cinco decks).
Fonte: VALINE et al., 2009



Figura 29: Stack Sizers vista de cima in loco.
Fonte: DERRICK SOLUTIONS INTERNATIONAL, 2018

Na Figura 30, podem ser vistos os princípios de operação da *Stack Sizer*: alimentação independente de cada *deck*, *decks* empilhados, reunião dos *oversize* coletados (à direita) e do *undersize* (à esquerda), motores de vibração para acionar movimento linear.

Com o desenvolvimento da peneira “*Multifeed*”, iniciou-se, em grande escala, a utilização das peneiras de alta frequência para a separação de finos em várias empresas de mineração em todo planeta.

Dependendo dos resultados que se deseja obter no *oversize* e no *undersize* e da abertura das telas, a capacidade das peneiras de alta frequência pode alcançar de 100 a 350 t/h de alimentação em cada máquina. A abertura das telas tem impacto direto na capacidade destas peneiras, pois gera um volume significativo de material com dimensões semelhantes a abertura das telas, definindo assim a viscosidade e as partículas da polpa (BARKHUYSEN, 2009)

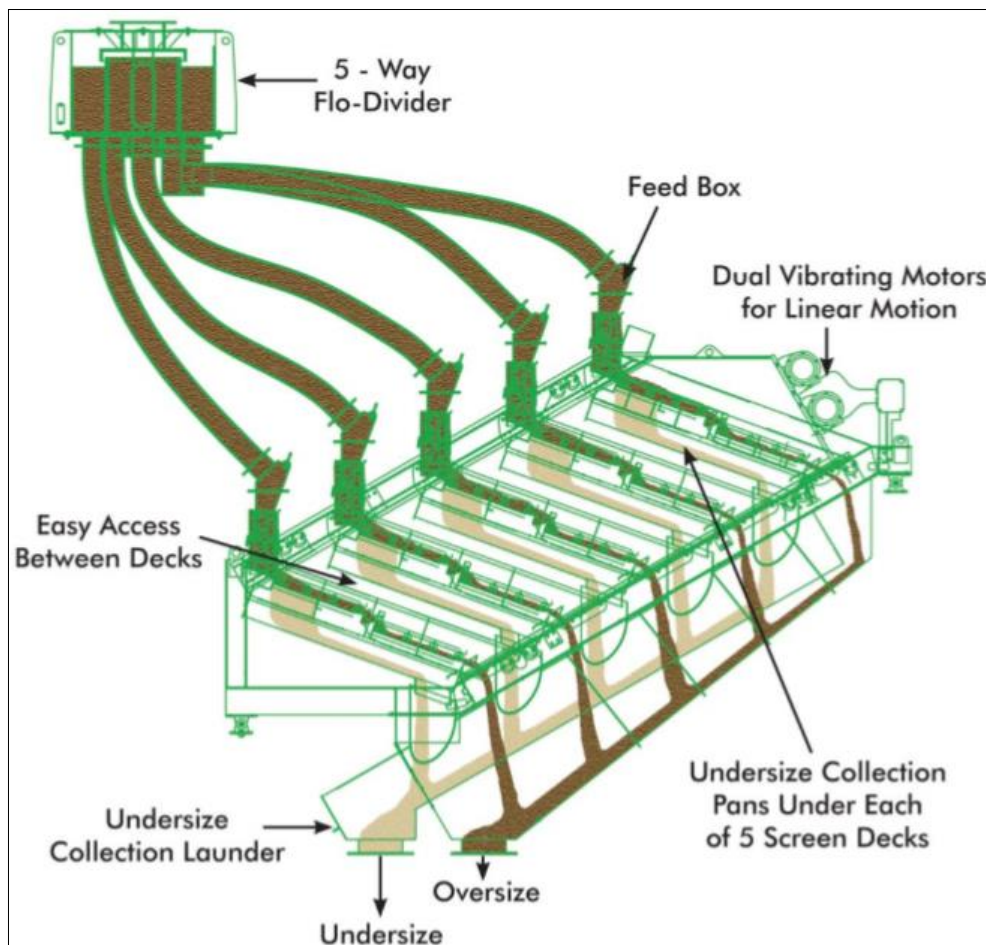


Figura 30: Princípios de operação da *Stack Sizer*.

Fonte: WHEELER & PACKER, 2011

A peneira possui cinco *decks* sobrepostos. Existe um espaço pequeno entre os *decks* com o objetivo de ser possível a visualização do fluxo do minério sobre a tela no decorrer do peneiramento e com isto identificar com mais facilidade o momento de trocar as telas. Este espaço garante também um acesso seguro para a manutenção das telas.

Geralmente, utilizam-se telas de poliuretano para compor os *decks* das peneiras de alta frequência, estes *decks* proporcionam uma significativa área útil de peneiramento. Dependendo das características físicas das partículas estas telas tem vida útil que pode variar de 4 a 12 meses. Cada *deck* da peneira é constituído por duas telas em linha, estas peneiras podem ser fornecidas com um conjunto de *sprays* que conduz o *undersize* para um único ponto de descarga. De modo similar o *oversize* dos 05 *decks* também é descarregado em um único ponto de descarga.

O cálculo de eficiência proposto pela *Derrick* é o mesmo definido classicamente para outras quaisquer peneiras descritas anteriormente.

Foram coletadas amostras do circuito de rejeito final da usina de Manganês do Azul. Este material coletado foi enviado para a empresa fabricante de peneiras de alta frequência (*Derrick Corporation*), que há vários anos fornece este tipo de peneiras para Vale S/A. As DGs (Distribuições Granulométricas) das amostras foram determinadas via peneiramento a úmido. Foram registrados dados de densidade, percentual de sólidos, taxas mássicas, dentre outras informações relevantes para a modelagem e simulação do circuito de peneiramento.

A decisão de utilizar peneiras de alta frequência está baseada na elevada capacidade destas de classificar partículas finas. Devido à vibração de alta frequência, a tensão da superfície do minério é quebrada. Assim, minérios finos vibrarão vigorosamente sobre a superfície da peneira, o que intensifica a separação dos minerais úteis com massa específica elevada. Isto permite que minérios extrafinos tenham mais oportunidade de contato com a superfície da peneira.

Para análise dos resultados de implantação deste projeto, foram coletadas amostras do circuito de rejeito final da usina de Manganês do Azul. Este material coletado foi enviado para a empresa fabricante de peneiras de alta frequência (*Derrick Corporation*).

2.3. Quantificação do Processo

Em peneiramento industrial, a palavra eficiência é empregada para avaliar o desempenho operacional do equipamento quanto à separação granulométrica ideal desejada. Por exemplo, a eficiência de peneiramento dos “finos” (E_u) ou eficiência de *undersize* é definida pela Equação 1, ou seja: a relação entre a quantidade (massa) de partículas de menor tamanho do que a abertura da tela da peneira e que passaram por ela (*undersize flow mass* ou M_U), com respeito à quantidade (massa) delas presente na alimentação (*feed undersize mass* ou M_{FU}):

$$E_u(\%) = \left[\frac{M_U}{M_{FU}} \right] \times 100 \quad Eq (1)$$

$$E_u(\%) = \left[\frac{W_u}{W_{FU}} \times \frac{U}{F} \right] \times 100 \quad Eq (2)$$

Nas equações 1 e 2, os símbolos significam:

E_u = Eficiência do *underflow*;

U = *Undersize* ou taxa mássica do passante (t/h);

F = *Feed* ou taxa mássica de alimentação (t/h);

W_U = percentagem de material menor que a malha presente no passante;

W_{FU} = percentagem de material menor que a malha presente na alimentação;

M_U = massa de material menor do que a malha (ou tamanho de corte) no passante

M_{FU} = massa de material menor do que a malha na alimentação.

Se considerado que todo material menor do que a malha da peneira passa pela mesma a fórmula da eficiência - Equação 3 - para este tamanho se reduz a simplesmente:

$$E_u(\%) = \left[\frac{U}{F} \right] \times 100 \quad Eq(3)$$

A eficiência conforme definida anteriormente, refere-se ao *undersize*, isto é, quantifica o comportamento da peneira em questão com o peneiramento ideal em termos de quantidade de “finos” que passaram pela tela.

Muitos usam esta fórmula simplificada, porém é necessário ter cuidado, quando a quantidade de finos na alimentação aumenta demasiadamente. Por exemplo, quando uma parte significativa de partículas finas podem não conseguir passar pela malha e acabam sendo carreadas com o material de tamanho maior que a malha (os grossos) constituindo parte do *oversize*. Isto é o que chamamos de *by-pass* (Rf ou C), que faz parte da curva de eficiência “real”.

De acordo com o desenho do equipamento, com a capacidade (tonelada por metro quadrado) e condições operacionais, tais como condições de manutenção das telas que impeçam a obstrução, além de outras tantas, tais como, inclinação, amplitude e vibração, quantidade de água e distribuição granulométrica da alimentação, este *by-pass* pode ser maior ou menor.

Existe outra definição que se refere a quantidade de material fino que foi removido do *oversize*, utilizada quando o que interessa é a qualidade do *oversize* expressa pela Equação 4:

$$E_r(\%) = \left[\frac{W_{FO} \times F}{O} \right] \times 100 \quad Eq (4)$$

Onde:

W_{FO} = percentagem de material maior que a malha presente na alimentação;

O = fluxo mássico em t/h de retido;

F = fluxo mássico em t/h de alimentação e

E_r = eficiência de remoção de passantes.

Ainda, é importante conhecer a eficiência para uma faixa ampla de classes de tamanho, razão pela qual devemos considerar eficiência não como um valor único, mas uma curva. Esta curva, por sua vez, pode ser determinada do ponto de vista do *undersize* ou do *oversize* ou, de forma mais completa, de ambos, o que resulta na eficiência global.

A seguir apresentam-se as fórmulas para determinar as curvas de eficiência para cada classe de tamanho “i”:

$$E_{ui}(\%) = \left[\frac{W_{ui}}{W_{Fi}} \times \frac{U}{F} \right] \times 100 \quad Eq(5) \quad \text{ou}$$

$$E_{Oi}(\%) = 100 \times \left[\frac{W_{Oi}}{W_{Fi}} \times \frac{O}{F} \right] \times 100 \text{ Eq(6) ou ainda}$$

$$E_{Oi}(\%) = 100 \times \left[\frac{W_{Oi}}{W_{Fi}} \times \left(\frac{W_{Fi} - W_{Ui}}{W_{Oi} - W_{Ui}} \right) \right] \times 100 \text{ Eq(7)}$$

onde “i” representa cada classe de tamanho, que pode ser a malha superior, porém para fins de modelagem e simulação é a raiz do produto da malha superior pela inferior ou tamanho geométrico. Ainda:

U = *Undersize* ou taxa mássica do passante (t/h);

F = *Feed* ou taxa mássica de alimentação (t/h);

O = *Oversize* ou taxa mássica do passante (t/h);

F = U + O

W_{Ui} = percentagem de material de tamanho “i” presente no passante;

W_{Oi} = percentagem de material de tamanho “i” presente no retido;

W_{Fi} = percentagem de material de tamanho “i” presente na alimentação;

Em realidade, deve-se considerar ambas eficiências, de *underflow* e *overflow*, ditas “reais” conforme seguem as fórmulas a seguir:

$$E_{Gi}(\%) = \left[\frac{(W_{Fi} \times W_{Ui}) + (W_{Fi} \times W_{Oi})}{100} \right] \text{ Eq(8)}$$

As curvas de partição ajudam a determinar o percentual de cada classe de tamanho contido na alimentação que é direcionada para um dos produtos (*undersize* ou *oversize*). Uma curva de partição típica é mostrada na Figura 31, sendo, também, conhecida como curva de distribuição, de desempenho, de seletividade, de eficiência ou, ainda, curva de *Tromp* (CHAVES, 2010)²². Esta última definição destinada especificamente ao caso de separação em hidrociclones ou mais propriamente destinada a separação por densidade.

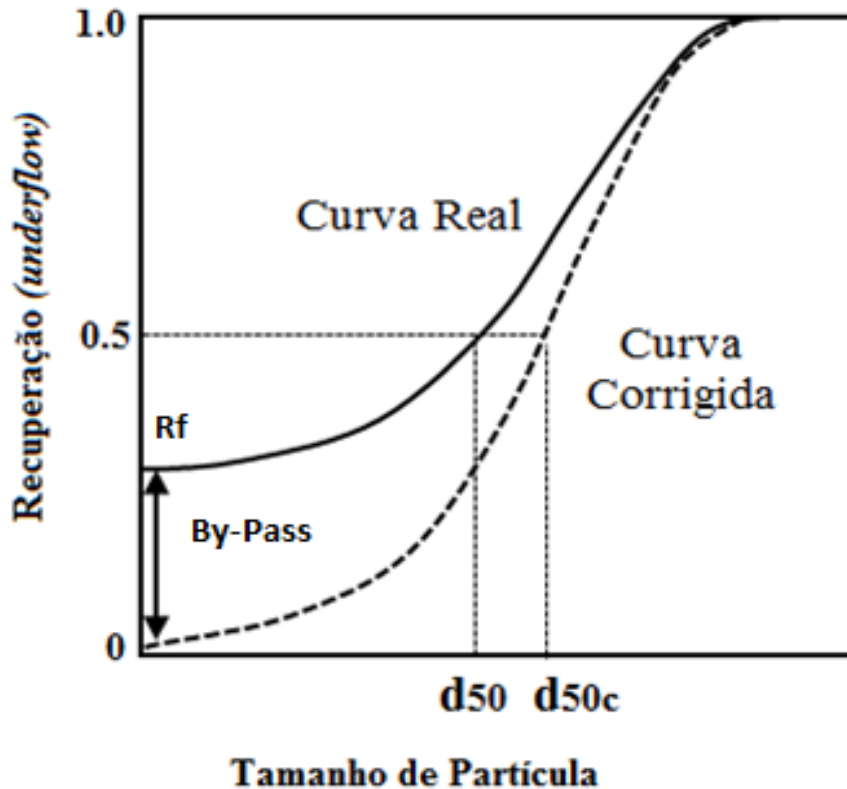


Figura 31: Curvas de partição
Fonte: Jesus et al.

O tamanho de corte, conhecido por d_{50c} de uma peneira é o tamanho no qual 50% da polpa sairão por baixo (*undersize*) e os outros 50% por cima (*oversize*).

Se a separação fosse perfeita, as duas populações obtidas da classificação deveriam ser uma “fina” e outra “grossa” (menor e maior que a malha respectivamente). Contudo, na prática essa classificação não é perfeita (curva real), sendo partículas finas encontradas no *oversize* e partículas grossas no *undersize* (CHAVES, 2010)²².

Na Figura 31 é mostrada uma classificação ideal, onde todas as partículas com tamanhos superiores e inferiores a d_{50c} dirigem-se, respectivamente, para o *underflow* e o *overflow*, o que não ocorre na prática (curva real que aparece na mesma figura). Devido à imperfeição no processo de classificação do hidrociclone, a curva fica inclinada, formando áreas denominadas material deslocado, constituídas por partículas finas que se dirigem ao *underflow* e partículas grossas ao *overflow*. Essa imperfeição é medida com auxílio da seguinte relação:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50c}} \quad Eq(9)$$

No processo de classificação, portanto, é verificado que parte das partículas que saem no *oversize* são arrastadas pela água. *Kelsall* (LUZ et al., 2010)² sugeriu que “ R_f ” corresponde à fração de água da alimentação que se dirige ao *oversize* por meio de um desvio (*by-pass*), “ R_f ” por cento de todos os tamanhos de partículas que são arrastadas para o *oversize*. Isto invoca um conceito de eficiência corrigida devida a classificação somente. A eficiência real poderia ser corrigida então usando a fórmula básica:

$$E_{Oci} (\%) = (E_{OAi} \times M_{Fi}) - (R_f \times M_{Fi}) \quad Eq(10)$$

onde M_{Fi} é o fluxo mássico (t/h) de tamanho i na alimentação e o produto, $E_{OAi} \cdot M_{Fi}$, é a taxa mássica (t/h) de tamanho i no *oversize*. Mas o produto, $R_f \cdot M_{Fi}$, é a taxa mássica (t/h) de tamanho i no *oversize* que chega nesta sem ser classificado (*by-pass mass*). Somente $E_{OAi} \cdot M_{Fi} - R_f \cdot M_{Fi}$ em t/h é de fato classificada. Então, a eficiência de *oversize* corrigida (E_{OC}) será:

$$E_{Oci}(\%) = \frac{(E_{OAi} \times M_{Fi}) - (R_f \times M_{Fi})}{(M_i - R_f \times M_{Fi})} \quad Eq(11)$$

que é igual a:

$$E_{Oci}(\%) = \left(\frac{E_{OA} - R_f}{1 - R_f} \right) \quad Eq(12)$$

$$E_{UCi}(\%) = \frac{E_{UAI}}{C}, \text{ sendo } C = 100 - R_f \quad Eq(13)$$

As curvas corrigidas baseadas nestas fórmulas são comparadas com as reais ou experimentais (Figura 31). Curvas corrigidas são sigmóides em forma e assemelham-se a curvas de distribuição de probabilidade acumulada. Elas de fato mostram a probabilidade de uma dada partícula se reportar a um produto ou outro em função de seu tamanho. Embora não sejam curvas de probabilidade de fato, podem ser tratadas como tais - princípio de *Kelsall* (*NAPIER-MUNN*, 1996): uni modais e descritas por dois parâmetros básicos. Assim, podem ser representadas pela média e desvio. O parâmetro d_{50C} ou *cut-size* é o tamanho de corte ou separação o qual divide igualmente entre *oversize* e *undersize*

devido a forças de classificação somente. O *cut-size* corrigido d_{50C} é sempre maior do que o medido ou $real_{d_{50}}$.

O princípio de *Kelsall* de correção é simples, plausível e muito usado. As fórmulas propostas matematicamente descrevem o processo e ajudam a fazer a análise quantitativa do mesmo. Por outro lado, a afirmação de que o R_f ou *by-pass* seja o mesmo para todos os tamanhos pode ser questionada, em especial no caso de separação por ciclonagem a seco de materiais finos e aglomerantes como o cimento - efeito *fishhook* (NAPIER-MUNN, 1996).

2.4. Mecanismo do peneiramento

O funcionamento de uma peneira e o comportamento das partículas devem ser considerados de dois pontos de vista: o do conjunto de partículas e o de cada partícula individualmente (CHAVES; PERES, 2012)

2.4.1. Comportamento coletivo

Para poder peneirar, uma peneira exerce três ações independentes e distintas sobre a população de partículas que é alimentada a ela:

Deve transportar as partículas de uma extremidade do *deck* até a outra.

Deve estratificar o leito de modo que as partículas maiores fiquem por cima, e menores por baixo. Assim, dá a estas a chance de apresentarem à tela e a atravessarem, o que constitui o *undersize*.

Peneiramento propriamente dito.

Na escolha de uma peneira é, portanto, necessário assegurar a capacidade de transporte de todas as partículas, o espaço suficiente para a acomodação do leito e o tempo suficiente para que as partículas finas se apresentem a tela e a atravessem. Na Figura 32, na sua parte superior, é mostrado um corte ideal do leito de partículas sobre o *deck* de uma peneira eficiente. Inicialmente, o leito está todo desarranjado e estratifica-se de modo que as partículas finas comecem a atravessar a tela. As partículas retidas seguem seu caminho sobre a tela. Elas vão diminuindo em quantidade sobre o leito de modo que no

final, restam apenas as partículas grosseiras e uma pequena quantidade de partículas finas que não conseguem atravessar a tela. A parte inferior da mesma figura mostra a quantidade de material passante ao longo do comprimento do leito. No trecho inicial, a quantidade de material que atravessam a tela é pequena – apenas partículas finas que já estavam por baixo. Esta quantidade aumenta à medida que o leito vai sendo estratificado e depois passa a diminuir, conforme a quantidade de partículas finas no leito sobre a tela diminui. Três situações podem ser identificadas segundo Chaves e Peres (2012). (1) situação inicial, em que a estratificação ainda está ocorrendo; (2) o peneiramento de saturação, quando o leito está totalmente estratificado e (3) o peneiramento de baixa probabilidade, em que as partículas finas remanescentes têm que fazer tentativas repetidas até conseguirem atravessá-la (Figura 33).

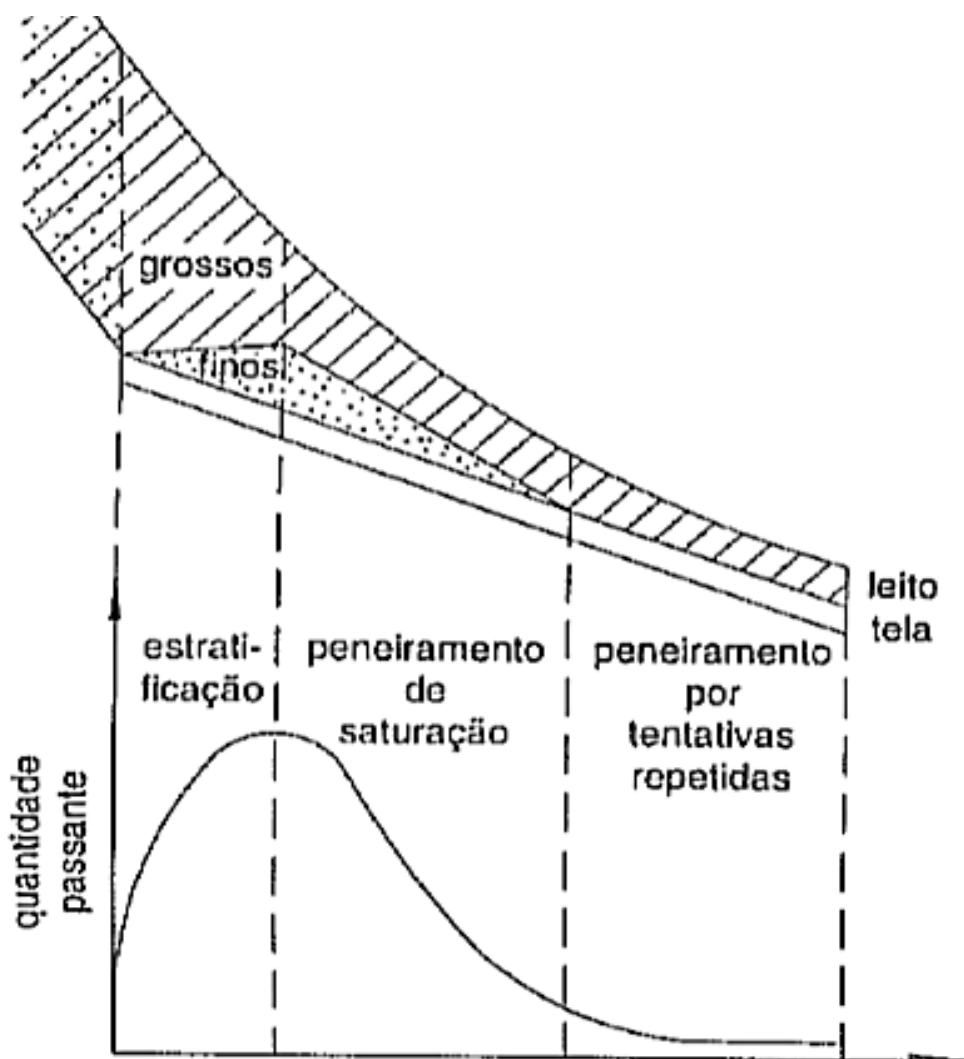


Figura 32: Regiões chaves no peneiramento.

Fonte: CHAVES; PERES (2012)

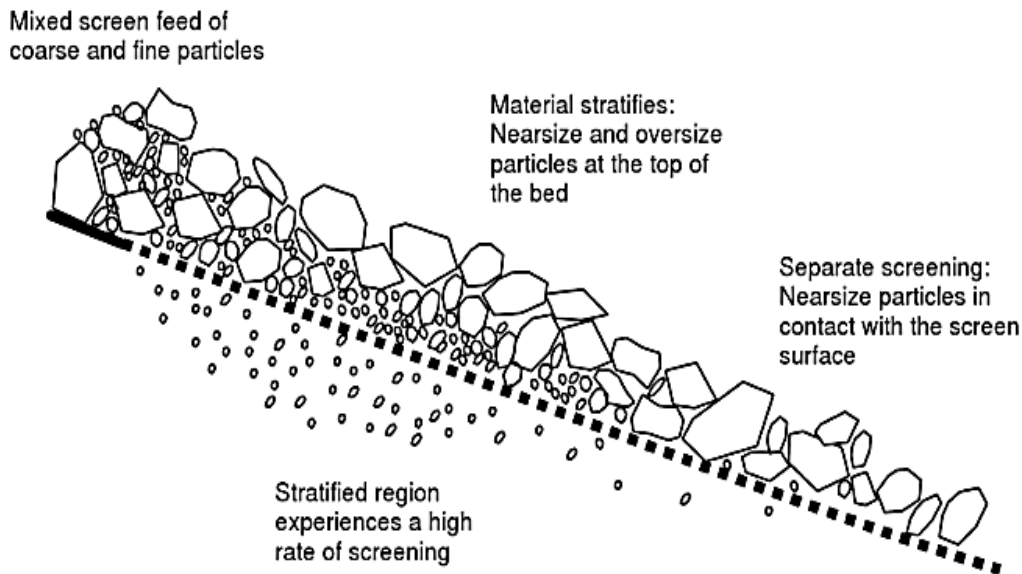


Figura 33: Mecanismos de peneiramento

Fonte: *WILLS; FINCH (2016)*

O transporte de material sobre as peneiras vibratórias é assegurado pelo movimento das peneiras. A tela deve dar um impulso a cada partícula, capaz de levantá-la e lançá-la para frente. Este impulso deve ser tal que a partícula caia adiante, nunca sobre a mesma malha, e, também, não deve sobrevoar várias malhas ao mesmo tempo, pois estaria desperdiçando chances de atravessá-la. Assim, o movimento de descer e subir do *deck*, sua amplitude, tem a função de lançar uma partícula com tamanho igual até 1,5 vezes à abertura da malha para fora dela, impedindo-as de entupir a malha.

No entanto, este movimento deve ser limitado de tal forma a impedir, também, a partícula de ser lançada muito longe, bem como não deve sobrecarregar a parte mecânica da peneira devido aos esforços mecânicos sobre a tela e a sua estrutura.

Por isso os movimentos vibratórios das peneiras inclinadas e horizontais, bem como as relações de amplitude e frequência são diferenciados de tal forma que para cada faixa de tamanhos e corte desejado, sejam garantidas as eficiências de peneiramento. Por exemplo, para uma frequência constante, aumentando a amplitude, o “voo” da partícula é mais alto e comprido. Assim, quando a malha é maior é necessário que a amplitude seja maior e que a frequência seja menor (CHAVES; PERES, 2012), ao contrário de quando a malha diminui.

De qualquer forma, a frequência de vibração tem a função de estratificar o material do leito, fazendo com que as partículas finas fiquem por baixo e se apresentem a telas para atravessá-la. Como ela aumenta à medida que abertura da malha diminui, começam a aparecer problemas estruturais e/ou mecânicos importantes, mas que não serão abordados neste trabalho.

A inclinação da peneira afeta vários parâmetros da operação, tais como vazão e altura do leito. Com respeito à vazão, quanto mais inclinada, maior a capacidade de alimentação. Quanto maior a inclinação, menor a altura da camada de *oversize* - altura do leito. Por um lado, isto é bom porque reduz o desgaste da tela. O aumento da inclinação é limitado de tal forma que não jogue as partículas “muito” para frente diminuindo a probabilidade de serem selecionadas pela malha. Tal efeito seria similar a um aumento excessivo de amplitude. As peneiras que funcionam contrafluxo, geralmente, são mais inclinadas do que as pró-fluxo.

2.4.2. Comportamento individual das partículas

Industrialmente, a eficiência de peneiramento, de acordo com as fórmulas simplificadas, considerando a malha da peneira, situa-se entre 80 e 90%, atingindo em alguns casos 95%. As partículas com diâmetros “d” superiores a uma vez e meia a abertura da tela “a” não influenciam no resultado do peneiramento, bem como àquelas inferiores à metade ($d < 0,5a$) da abertura da tela. As partículas compreendidas entre esta faixa é que constituem a classe crítica de peneiramento (*nearsized material*) e influenciam fortemente a eficiência e a capacidade das peneiras.

Essa classe pode ser dividida em duas:

-0,5 a < d < a -partículas com estas dimensões tem menos oportunidade de atravessar a malha da tela quando comparado com as partículas de tamanho inferior a abertura da tela. Uma situação similar que pode ser comparada às destas partículas, é a de uma bola de basket-ball quando lançada no cesto, que só passa por dentro do mesmo quando cai em um posicionamento favorável. O mesmo acontece com as partículas com as dimensões já citadas, ou seja, estas partículas só conseguem passar pela abertura da tela quando entram em contato com esta abertura em um posicionamento favorável. Para que isto aconteça quantidade grande de tentativas precisa ocorrer e mesmo assim, existe

a possibilidade de uma quantidade expressiva destas partículas irem para o *oversize*. Esta é a faixa granulométrica considerada crítica e interfere diretamente na capacidade e na eficiência da peneira.

- $a < d < 1,5 a$ –estas partículas são as que ficam encrustadas nas aberturas das telas e acabam obstruindo-as. As dimensões destas partículas são similares às aberturas da tela e por causa desta similaridade, as partículas ficam agarradas nas aberturas. Se o número de aberturas com partículas agarradas for, por exemplo, próximo de 30%, certamente ocorrerá redução da capacidade da peneira. Uma solução para esta ocorrência é alterar a amplitude e a frequência da peneira.

- $d > 1,5 a$ –estas partículas percorrem a peneira por cima da tela e são direcionadas para o *oversize*. Geralmente estas partículas não afetam o desempenho do peneiramento, uma exceção é se ocorrerem em volumes significativos, que podem causar danos a estrutura física da tela, devido ao seu tamanho e densidade. Neste caso, sugere-se a utilização de um *deck* auxiliar ou de alívio.

- $d < 0,5 a$ –partículas que possuem estas dimensões têm tamanhos inferiores a 50% da abertura da tela e, portanto, passam sem esforço pela tela e não causam nenhuma perda na eficiência e na capacidade da peneira.

- $d \ll 0,5 a$ –geralmente partículas com estas dimensões são as ultrafinas e, portanto, deveriam passar pelas aberturas das telas sem nenhuma dificuldade. No entanto este fato é observado somente em parte destas partículas. Isto ocorre porque elas possuem uma área superficial representativa e por isto estas partículas acabam aderindo às partículas com dimensões superiores e são encaminhadas para o *oversize*, causando contaminação no mesmo. Na prática as partículas ultrafinas se dividem tanto para o *oversize* como para o *undersize*. O que pode fazer com estas partículas se direcionem mais para o *oversize* ou para o *undersize* e o volume de água utilizada nos *sprays* da peneira ou na diluição da alimentação da peneira.

Na Figura 34, aparecem então os comportamentos distintos que as partículas de tamanhos diferentes podem apresentar durante o peneiramento frente à abertura da tela.

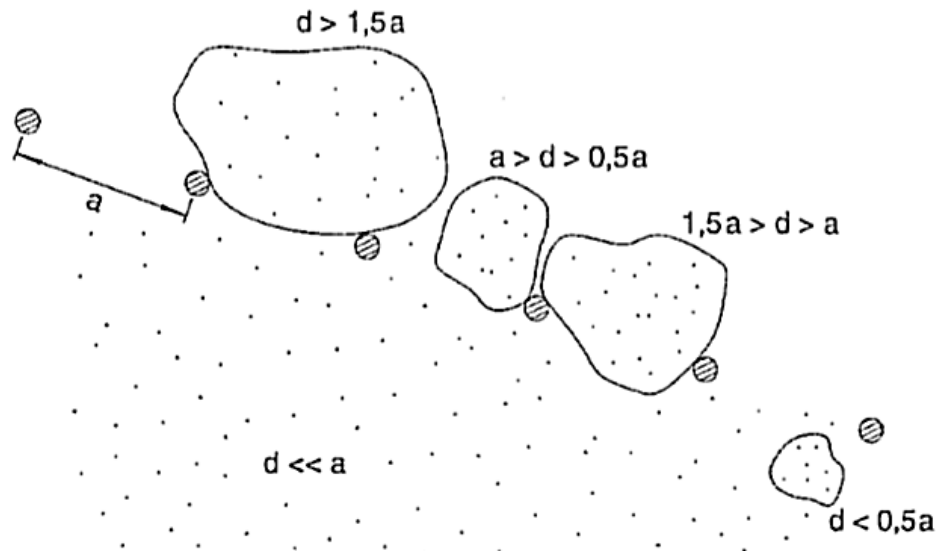


Figura 34: Comportamento individual das partículas

Fonte: CHAVES & PERES (2012)

2.5. Fatores que afetam o peneiramento

Em um processo de beneficiamento de minérios a úmido, os itens que mais interferem significativamente na capacidade e na eficiência dos equipamentos estão listados a seguir: a tonelagem horária da alimentação, o percentual de sólidos da alimentação, a granulometria das partículas na alimentação e as dimensões da abertura das telas.

A tonelagem horária de alimentação de um peneiramento é a variável mais crítica na eficiência do mesmo. Isto porque a capacidade de um peneiramento é determinada pela máxima tonelagem horária de alimentação que o peneiramento é capaz processar atendendo as especificações previstas. A quantidade de peneiras que será necessária, em um determinado processamento mineral, será definida pela capacidade unitária de cada peneira. **Um número abaixo do dimensionado, ou seja, excedendo a capacidade das mesmas, irá resultar em redirecionamento das partículas finas para o *oversize* e fluido para o *undersize*.** Ocorrerá também, um desgaste maior das superfícies de peneiramento (MULAR, 2003). As partículas do *undersize* são arrastadas a atravessar a aberturas da tela pelo movimento do fluido e, portanto, o mesmo afetará a eficiência de peneiramento. Essa eficiência de peneiramento aumenta com a diminuição da densidade da alimentação, pois com menor quantidade de sólidos, ou seja, com maior presença de água no fluxo, a possibilidade de arraste para *oversize* é maior, então se deve encontrar a

percentagem ótima para cada caso. Na prática já alimentar a peneira com uma percentagem de sólidos menor é melhor que usar os jatos existentes na peneira para adição do fluido que irá arrastar as partículas para o *undersize*. (VALINE et al., 2009). A distribuição de tamanho do material que alimenta as peneiras, também, afeta a capacidade e o desempenho do peneiramento. As partículas com tamanho próximo ao da abertura da tela, ou seja, 2 *mesh* acima ou abaixo que a abertura da tela, impede que partículas menores passem através da tela e, alguns casos, podem até causar problemas de entupimento (ALBUQUERQUE et al., 2009, 2013). Existe uma relação que permite dizer que, quanto maior a abertura, maior a capacidade, porém o inverso também deve ser considerado verdadeiro. Por exemplo, testes determinaram que a capacidade de uma peneira fosse de 100 t/h, quando operando com uma tela de abertura de 250 μm (60 *mesh*). Por sua vez, se a mesma peneira operar com uma abertura de 150 μm (100 *mesh*) sua capacidade pode cair de 20 a 40%.

2.5.1. Termos Básicos do peneiramento

A seguir veremos alguns termos importantes para o peneiramento, os quais são frequentemente abordados neste trabalho e, portanto, precisam estar bem definidos.

- **Estratificação** - fenômeno que ocorre com a vibração estabelecida no leito através das partículas. Responsável pela passagem das partículas finas por entre as grosseiras e pela malha.
- **Profundidade de leito** - espessura de material sobre a peneira (*deck*). Afeta a habilidade de proporcionar estratificação às partículas e de fazer os finos passarem pela malha de fato.
- **Taxa de passagem** - velocidade na qual o material atravessa a peneira.
- **Área aberta** - definida como a taxa de área líquida (área com aberturas de fato) existente com respeito à área total de peneiramento. Comumente expressa em percentual.
- **Eficiência de peneiramento** - Percentual de material que atravessa a malha com respeito à quantidade de mesmo tamanho que alimenta a peneira.

- **“Screen Stroke”** - Forma e amplitude do movimento de uma peneira. Usualmente, são movimentos circulares, elípticos ou lineares. Também, pode ser referido como o movimento máximo viável do *deck*.
- **Frequência** - é a medida em Hz ou revoluções por minuto (RPM) do número de vezes que a peneira fecha um ciclo de movimento, tal como o número de vezes que o *deck* retorna à posição original por segundo. Para um movimento giratório, por exemplo, o número de vezes que retorna à posição máxima no tempo.
- **G-Force** - força com a qual a peneira retorna ao fundo de sua respectiva posição num movimento elíptico ou circular por exemplo.
- **Plugging**– acontece quando as partículas de tamanho próximo à malha (da faixa de tamanha crítica) ficam paradas, estacionadas, bloqueando à passagem das demais pelas aberturas.
- **Blinding**– Ocorre quando a umidade faz com que as partículas finas fiquem aderidas à tela, cobrindo as aberturas e impedindo a passagem das partículas.

Como vimos anteriormente, o peneiramento depende de (a) estratificação e (b) da formação do leito sobre o *deck*. O movimento das peneiras provoca a estratificação do leito e tem também a função de diminuir o atrito entre as partículas. Assim, partículas finas passariam pela tela e propiciariam um corte mais preciso de tamanho.

De acordo com o princípio de “peneiramento livre”, uma inclinação dupla é usada, por exemplo: um trecho com 10-15° e depois outro com 20-30° para proporcionar estratificação. No trecho de maior inclinação, ocorre “queda livre”, e as partículas são classificadas “de forma mais direta”, não ocorrendo quase nenhuma construção de leito. Isto confere ao equipamento maior capacidade (podendo este então possuir uma instalação mais compacta), porém apresentará uma maior imprecisão de corte (classificação). Este tipo de princípio ou de equipamento que o utiliza tem a vantagem, portanto, de remover uma grande quantidade de finos rapidamente.

Como vimos também anteriormente, há uma enorme variedade de equipamentos. Cerca de 80% das peneiras utilizadas no mundo possuem uma única inclinação e são denominadas às vezes por peneiras de estratificação (*single inclination; stratification screens*). As demais peneiras apresentam mais de uma inclinação e são denominadas

double, triple, multiple inclination screens. Nestas, ambos os mecanismos ou princípios são empregados: estratificação e queda livre.

Peneiras de única inclinação (*single inclination screens*) podem apresentar superfícies (*decks*, telas) circulares (15°) ou lineares ($0-5^\circ$). As de dupla inclinação apresentam geralmente alta capacidade e são mais compactas. As de tripla inclinação combinam capacidade e precisão (seletividade). Muito comumente utilizadas no controle avançado de distintas frações de tamanho de produto. As de inclinação múltipla, tais como as do tipo banana, são efetivas no peneiramento de camadas finas e populares na mineração tanto do carvão quanto de minérios metálicos.

Tão importante, quanto à seleção do tamanho da peneira, da malha, da inclinação etc., é a seleção do tipo de material em que é feita a malha da peneira (*screening média*). Isto interfere de certo modo na eficiência à medida que a malha sofre mais ou menos desgaste. De qualquer forma, a presente dissertação não entra neste nível de detalhamento, ou seja, não estuda o desgaste dos *decks*, pois esta abordagem é, por vezes, muito mais complexa do que prever a eficiência do peneiramento, em especial, se desejado modelar e simular do ponto de vista físico o que ocorre.

2.6. Modelagem e simulação

A modelagem matemática consiste em escolher equações matemáticas que melhor representem os equipamentos, tais como peneiras, moinhos, britadores etc. Com estas, podemos prever as eficiências dos equipamentos e as curvas granulométricas das correntes (DGs).

Após a escolha do modelo, com base nos dados de amostragem, simulamos o equipamento ou circuito e validamos sempre que possível para que, depois, finalmente possamos simular situações diferentes das da amostragem.

Portanto, dada uma determinada distribuição de tamanho de alimentação, taxa mássica de alimentação e curva de eficiência, podemos dimensionar e descrever o desempenho dos equipamentos.

Modelos de peneira objetivam prever: (a) distribuição de tamanho dos fluxos (b) eficiência e (c) dimensões para melhor desempenho dado um tamanho de corte.

Muitos dos paradigmas, no que tange à avaliação e previsão de operacionalidade do equipamento, baseiam-se nas experiências adquiridas ao longo do tempo. Ainda que, de uma forma arbitrária, a literatura (*NAPIER-MUNN et al., 1996*) tenha classificado os modelos de peneiras em quatro categorias:

1- Modelos probabilísticos – que incorporam a probabilidade de uma partícula passar através das malhas (modelos usados, por exemplo, pelo centro de estudo australiano *JKMRC*³⁰ – *Julius Kruttschmitt Mineral Research Centre* - e software de modelagem e simulação *JKSIMmet*.

2- Modelos cinéticos– assumem que o peneiramento é definido por um processo de ordem particular.

3- Modelos empíricos– baseados nas equações de regressão derivadas de dados experimentais para prever eficiência.

4- Modelos de capacidade – usado por fornecedores de equipamentos para dimensionamento.

Não é objetivo descrever todos os modelos que existem, mas resumir o estado da arte atual com base nos modelos que foram usados. No capítulo modelagem e simulação, voltado ao estudo de caso desta dissertação, bem como no item a seguir sobre dimensionamento, serão detalhadas as equações utilizadas neste trabalho, e portanto, seus aspectos mais relevantes.

Ainda, embora não seja escopo do trabalho, é importante ao menos citar que existe uma “quinta categoria” de modelos, que podem ser definidos como “físicos” por tentarem prever não somente a granulometria dos fluxos e a eficiência, mas também outros parâmetros fundamentais tais como desgaste, esforços mecânicos e desempenho etc. São ditos físicos, também, por serem modelos que tomam por base as leis físicas, a mecânica de movimento de partículas, envolvendo suas formas, densidades etc.

Estes modelos geralmente estão baseados em elementos discretos para simular o desgaste do equipamento; e como este interfere no processo. De fato, esta é uma parte mais complexa do processo e requer muito mais informações (muito mais do que apenas as curvas granulométricas).

O efeito da coesão das partículas, da umidade, por exemplo, sobre o fluxo e seletividade do peneiramento, também é algo muito mais complexo (*CLEARY et al.,*

2018). Estas são as correntes de pesquisa mais atuais, que abordam modelagem e simulação também, porém num nível muito mais avançado da matemática e da física, se comparado ao plano das equações empíricas, “mais simples”, utilizadas para previsão de eficiência de peneiramento ou dimensionamento. Por outro lado, os modelos empíricos apresentam, justamente, como vantagem a simplicidade e ótimos resultados. Fazem parte de um conhecimento bem mais consolidado e, sendo muito práticas, são utilizadas para dimensionamento na quase totalidade das vezes no Brasil.

2.7. Dimensionamento dos Equipamentos

As peneiras são peças vitais e críticas em qualquer usina de beneficiamento (CARRISSO; CORREIA, 2004). Assim sendo, todo cuidado deve ser tomado na seleção de peneiras para que sejam de tamanho e tipo adequado.

Um equipamento de peneiramento é definido inicialmente pelas suas dimensões e pelo tipo de abertura (quadrada, retangular, circular, elíptica ou alongada). É preciso ressaltar que existe uma relação entre o tamanho máximo de partícula que pode passar numa determinada abertura e as dimensões do fragmento passante.

Ainda, as dimensões máximas mencionadas anteriormente não são as reais, pois uma partícula de tamanho “a” pode não passar através de uma abertura “a” (CARRISSO; CORREIA, 2004). Assim, em uma operação de classificação e peneiramento, de malha ou abertura “a”, dizemos que só irão passar partículas “Ka”, sendo K um fator de redução, tal que:

- Se $0 < K < 0,5$, as partículas passam livremente;
- Se $0,5 < K < 0,85$, as partículas passam com dificuldade e
- Se $0,85 < K < 1,00$, o material praticamente não passa pela abertura (fração crítica de separação).

Os dados necessários para seleção e dimensionamento de equipamentos são:

a) características do material a ser peneirado, tais como: densidade e umidade; forma das partículas; tamanho máximo da alimentação; presença de materiais argilosos; distribuição granulométrica; densidade e umidade; temperatura, entre outros;

- b) capacidade;
- c) faixas de separação do produto;
- d) eficiência desejada;
- e) tipo de serviço – lavagem, classificação final, classificação intermediária etc.;
- f) limitação ou não de espaço e peso;
- g) grau de conhecimento do material e do produto desejado.

Existem vários métodos (equações para modelar) desenvolvidos pelos fabricantes e todos eles são conservados segundo Chaves e Peres (2012)¹³. De qualquer forma, há duas considerações importantes e independentes a serem atendidas:

1-área necessária para a passagem do *undersize* deve ser provida;

2- Para haver estratificação satisfatória do leito é necessário assegurar que, na descarga, altura do leito seja no máximo quatro vezes a abertura da tela (na realidade esta altura máxima varia em função da densidade do minério).

Como as duas condições têm de ser atendidas, um dimensionamento, que apenas calcule a área, sem provisão para descarga do *oversize*, corre sérios riscos de estar errado.

Se o peneiramento for feito a úmido, a quantidade necessária de água é função principalmente da quantidade de lamas presentes na alimentação (CHAVES; PERES, 2012).

O método tradicional de avaliação do desempenho da peneira é a medida da capacidade (TEIXEIRA, 2013). A mais importante suposição, nessa aproximação, é que este parâmetro é diretamente proporcional a área de superfície.

A capacidade básica é especificada em toneladas curtas de alimentação por hora por metro quadrado de peneira. Esta quantidade é representada por I_U . O cálculo utiliza as condições de operações padrões usando um material padrão pré-definido. Como há mudanças na característica do material e nas condições de operação, a capacidade atual da peneira se altera. Irá aumentar para condições menos árduas e diminuir para condições mais intensas do que a padrão.

Essas alterações são representadas pelos fatores de capacidade (ou fatores modificadores), os quais multiplicam a capacidade unitária padrão da peneira para obter a capacidade real da peneira (KING, 2009).

Portanto, pode-se afirmar que a grande maioria dos formalismos para dimensionamento de peneiras vibratórias e revolventes constantes na literatura é variante do chamado método *Allis Chalmers* (LUZ; CARVALHO, 2005).

Esse método especificamente consiste em recorrer a uma curva de capacidade unitária padrão, em função da abertura efetiva da malha, a , e afetar o valor lido por fatores de correção devidos aos desvios das condições padronizadas, utilizadas pelos fabricantes quando do estabelecimento da curva de capacidade unitária padrão.

Área Total A - área total "A" pode ser definida por:

$$AUF = \frac{U}{CT_t} = \frac{U}{CdF_M} \quad Eq(14)$$

onde U é a quantidade de material passante na alimentação que atravessa a peneira por hora (t/h); CT_t é a capacidade teórica de transmissão da peneira. Ainda, C é capacidade básica de peneiramento (t/h x 0,0929m²); d é a massa específica aparente do material alimentado, em geral 1,6 t/m³, e F_m são os fatores modificadores.

2.8. Fatores modificadores e equacionamento

Os chamados fatores modificadores mostram que existem muitas variáveis e inter-relações entre essas variáveis que afetam o peneiramento de um dado material.

A taxa de capacidade de alimentação na peneira é dada por: I_u , K_1 , $K_2(\dots)$, ou seja, o produtório da capacidade básica (especificada em toneladas curtas de alimentação por hora) ou padrão unitário pelos diversos fatores modificadores, resultando na capacidade real.

$$I_u = \Pi K_i \times \frac{\text{tons}}{\text{hr. m}^2} \quad Eq(15)$$

A capacidade unitária básica varia primeiramente com o tamanho da abertura da peneira, com visto anteriormente: aberturas grandes estão aptas a lidar com grandes quantidades de material na alimentação. Uma típica relação entre I_U e o tamanho da malha é:

$$I_u = 0,783 h + 37 \text{ para } a \geq 25 \text{ mm Eq (16)}$$

$$I_u = 20h^{0,33} - 1,28 \text{ para } a < 25 \text{ mm Eq (17)}$$

onde I_U é em tons/hr.m² e “a” é o tamanho da malha em milímetros. Cada fabricante de peneira possui suas próprias correlações de capacidade de acordo com o tamanho da malha. As expressões acima são somente significativas para definir uma tendência típica.

Fator da área aberta - K_1

A condição padrão indica 50% de área aberta, a capacidade é proporcional a área aberta disponível.

$$K_1 = \frac{\% \text{ área aberta}}{50} \text{ Eq(18)}$$

Para materiais que possuem densidade menor que 800 kg/m³ a área de abertura padrão é 60% em vez de 50% e a equação anterior deve ser modificada de acordo.

Fator metade do tamanho - K_2

Alimentações que contém uma larga proporção de material que é consideravelmente menor do que a o tamanho da malha da peneira será guiado mais facilmente pela tela. A condição padrão é definida como 40% do material na alimentação é menor do que a metade do tamanho da malha, P^F (KING, 2009).

$$K_2 = 2P^f x(0,5) + 0,2 \text{ Eq (19)}$$

Fator Oversize - K₃

Uma peneira pode lidar com uma grande quantidade de material, no entanto, a alimentação precisa conter uma grande quantidade de material no *oversize*, ou seja, material maior que sua malha. Este material passa diretamente sobre a tela e não precisa ser transportado através da malha. Isto é considerado pelo fator *oversize* K₃, o qual possui o valor de uma unidade para a alimentação padrão contendo 25% de material *oversize*. Este fator aumenta muito rapidamente caso a fração de *oversize* aumente. Ele é dado por:

$$K_3 = 0,914 \exp[\exp(4,22 P^{f(a)} - 3,50)] \quad Eq (20)$$

Na equação anterior, P^{f*} é a fração de material na alimentação que possuem tamanhos maiores do que o tamanho da malha da peneira “a”. Isso é relacionado ao tamanho acumulado da função distribuição (fração passante acumulada) como indica abaixo:

$$P^{f*} = 1 - P^{f(h)} \quad Eq(21)$$

Fator densidade - K₄

Materiais densos serão transmitidos mais facilmente do que os mais leves. Um fator K₄ leva em conta este efeito quando a densidade *bulk*, ρ_B, difere do padrão de 1.600 kg/m³.

$$K_4 = \frac{\rho\beta}{1600} \quad Eq(22)$$

Fator posição do deck - K₅

Peneiras que estão em *decks* (plataforma) inferiores recebem o *undersize* da tela acima e pode lidar com menos material do que uma malha que recebe alimentação nova. A capacidade diminui conforme a posição para o fator K₅

$$K_5 = 1,1 - 0,1 S \quad Eq(23)$$

onde S representa a posição do *deck*, 1 para o *deck* superior, 2 para o segundo e assim por diante.

Fator ângulo da peneira - K_6

A inclinação padrão da peneira possui um ângulo de 15°. Inclinações menores aumentam a área projetada da abertura da tela no plano horizontal. Portanto a malha pode lidar com um carregamento maior. Isto é considerado pelo fator K_6 dada na equação abaixo:

$$K_6 = 1,0 - 0,01(\alpha - 15) \quad Eq(24)$$

onde α é o ângulo de inclinação em graus.

Fator peneiramento a úmido - K_7

O Peneiramento de material fino pode ser realizado a úmido, adicionando *sprays* com água ao longo da peneira. O fator K_7 considera este efeito.

$$K_7 = 1,0 + 2,4x 10^{-4}(25 - a)^{25} \quad \text{para } a \leq 25 \text{ mm} \quad Eq(25)$$

$$K_7 = 1 \quad \text{para } a > 25 \text{ mm} \quad Eq(26)$$

Fator forma da abertura - K_8

A peneira padrão tem abertura quadrada, outras formas influenciam a capacidade como é mostrado na Tabela 2 (fator de capacidade da peneira para diferentes aberturas).

Tabela 2: Fator de capacidade K_8

Tipo de Abertura	Fator K_8
Arredondada	0,8
Quadrados	1,0
Retangulares 2:1	1,15
Retangulares 3:1	1,2
Retangulares 4:1	1,25
Barras Paralelas	1,4

Fonte: Adaptado de KING (2009)

Fator forma da partícula - K_9

Partículas alongadas e argilosas (plásticas) são mais difíceis para peneirar do que as que são essencialmente isométricas. Se a alimentação contém aproximadamente 15% de argila ou partículas alongadas, o fator K_9 deve ser fixado em 0,9. Grandes quantidades, deste tipo de material, podem gerar sérios problemas e seria necessário ser investigado especialmente.

Fator umidade da superfície - K_{10}

Superfícies úmidas tendem a fazer as partículas se aderirem, fazendo com que a capacidade seja reduzida. O fator K_{10} considera este efeito de acordo com Tabela 3.

Tabela 3: Fator de capacidade K_{10}

Fator de capacidade K_{10}	
Condição de alimentação	K_{10}
Material molhado, lamacento ou pegajoso	0,75
Material de pedreira com superfície molhada, retirado de uma pilha com até de 15% de umidade por volume	0,85
Material britado seco	1
Material seco naturalmente ou artificialmente	1,25

Fonte: Adaptado de KING (2009)

2.8.1. Eficiência de transmissão

Vimos que, idealmente, a peneira deveria direcionar todo o material menor do que tamanho da tela para o *undersize*. Na prática, contudo, nem todo esse material passa através da tela e a fração que passa é referida como a eficiência. A eficiência é determinada primariamente pela alimentação real que está sendo carregada sobre a peneira com respeito à capacidade teórica de alimentação.

A eficiência de transmissão diminui se a peneira trabalhar com um excesso acima de 80% da tonelagem nominal, pois dificulta o contato entre partículas e superfície da tela. A eficiência também diminui à medida que a tonelagem da alimentação nominal cai abaixo de 80% da capacidade, pois as partículas tendem a pular e fazem pouco contato com a superfície da peneira.

Se A^R representa a alimentação real, então a estimativa da taxa (RR) é obtida por:

$$RR = \frac{A^r}{I_U \Pi_i K_i (\text{área da peneira})} \quad \text{Eq(27)}$$

E a eficiência de transmissão é dada por:

$$e = 0,95 - 0,25(RR - 0,8) - 0,05(RR - 0,8)^2 \quad \text{Eq (28)}$$

para $RR \geq 0,8$ Eq. (28) ou

$$e = 0,95 - 1,67(0,8 - RR)^2 \quad \text{Eq (29)}$$

para $RR < 0,8$ Eq. (29)

A atual tonelage m passante para o fluxo do *undersize* é:

$$A^U = eP^F(a)A^F \quad (30)$$

Cada classe de tamanho menor do que a malha está sujeita a mesma eficiência do fator “e”, então a distribuição granulométrica das partículas no fluxo do *underflow* é calculada como (forma discreta):

$$P_i^U = \frac{eP_i^F A^F}{eP^F(a)A^F} = \frac{P_i^F}{P^F(a)} \quad \text{para } d_{pi} < a \quad \text{Eq (31)}$$

$$P_i^U = 0 \quad \text{para } d_{pi} \geq a \quad \text{Eq (32)}$$

Onde P_i^U é a fração do fluxo do *undersize* na classe de tamanho i e P_i^F essa fração no fluxo de alimentação.

A real tonelage m passante para o fluxo do *overflow* é:

$$W^O = (1 - P^F(a))A^F + (1 - e)P^F(a)A^F \quad \text{Eq. (33)}$$

$$W^F = A^F(1 - eP^F(a)) \quad \text{Eq. (34)}$$

E a distribuição granulométrica discreta no fluxo do *overflow* é dada por:

$$P_i^O = \frac{(1-e)P_i^F}{(1-eP^F(a))} \quad \text{para } d_p < a \quad \text{Eq (35)}$$

$$= \frac{P_i^F}{(1-eP^F(a))} \quad \text{para } d_p \geq a \quad \text{Eq (36)}$$

Finalmente, importante dizer que estas foram as principais equações utilizadas neste trabalho, também, por meio do *software ModSim* Fonte: adaptado de KING (2009) para prever eficiência, DGs e dimensionar as peneiras do estudo de caso.

2.9. Estudos de casos com *Stack Sizers*

A seguir foram realizadas análises de alguns estudos de casos envolvendo o uso de peneiras de alta frequência (*Stack Sizers*).

2.9.1. Estudo de caso 1

Mina Colquijirca - Sociedad Minera El Brocal S.A.A. (AQUINO; VIZCARRA, 2007 apud VALINE et al., 2009) - Tinyahuarco, Pasco Province, Peru.

A planta que produz chumbo, zinco, cobre e ouro, operava com 03 moinhos de barras em paralelo e em circuito aberto, seguido por 03 moinhos de bolas em paralelo e em circuito fechado com um banco de 10 hidrociclones de 10 polegadas. A descarga dos dois circuitos de moagem é direcionada para uma mesma caixa de bomba de polpa e este material era bombeado para a alimentação dos hidrociclones. A carga circulante deste circuito chegava a 350% e, como consequências, ocorriam perdas significativas antes do circuito de flotação. A *Brocal* desejava aumentar a capacidade da planta e já planejava a adição de mais 01 moinho de bolas. Foi quando surgiu a ideia de buscar alternativas de aumentar a eficiência da moagem. Foram realizados testes com peneiras *Stack Sizers* e os resultados foram animadores.

Com base nestes resultados a *Brocal* instalou duas peneiras *Stack Sizers* de 05 *decks* com telas de uretano com abertura de 0,5 mm, em substituição ao banco de 10 hidrociclones. O resultado foi um aumento de 11% na produção e 9% na recuperação de chumbo. Com isto, além de não ter que instalar o 4º moinho de bolas, foi possível desligar 02 dos 03 moinhos de bolas que estava operando.

Como o objetivo principal da *Brocal* era aumentar a capacidade da planta, 01 dos 02 moinhos de bola que foram desligados, voltou a operar.

A produção aumentou de 138 t/h com o circuito de hidrociclones para 245 t/h com o circuito das *Stack Sizers*, consumindo menos energia, pois o número de moinhos de bolas em operação reduziu de 03 para 02. Outro ganho significativo foi a redução da

presença de partículas menores que 10 μ m de 18% para 10% na alimentação da flotação. Vale ressaltar que o teor do concentrado em ambos os casos foi semelhante.

2.9.2. Estudo de caso 2

PhosAgro - OJSC Apatit— division of *PhosAgro*, is a phosphate producer located in the *Murmansk Region of the Kola Peninsula in Russia* (VALINE et al., 2009).

A planta de produção de fosfato da Apatit opera com várias linhas de moinhos de bolas em estágio único e em circuito fechado com classificadores de espiral ou hidrociclones. Várias linhas de moagem descarregam na mesma caixa de bomba de polpa, de onde o material é bombeado para a alimentação dos hidrociclones.

O *overflow* destes hidrociclones alimenta o circuito da flotação. Com o objetivo de melhorar a eficiência da moagem e aumentar as taxas de produção, foram feitos testes utilizando peneiras *Stack Sizers* em substituição aos hidrociclones. Os testes foram promissores e a Apatit decidiu modificar uma das linhas de produção existente para fazer os testes em escala industrial. A linha de moinho escolhida para a realização das modificações tinha uma produção de 95 t/h e uma carga circulante de 430%. Com a instalação de 04 peneiras *Stack Sizers* de 05 *decks* com tela de 0,39 mm em substituição aos hidrociclones a taxa de alimentação aumentou de 95 para 124 t/h e a carga circulante reduziu de 430 para 130%. Houve também uma redução no consumo de energia por toneladas na ordem de 20 a 25%. A classificação do produto obtido no circuito da flotação é similar, embora a alimentação da flotação estivesse mais grosseira. A Apatit já planejava substituir os hidrociclones de duas das suas principais linhas de produção por peneiras *Stack Sizers*, objetivando aumentar 30% da capacidade da planta com menos horas de operação da moagem.

2.9.3. Estudo de caso 3

Minera Cerro Lindo Minera - *located southwest of Lima, Peru* (VALINE et al., 2009).

A planta de concentração da Minera Cerro Lindo no Peru, produz cobre, zinco e chumbo. O circuito de moagem consiste de um moinho de 14,5ft (pés) por 24,5ft (pés) operando em circuito fechado com um banco de hidrociclones de 26 polegadas. A carga circulante atinge 260%. Buscando melhorar a eficiência da moagem e aumentar a taxa de produção, a Cerro Lindo fez testes em grande escala. Baseando-se nos resultados destes

testes, foram instaladas 04 peneiras *Stack Sizers* no lugar dos hidrociclones de 26 polegadas. Três destas peneiras foram instaladas com tela de uretano com abertura de 0,23mm e uma peneira com tela de uretano com abertura de 0,18mm. O resultado do circuito com a operação das peneiras *Stack Sizers* foi excelente, reduziu a carga circulante de 260% para 108% e com isto foi possível aumentar a produção de 242t/h em 13,6%, chegando a 275 t/h. Dois outros benefícios foram percebidos com a implantação das peneiras *Stack Sizers*: um destes foi a redução do percentual de partículas menores de 75 μm na alimentação da flotação.

2.9.4. Estudo de caso 4

Nióbio – Araxá - Silvia A.C., 2015 (dissertação de mestrado).*

No processamento do rejeito, a primeira etapa do processamento inicia-se com um circuito de classificação e moagem, onde o *underflow* era descartado para barragem de rejeitos. Com a conclusão dos estudos verificou-se que 55% do produto *underflow* era composto por partículas menores que 100 μm , podendo então ser direcionado para próxima etapa de beneficiamento, pois apresentava, em sua composição química um teor considerável de níobio e relativamente baixa concentração de sílica. Em função desse estudo surgiu a necessidade de se criar um circuito de classificação e moagem, utilizando além dos hidrociclones, as peneiras de alta frequência a fim de reutilizar a fração antes rejeitada. No processamento mineral as peneiras sempre foram largamente utilizadas para separar as partículas mais grossas. Para tanto na separação de partículas finas, sua aplicação sempre foi considerada impraticável e antieconômica devido a três fatores básicos, tais quais: baixa capacidade, alto desgaste das telas e entupimento.

Com a implantação das peneiras de alta frequência a recuperação da fração mais fina foi alcançada, porém após acompanhamento do processo, notou-se uma diminuição da eficiência produtiva devido ao acúmulo de sedimentos nas telas. Para solucionar tal problema é necessário que seja feita a troca das telas, gerando assim um aumento no custo devido à realização de paradas para manutenções e ainda o custo de aquisição de novas telas. Esse trabalho tem como objetivo a elaboração de um método de limpeza eficaz, com o intuito de reutilizá-las, gerando assim um aumento da eficiência do peneiramento.

2.10. Escrubagem

A operação de escrubagem de minérios é definida por Taggart (1945) como sendo a desagregação por meio de forças relativamente leves. Tais forças podem ser comparadas com os esforços usuais em cominuição, e devem ser suficientes para reduzir materiais razoavelmente moles e inconsolidados, tais como argilas. Também devem ser capazes de separar grãos unidos entre si por ligações brandas, geradas, por exemplo, na cimentação natural ocorrida com certos minérios ou na precipitação de sais.

Segundo Trajano (1966), por lavagem (*washing*) de minérios, entende-se a separação de dois constituintes desses minérios que difiram distintamente em granulometria. Na maioria das vezes, o constituinte mais fino, geralmente argila ou material argiloso, encontra-se mais ou menos aglomerado ou aderido ao constituinte grosseiro, que é quase sempre o mineral valioso, salvo casos especiais ou quando o beneficiamento é da própria argila. Nessas condições, a escrubagem compreende um estágio prévio, ou simultâneo à lavagem, de desagregação do minério com água, a fim de se individualizarem as micropartículas da argila e limpar as partículas grosseiras do outro mineral da argila aderida.

O equipamento utilizado para realizar tal processo é conhecido como *scrubber*. Segundo Varela (2009), a principal justificativa para utilização de equipamentos de escrubagem e lavagem, em plantas de processamento de materiais, é a remoção de partículas finas. Estas partículas, normalmente, são consideradas uma fração indesejável, diminuindo o valor agregado do produto, e encontram-se aderidas às partículas minerais de maior tamanho, sendo imprescindível a sua retirada do processo. Muitas vezes, essa contaminação por finos encontra-se na forma de aglomerados, que necessitam ser quebrados, dissolvidos e, por fim, separados da fração grossa.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

3.1. Localização da jazida e da usina

Este trabalho foi desenvolvido na Mina de Manganês do Azul que está situada na região amazônica, na Floresta Nacional de Carajás – no município de Parauapebas/PA, Brasil.

O acesso à cidade de Parauapebas é feito a partir de Marabá pela PA 275 em direção a Canaã dos Carajás.

A Figura 35 mostra o mapa de localização da Província Mineral de Carajás e do Depósito de Manganês do Azul.



Figura 35: Localização, Província Mineral de Carajás.

Fonte: COSTA, M. L. et al. (2005)

A Figura 36 mostra a localização das cavas, pilhas de estéril, pátio de produtos e outras infraestruturas associadas à atividade de mineração em imagens de satélite ou fotos aéreas.

A extração do minério de manganês na Mina do Azul foi iniciada em 1985 com uma produção de 235.000 toneladas e atingiu sua capacidade máxima anual em 2005 com **2.238.000 toneladas produzidas**.

Atualmente a Mina de Manganês do Azul é composta por 03 minas (Figura36), todas já estão com o seu nível mais baixo, abaixo do lençol freático. Para que a lavra seja possível de ser realizada nestes pontos das minas, é necessário que seja feito o bombeamento da água 24 horas por dia.



Figura 36: Imagens da Mina de Manganês do Azul.

Fonte: COSTA, M. L (2005).

A Figura 37 mostra o gráfico com os dados históricos da produção da Mina de Manganês do Azul desde o início da produção.

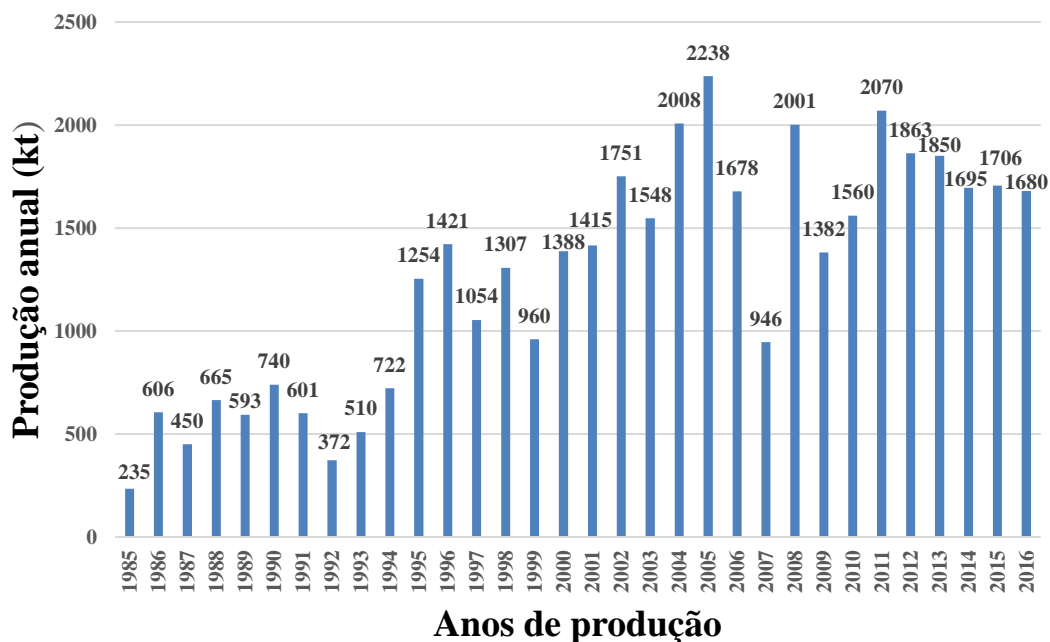


Figura 37: Dados de produção

Fonte: Vale S.A. (2017)

O minério (ROM) retirado da mina é enviado para a Usina de Tratamento de Minério - O material que não aproveitado no processo de beneficiamento é denominado rejeito e é descarregado na barragem conhecida como Barragem do Azul (barragem construída no método a jusante).

A Figura 38 mostra o fluxo operacional da Mina de Manganês do Azul.



Figura 38: Fluxo Operacional do Manganês do Azul.

Fonte: Vale S.A. (2017)

As minas são lavradas a céu aberto através de bancadas, e o desmonte das rochas em sua maioria é mecânico, porém, em algumas situações, é necessária a utilização de explosivos em locais onde as rochas são mais resistentes. A atividade de lavra tem uma movimentação total próximo de **11.000.000 t/ano, composta de: ROM (Run of Mine), de solos e rochas sem valor econômico**, sendo estes dois últimos **dispostos em pilhas de estéril**. Portanto com uma REM (relação estéril e minério) da ordem de 3x1.

O preço do minério de Manganês no mercado internacional tem oscilado muito nos últimos anos, mas os valores médios do preço (*FOB China*) têm ficado na ordem de US\$ 5,65 a US\$ 6,34 *dmtu (dry metric tons unit)* ou unidade de manganês por toneladas métricas seca. Isto para minérios com os teores variando conforme descrito a seguir:

Teor de manganês entre 37% a 44%; teor de ferro entre 3,7% a 5,1%, teor de sílica entre 2,3% a 4,5%, teor de fósforo < 0,10% e baixos teores de alumina e álcalis.

3.2. Geologia Regional

A Província Mineral de Carajás é formada basicamente por terrenos geológicos do Arqueano-Proterozóico conforme apresentado na (Figura 39).

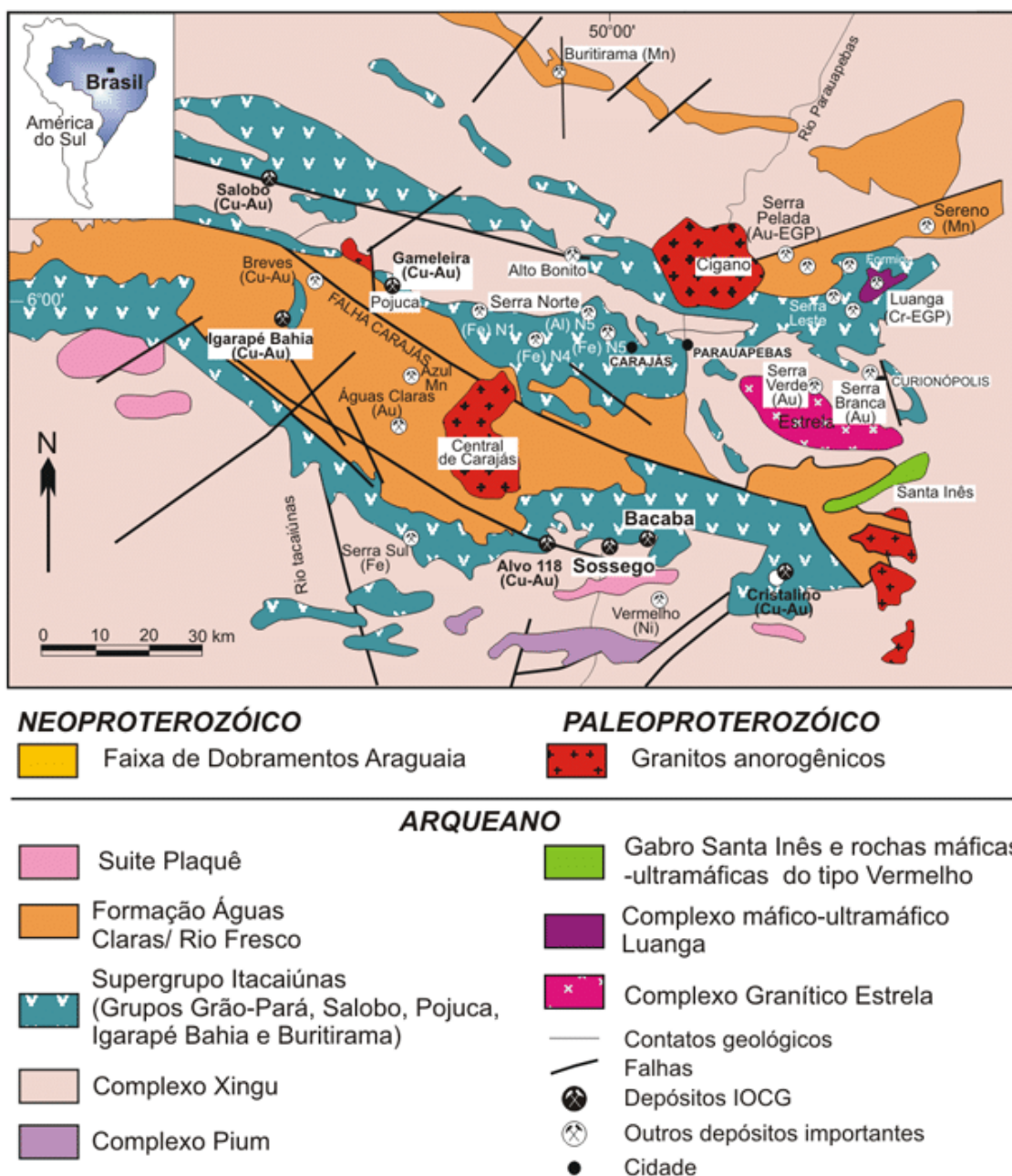


Figura 39: Geologia da Província Mineral de Carajás.

Fonte: Dardenne & Schobbenhaus, (2001).

A Província Mineral de Carajás como parte do Cráton Amazônico compreende:

- ao Sul, os terrenos Granito-Greenstones do Rio Maria, assim constituídos: Greenstonesbelts do Supergrupo Andorinhas e o Tonalito Arco Verde com 2,97-2,90 Ga (PIMENTEL; MACHADO, 1994); intrudidos por granitoides com 2,87 Ga (MACAMBIRA; LANCELOT, 1996e LEITE, 2001).

- ao Norte, o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Araújo et al.,1988), que compreende o embasamento arqueano formado por complexos gnáissicos e granulíticos com 2,85-3,00 Ga (MACHADO et al., 1991; AVELAR et al., 1999; PIDGEON et al., 2000), intrudido por vários corpos graníticos arqueanos deformados da Suíte Plaquê - 2,73 Ga (AVELAR et al., 1999);

- e o Supergrupo Itacaiúnas constituído pelos grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Buritirama, Igarapé Bahia e Grão Pará com 2,76 Ga (WIRTH et al., 1986; MACHADO et al., 1991; MACAMBIRA et al., 1999; TRENDALL et al., 1998), todos compostos por sequência Vulcano -sedimentares.

Destaca-se ainda o magmatismo máfico, também proterozóico, estabelecido amplamente nas formações ferríferas bandadas. Extensa cobertura metassedimentar arqueana e paleoproterozóica, principalmente clástica marinha a fluvial, denominada Formação Águas Claras (NOGUEIRA et al., 1995) abrange grande área da PMC. Nessa cobertura encontra-se o minério de manganês primário ou laterítico.

3.3. Geologia Local

Uma característica predominante da planície Amazônica na região de Carajás é o seu relevo dominado por grandes platôs, com altitude variando em 600 e 800 m em relação ao nível do mar. O depósito de manganês do Azul está situado na aba Norte de um destes platôs, mais especificamente do conjunto de platôs na borda norte ocidental do granito central, com superfície que pode alcançar uma área igual a 5 por 1 km, estando aproximadamente a 10 km ao Sul dos platôs de N4 constituídos de minério de ferro. As minas de manganês estão em um platô que tem a forma de cotovelo, com duas direções principais: noroeste-sudeste e noroeste-sudoeste, conforme mostra a Figura 40.

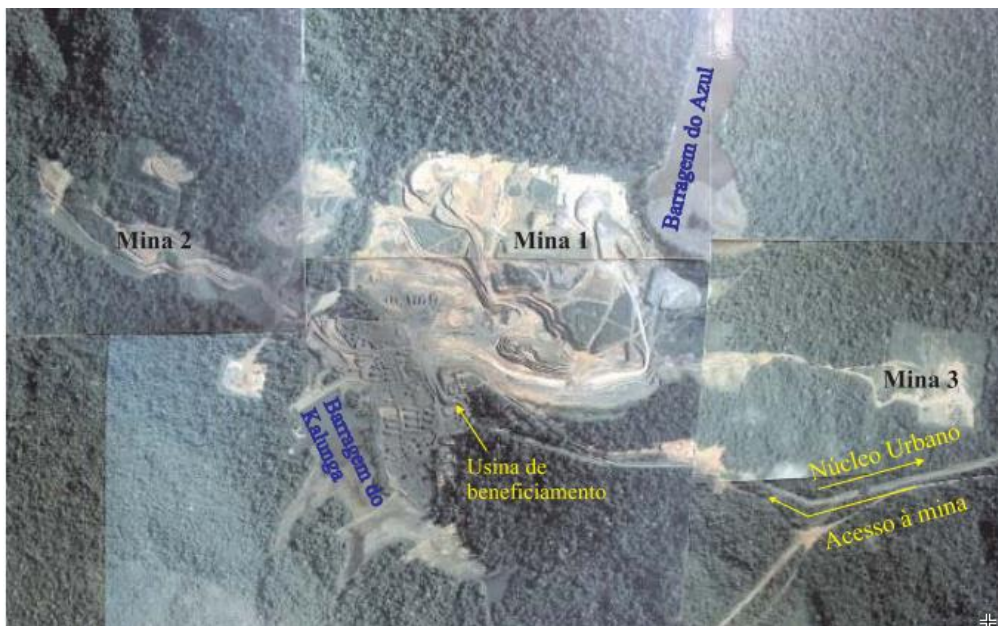


Figura 40: Minas do Azul, Mosaico (2002)

Fonte: COSTA et al. (2005)

A Figura 40 mostra um mosaico composto por fotografias aéreas mostrando as minas de manganês do Azul (minas 1, 2 e 3 bem como as barragens de rejeito e a área da instalação de beneficiamento do minério), o seu entorno tanto sobre o platô como nas suas encostas e áreas adjacentes. A Figura 41 mostra a atualização da área pelo *Google Earth* (2017).



Figura 41: Minas e Barragem do Azul.

Fonte: *Google Earth*, 2017

A Formação Água Claras comporta a mineralização e o protominério de manganês da mina do Azul, ocupando praticamente toda a área das minas. As rochas encaixantes e as mineralizadas são essencialmente pelitos (siltitos e argilitos) com diferentes graus de litificação, podendo estar localmente deformados por falhamentos e dobramentos relacionados à Falha Carajás.

A área da mina de manganês do Azul e adjacências compreende rochas da Formação Águas Claras, diques de rochas básicas e o Granito Central de Carajás.

A Formação Água Claras pode ser dividida em dois membros: o inferior, composto por argilitos e siltitos, depositados em sistema de plataforma marinha e superior, representado por arenitos e conglomerados de origem fluvial e litorâneos de água rasas (NOGUEIRA, 1995). Segundo Pinheiro (1997), estas rochas devem ter sido depositadas em plataforma marinha afetada por tempestades.

Os diques de rochas básicas têm direção geral NNE-SSW e NW-SE e espessuras variando entre 10 a 15 m, podendo chegar até 200 m. Estes seccionam a Formação Água Claras. Os diques são, geralmente, tabulares ou sub-tabulares, estão bastante intemperizados e apresentam coloração vermelha escura a amarela. Os diques podem seguir o acamadamento dos sedimentos pelíticos em até 60° (COSTA, 2002).

O Granito Central de Carajás ocorre sob a forma de batólito, com 22 x 12 km, situação na parte central do Sistema de Falhamento de Carajás (BERNARDELLI; BEISIEGEL, 1978). Na zona de contato, as rochas encaixantes da Formação Águas Claras apresentam ligeiro metamorfismo de contato ocasionado durante sua colocação.

A Figura 42 mostra a imagem de satélite Landsat da região de Carajás.

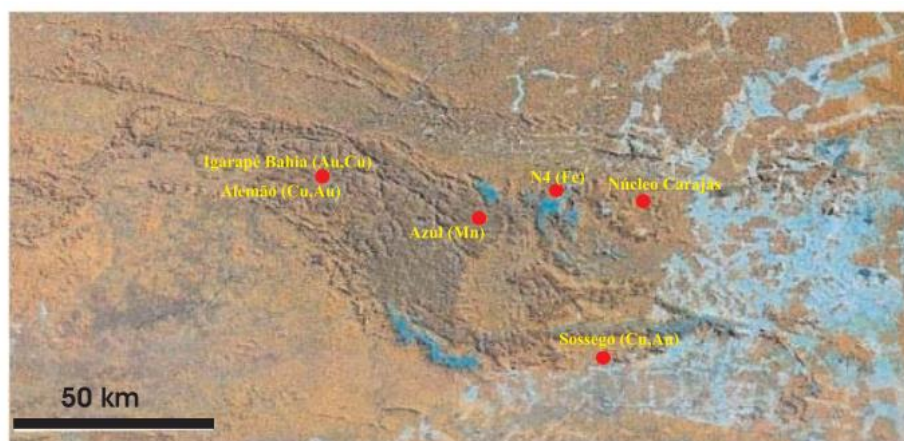


Figura 42: Região de Carajás, Imagem de satélite.

Fonte: COSTA et al. (2005)

Grande parte dos terrenos superficiais das minas de manganês do Azul está estabelecida sobre materiais lateríticos, aflorando principalmente como crostas de ferro aluminosas, crostas manganesíferas. São materiais argilosos (solos), e seus produtos de alteração intempérica química e física destacam-se como esferolitos ou detriticos. Os sedimentos lacustres ocorrem em depressões sobre as crostas lateríticas compactas e não desmanteladas. Em parte, continuam se acumulando em lagos pequenos instalados sobre estas mesmas crostas (COSTA et al., 2005).

A Tabela 4 mostra dados de tonelagem e teor de manganês da reserva de Manganês da Mina do Azul, conforme modelo geológico de 2014 para 2016.

Tabela 4: Reserva de Mn do Azul.

Reserva do Azul							
Provadas		Prováveis		Total 2016		Total 2015	
Mt	Mn (%)	Mt	Mn (%)	Mt	Mn (%)	Mt	Mn (%)
35,9	28,5	2,0	25,5	38	28,4	43,6	29,3

Fonte: VALE S.A

A recuperação média das reservas é de 39%; a tonelagem é indicada em milhões de toneladas métricas e declarada em base úmida. A reserva total inclui 4,5 milhões de toneladas métricas de minério da barragem de rejeitos de Mn do Azul. A Figura 43 mostra a distribuição litológica do ROM da mina de Manganês do Azul, modelo geológico de 2014.

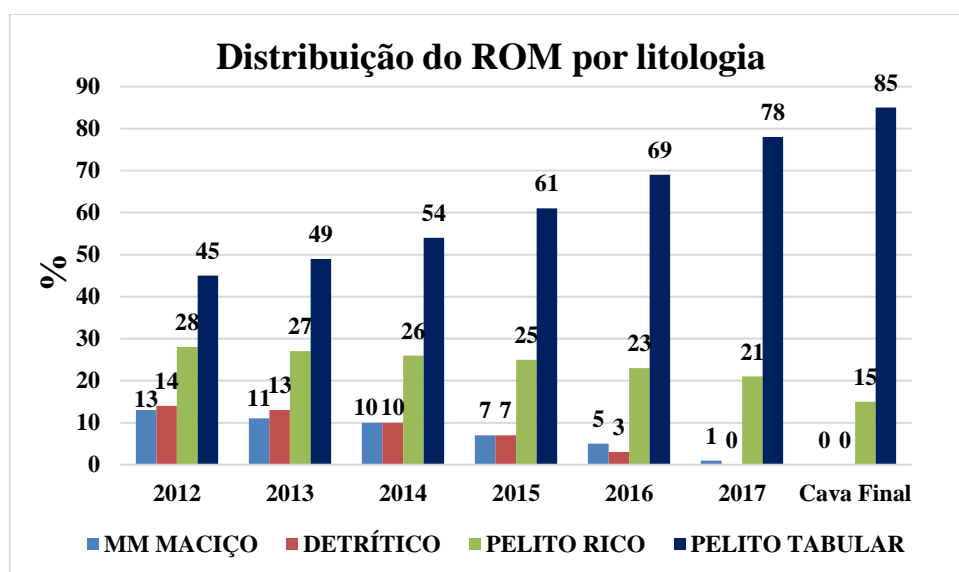


Figura 43: Distribuição ROM por litologia.

Fonte: GADON (2016)

A Tabela 5 apresenta as litologias, os produtos semiacabados e o rejeito da usina, na Mina de Manganês do Azul com os valores médios de densidade.

Tabela 5: Dados das litologias, ROM e produtos

Densidade de sólidos						
Litologia	Densidade real (g/cm ³)					Densidade de polpa (média)
	ROM	Granulado	Médio Granulado	Sínter Feed	Rejeito	Rejeito
Bióxido Metalúrgico	3,82	4,14	4,13	4,03	2,98	1,14
Bióxido Químico	4,06	4,22	4,29	4,17	3,43	1,16
Detritico	3,56	3,05	3,81	3,59	2,77	1,18
Pelito Rico	3,3	3,72	3,96	3,74	3,12	1,19
Pelito Tabular	3,2	2,99	3,3	3,52	2,81	1,20
Média	3,56	3,62	3,9	3,81	3,02	1,18
Pelito Siltito	2,98	3,05	3,21	3,42	2,81	1,20

Fonte: VALE S.A

A Tabela 6 mostra os dados sobre o início de operação de cada mina de Manganês da Vale e data prevista da exaustão de cada uma destas minas.

Tabela 6: Dados da mina de Manganês da Vale

Mina de Manganês da Vale				
Mina	Tipo	Operando desde	Data Prevista Exaustão	Participação da Vale (%)
Azul	A céu aberto	1985	2032	100
Urucum	Subterrânea	1976	2032	100
Morro da Mina	A céu aberto	1902	2049	100

Fonte: VALE S.A

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada consistiu, primeiramente, em coletar informações para descrever e compreender o circuito da usina do Manganês do Azul antes e depois da instalação das peneiras *Stack Sizer*.

4.1. Amostragens

Foram feitas amostragens para verificar o desempenho e a eficiência da nova rota do circuito de finos da usina mencionada. Os pontos de coleta principais foram na alimentação e no *oversize* de cada deck da peneira *Stack Sizer* (Figura 44). Foi amostrado também o rejeito final, que engloba o *undersize* de cada *deck* da peneira *Stack Sizer* e o *undersize* da peneira plana desaguadora, (Figura 45). Estas amostragens foram feitas em intervalos de 30 em 30 minutos em um período de 04 horas.

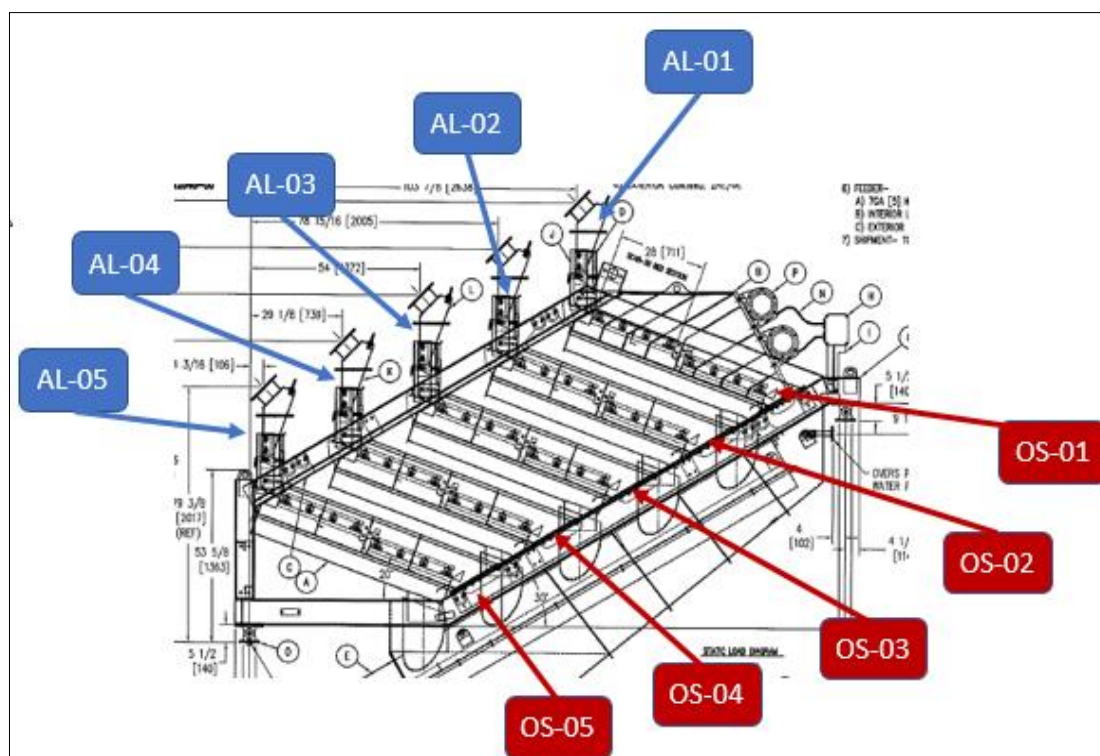


Figura 44: Pontos de amostragem.

Fonte: GADON (2016)

Neste intervalo de 04 horas a usina processou 1.200 toneladas de ROM. Estas geraram 576 toneladas de rejeito; destas, aproximadamente 50% passaram pelas peneiras *Stack Sizer* e foram amostradas conforme citado acima. Os outros 50% desta massa de rejeito retornaram ao tanque de rejeito sem passar pelo peneiramento. Isto acontece porque, somente foi implantado a 1ª etapa do projeto. Em cada ponto amostrado na alimentação dos *decks* da peneira *Stack Sizer*, foram coletados em média 13,8 kg de amostra. Já no *oversize* de cada *deck* foram coletados em média 7,8 kg de amostra.

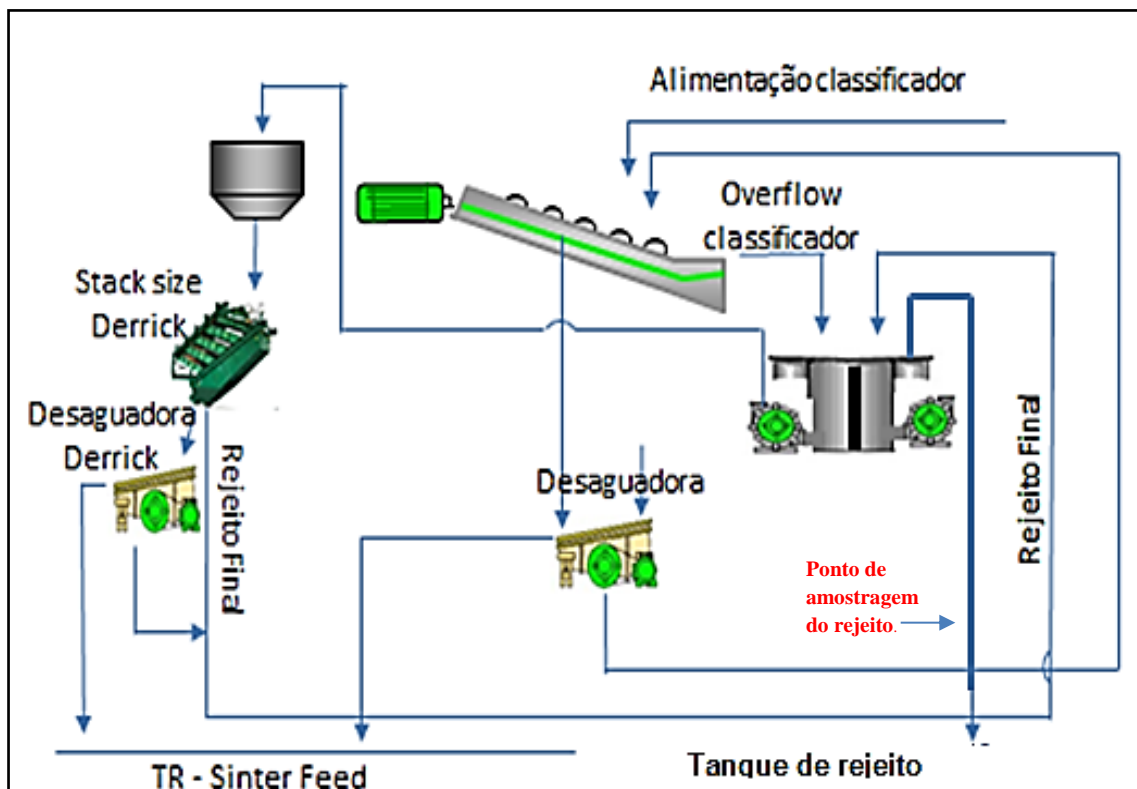


Figura 45: Local de amostragem do rejeito final.

Fonte: GADON (2016).

Nestas amostragens, buscou-se conhecer a densidade de polpa, o percentual de sólidos, qualidade química e física destes pontos amostrados. Os valores de densidade de polpa da alimentação (AL), do *oversize* (OS) e do rejeito final estão na Figura 46.

Os resultados do percentual de sólidos da alimentação e do *oversize* de cada *deck* da peneira *Stack Sizer* está apresentado na Figura 47. Esta, apresenta também o resultado do percentual de sólidos do rejeito final.

Pode-se notar nesta figura que o percentual de sólidos do rejeito final é inferior ao percentual de sólidos da alimentação dos *decks* da *Stack sizers*, ocasionado pela redução da perda das partículas + 0,15 mm descartadas para a barragem do azul.

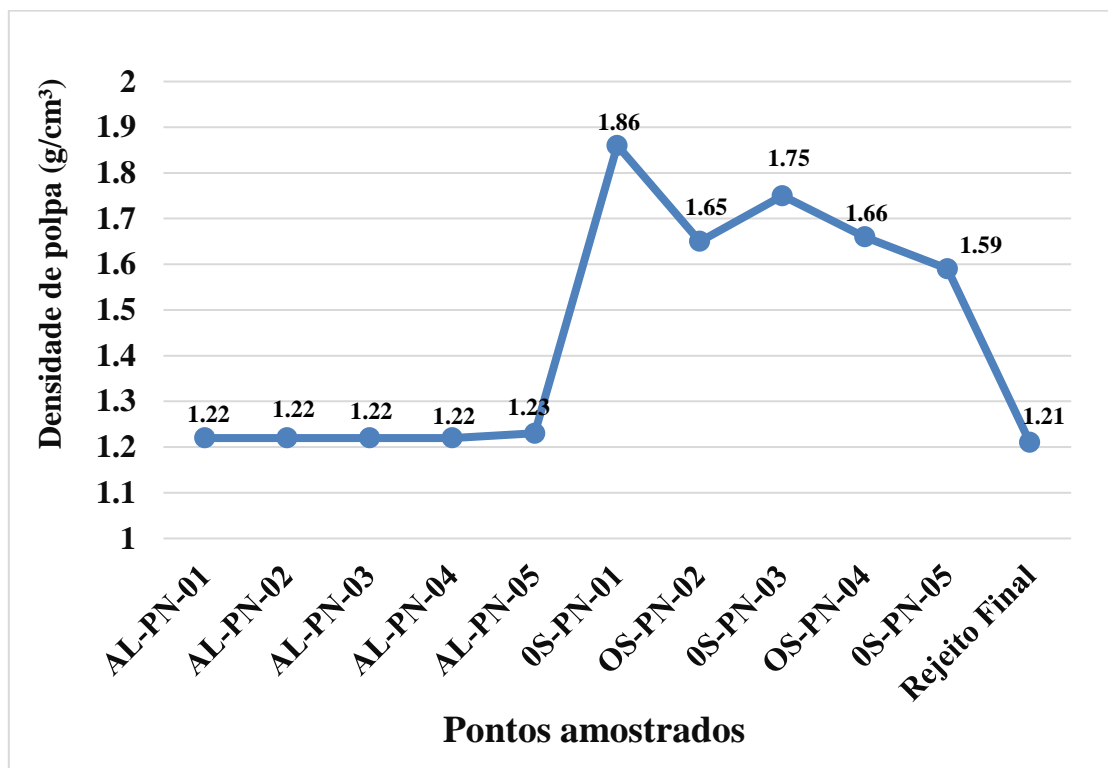


Figura 46: Dados de densidade de polpa.

Fonte: GADON (2016).

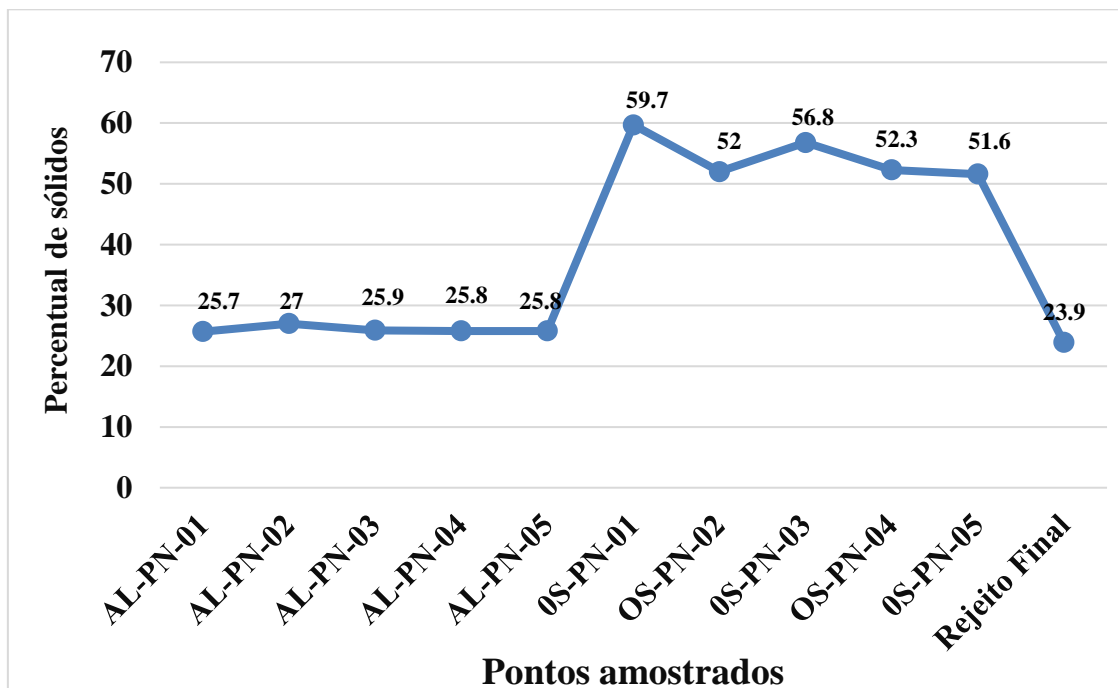


Figura 47: Dados do percentual de sólidos

Fonte: GADON (2016)

Estão dispostos na Tabela 07 os resultados da qualidade química existente na alimentação e no *oversize* de cada *deck* da peneira *Stack Sizer*.

Tabela 07: Resultados químicos, recuperação mássica e metalúrgica.

Resultados químicos, recuperação mássica e metalúrgica.												
Descrição da amostra	AL-PN-01	AL-PN-02	AL-PN-03	AL-PN-04	AL-PN-05	OS-PN-01	OS-PN-02	OS-PN-03	OS-PN-04	OS-PN-05	Rejeito Final	
Resultados Químicos (%)	Mn	15,54	16,16	16,15	16,29	15,74	32,23	31,13	32,28	32,00	30,74	13,30
	Al ₂ O ₃	20,62	20,55	20,52	20,62	20,28	9,38	10,76	9,55	10,38	10,98	20,55
	SiO ₂	33,54	33,32	33,23	33,80	32,91	20,53	22,02	21,46	20,95	21,13	35,82
	P	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Fe	5,89	5,90	5,87	5,93	5,87	4,59	4,86	4,60	4,80	4,90	6,01
	TiO ₂	0,700	0,702	0,694	0,704	0,698	0,414	0,457	0,425	0,453	0,472	0,708
	CaO	0,078	0,082	0,086	0,082	0,090	0,156	0,146	0,152	0,155	0,149	0,068
	MgO	0,498	0,494	0,512	0,469	0,496	0,602	0,561	0,572	0,567	0,545	0,424
	K ₂ O	0,713	0,727	0,730	0,741	0,717	1,107	1,085	1,134	1,090	1,044	0,692
	Cu	0,065	0,066	0,066	0,064	0,064	0,069	0,071	0,071	0,072	0,070	0,064
	Co	0,066	0,066	0,067	0,065	0,065	0,071	0,070	0,066	0,072	0,070	0,064
	Ni	0,070	0,071	0,071	0,071	0,070	0,079	0,079	0,080	0,079	0,076	0,068
	Pb	0,151	0,146	0,149	0,140	0,148	0,059	0,067	0,061	0,060	0,063	0,106
PPC	16,28	16,17	16,19	15,81	16,44	15,38	15,21	15,06	15,34	15,68	16,14	
Rec. massa (%)	x	x	x	x	x	11,00	11,70	10,70	11,90	11,10	x	
Rec. met. (%)	x	x	x	x	x	24,54	30,90	30,01	31,41	27,32	x	

Fonte: GADON (2016)

Também na Tabela 7, está apresentado o resultado do rejeito final (*undersize*) das peneiras *Stack Sizer* e da peneira desaguadora plana. Estes resultados são extremamente importantes para confirmação da redução da perda de manganês para o rejeito final, através das partículas + 0,15 mm. Pode-se notar que há uma redução média de 2.67 pontos percentuais do manganês existente na alimentação dos *decks* da *Stack Sizer* para o percentual de manganês presente no rejeito final. Outro ponto bastante significativo é o

percentual de alumina que reduz de uma média de 20,51 na alimentação dos *decks* da peneira *Stack Sizer* para 10,30 no *oversize* destes mesmos *decks*. O mesmo acontece com o percentual de sílica que na alimentação do *deck* chega a 33,80 e, no *oversize*, este reduz para o patamar de 21,30.

As Figuras 48 e 49 apresentam os resultados granulométricos do 1º *deck* da peneira *Stack Sizer* (GADON, 2016) Nestes resultados, nota-se um aumento expressivo do percentual das partículas + 0,15 mm retidas no *oversize* das telas do 1º *deck*. Todas análises granulométricas foram realizadas com amostras processadas em alíquota seca (sem umidade), em micropeneiramento (peneiramento série fina, com telas ≤ 4 mm).

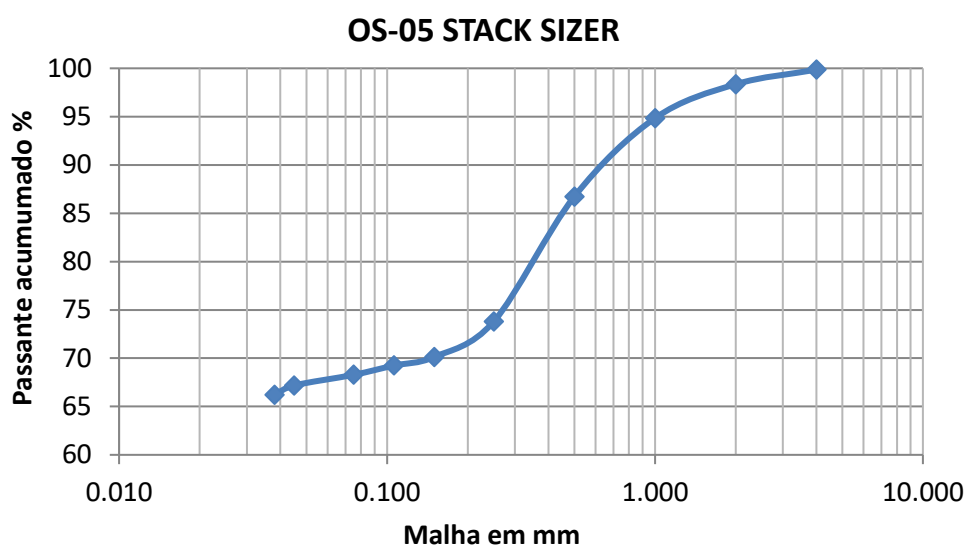


Figura 48: Dados da alimentação do 1º *deck*.

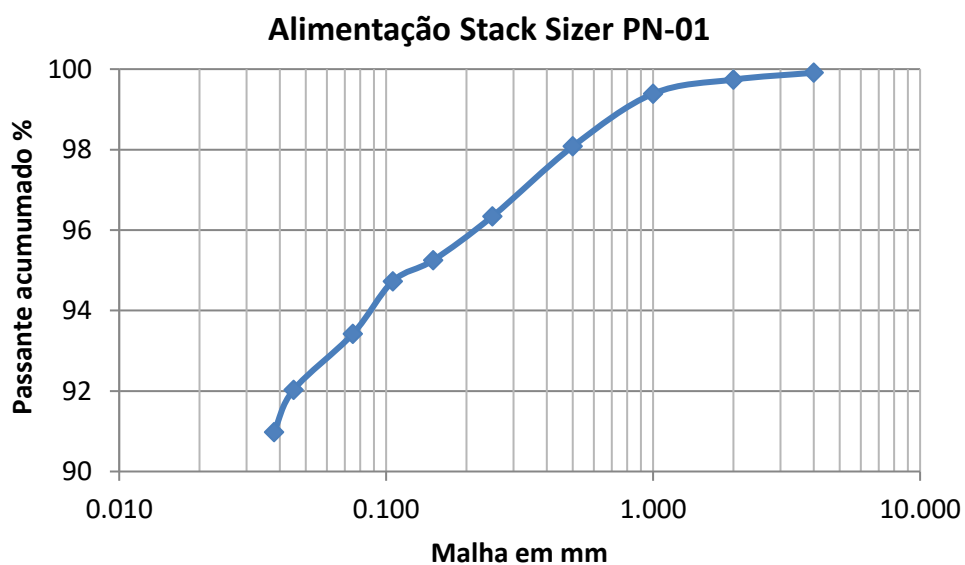


Figura 49: Dados da amostra de *oversize* do 1º *deck*.
Fonte: GADON (2016).

Analisando os dados das Figuras 48 e 49, é possível observar que foi recuperada neste *deck* da peneira de alta frequência, 96,3% da massa existente na fração + 0,15 mm da alimentação. Reduzindo de 0,74 t/h para 0,03 t/h as partículas + 0,15 mm do rejeito final. Neste *deck*, a recuperação mássica total obtida no *oversize* foi de 11%, o que representa um acréscimo de 1,65 t/h na produção da usina, somente neste *deck* da peneira de alta frequência. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8: Dados do 1° deck

	<i>Feed</i>	<i>Oversize</i>	<i>Undersize</i>
t/h	15	1,65	13,35
t/h +0,15mm	0,74	0,69	0,03

Fonte: O autor

Os resultados granulométricos do 2° *deck* da peneira *Stack Sizer*, estão dispostos nas Figuras 50 e 51 (GADON, 2016). Ao analisar estes resultados, nota-se uma menor retenção das partículas + 0,15mm neste *deck* em comparação ao 1° *deck*. Isto em grande parte, provocado pela maior taxa de alimentação deste *deck*, esta diferença é 5 t/h a mais. No entanto, há um aumento expressivo da recuperação mássica: o *oversize* das telas do 2° *deck* foi de 2,3 t/h.

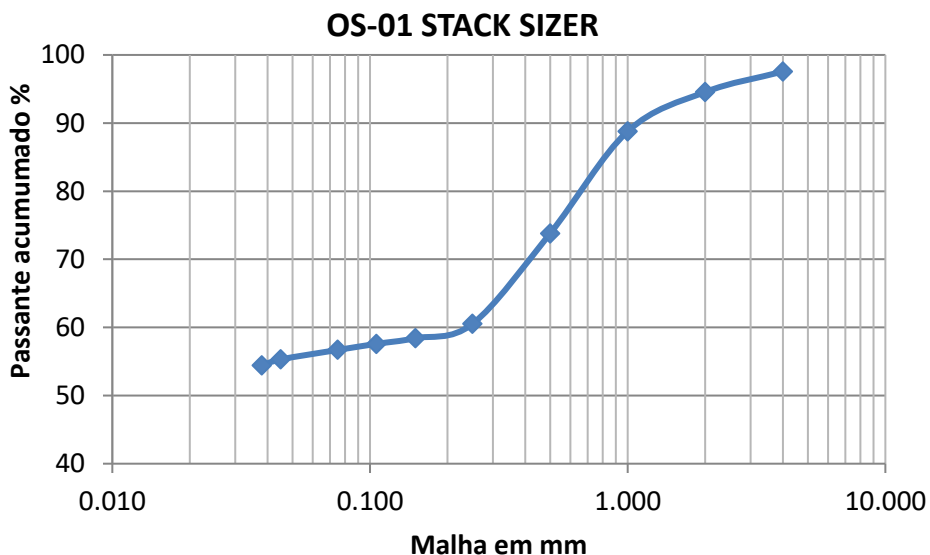


Figura 50: Dados da amostra de alimentação do 2° deck.

Analisando os dados das Figuras 50 e 51, nota-se que foi possível recuperar, neste *deck* da peneira de alta frequência, 92,48% da massa existente na fração + 0,15 mm da alimentação. Com isto foi possível evitar a perda de 0,76 t/h de partículas + 0,15 mm.

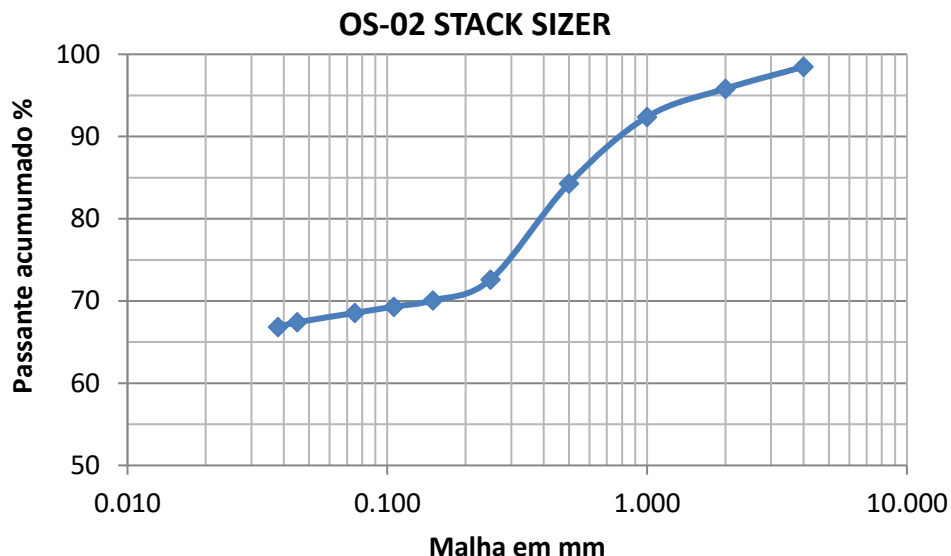


Figura 51: Dados da amostra do *oversize* do 2º *deck*.
Fonte: GADON (2016)

A recuperação do *oversize* obtida neste *deck* foi de 11,68%, o que fez aumentar em 2,34 t/h a produção da usina, isto somente no 2º *deck*. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 09.

Tabela 09: Dados do 2º *deck*

	<i>Feed</i>	<i>Oversize</i>	<i>Undersize</i>
t/h	20	2,3	17,7
t/h +0,15mm	0,76	0,7	0,06

Fonte: O autor

As Figuras 52 e 53 apresentam os resultados granulométricos do 3º *deck* da peneira *Stack Sizer*. Neste *deck* como nos dois anteriores, há um aumento significativo na retenção das partículas +0,15mm no *oversize* das telas do 3º *deck*. Este *deck* recebeu uma taxa de alimentação de 3t/h menor do que o 2º *deck*, porém 2 t/h a mais do que o 1º *deck*.

Com os dados das Figuras 52 e 53, pode-se notar que foi recuperada neste *deck* da peneira de alta frequência, 93,95% da massa existente na fração + 0,15mm da alimentação. Com isto foi recuperado cerca de 0,76 t/h de partículas +0,15 mm.

A recuperação mássica do *oversize* foi de 10,68%, o que representa um acréscimo de 1,82 t/h na produção da usina, somente neste *deck*. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 10.

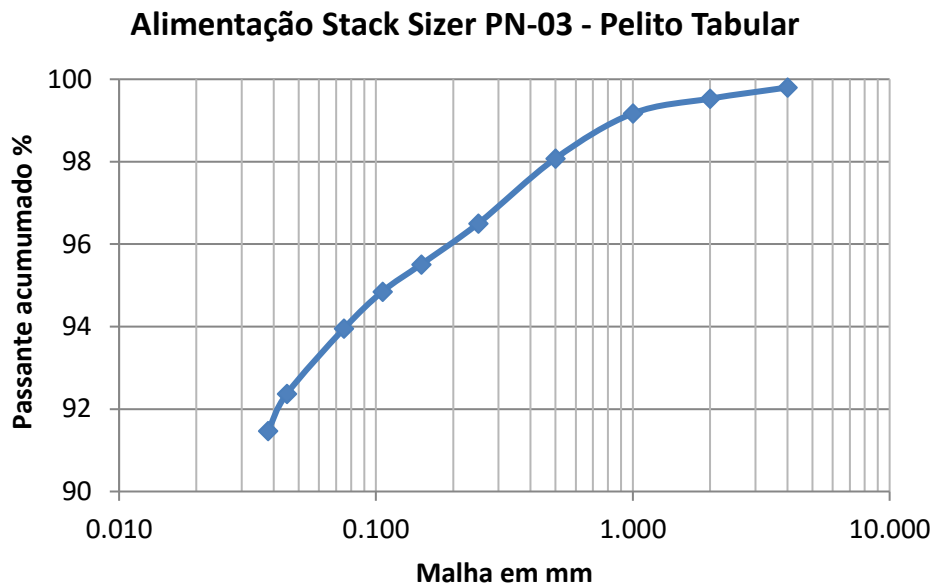


Figura 52: Dados da amostra de alimentação do 3º deck

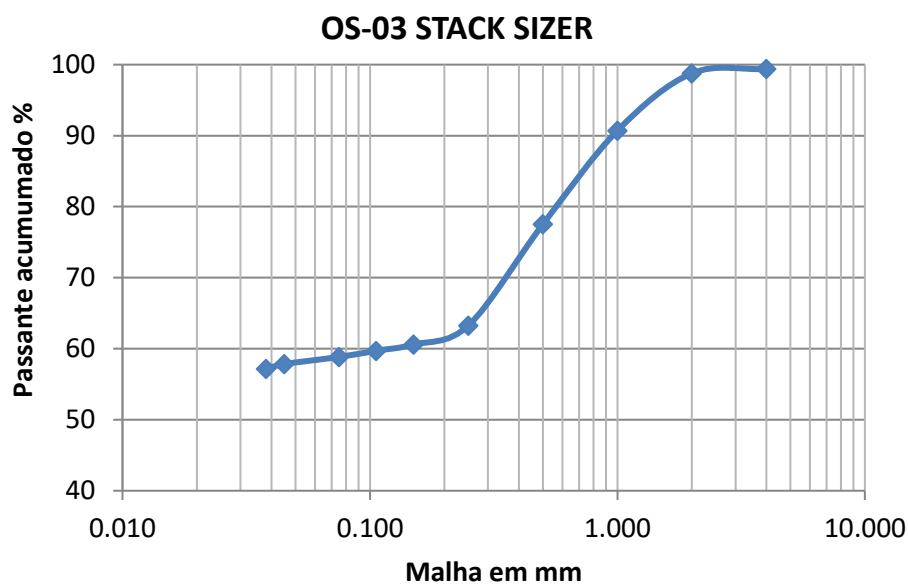


Figura 53: Dados da amostra do oversize do 3º deck.
Fonte: GADON (2016).

Tabela 10: Dados do 3º deck

	<i>Feed</i>	<i>Oversize</i>	<i>Undersize</i>
t/h	17	1,82	15,2
t/h +0,15mm	0,76	0,72	0,05

Fonte: O autor

Os resultados granulométricos do 4º deck da peneira *Stack Sizer* estão apresentados nas Figuras 54 e 55. Neste deck, como nos três anteriores, há um aumento significativo na retenção das partículas +0,15mm existentes no *oversize* das telas deste.

A taxa de alimentação deste 4º *deck* ficou com 19 t/h, ou seja, uma taxa maior do que a taxa do 1º e do 3º *deck*, porém menor do que a taxa do 2º *deck*.

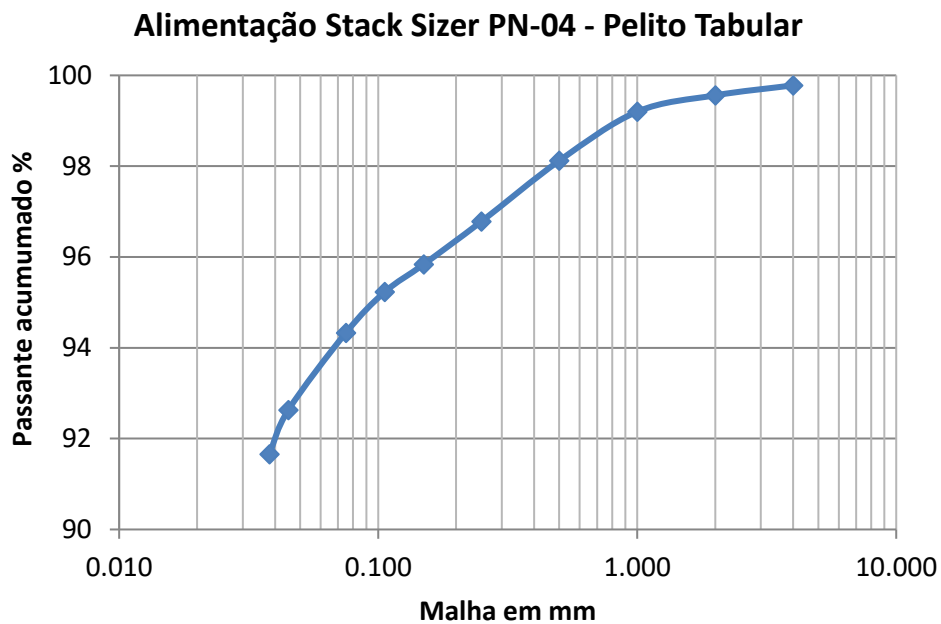


Figura 54: Dados da amostra de alimentação do 4º deck
Fonte: GADON (2016).

Com os dados das Figuras 54 e 55, é possível concluir que foram recuperados, neste *deck* da peneira de alta frequência, 93% da massa existente na fração + 0,15mm da alimentação. Isto representa uma redução de 0,7 t/h para 0,06 t/h nas partículas + 0,15mm que agora vão para barragem.

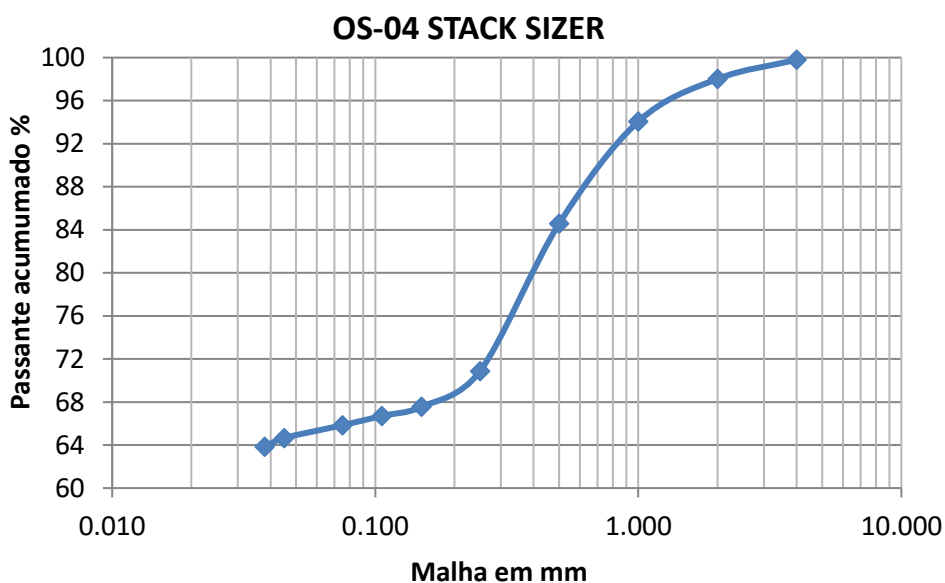


Figura 55: Dados da amostra do oversize do 4º deck
Fonte: GADON (2016)

Neste *deck* a recuperação do *oversize* obtida foi de 11,90%, o que aumenta em 2,26 t/h na produção da usina. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11: Dados do 4º *deck*

	<i>Feed</i>	<i>Oversize</i>	<i>Undersize</i>
t/h	19	2,26	16,7
t/h +0,15mm	0,79	0,73	0,06

Fonte: O autor

As Figuras 56 e 57 apresentam os resultados granulométricos do 5º *deck* da peneira *Stack Sizers*. Neste *deck*, também, há um aumento importante na retenção das partículas +0,15mm (Tabela 12). A alimentação foi aproximadamente 18,5 t/h e recuperação de 2,2 t/h de material que deixou de ir a barragem. Com isso, somam-se: 1,65 (*deck* 1) + 2,3 (*deck* 2) + 1,8 (*deck* 3) + 2,2 (*deck* 4) + 2,2 (*deck* 5) = 10,25 t/h de material retido na peneira. Ou seja, cerca de 3,5 t/h de +0,15mm recuperados.

Tabela 12: Dados do 5º *deck*

	<i>Feed</i>	<i>Oversize</i>	<i>Undersize</i>
t/h	18,5	2,2	16,3
t/h +0,15mm	0,77	0,71	0,05

Fonte: O autor

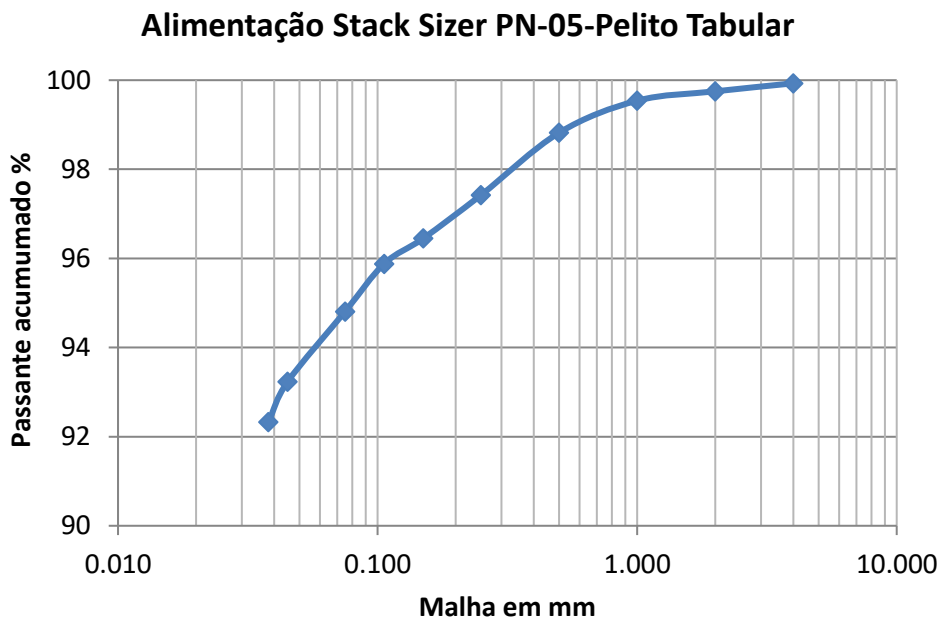


Figura 56: Dados da amostra de alimentação do 5º *deck*

Fonte: GADON (2016)

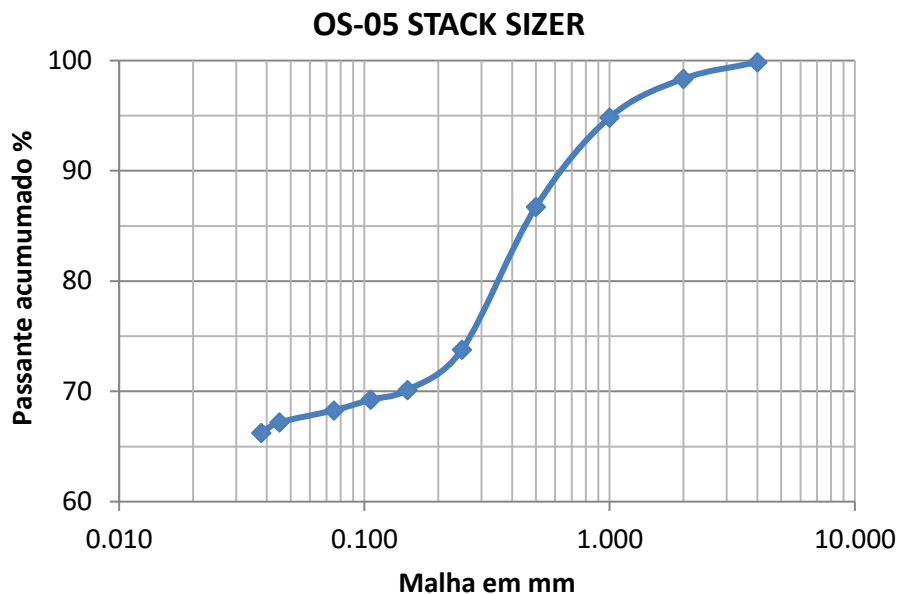


Figura 57: Dados da amostra do *oversize* do 5° *deck*
Fonte: GADON (2016).

Esta variação na retenção das partículas + 0,15mm, que ocorre dentre os *decks* da mesma peneira do tipo *Stack Sizer*, está diretamente ligada à distribuição da polpa nos *decks*. Isto acontece, porque a descarga da polpa do distribuidor para os *decks* da peneira ocorre por gravidade e estes estão sobrepostos.

Esta sobreposição dos *decks* faz com que, cada tubulação de alimentação tenha um comprimento e uma inclinação diferente da outra, e isto interfere na quantidade de massa alimentada em cada *deck*. Assim, não é possível manter uma conformidade na quantidade de massa alimentada em cada *deck* da peneira *Stack Sizer*.

Assim, com um conjunto de peneiras *Stack Sizers* de 5 *decks*, chega-se a uma recuperação de cerca de 10,25 t/h na fração + 0,15 mm no *oversize* das *Stack Sizer*. Como este material ainda passa pela peneira desaguadora com tela de 0,10 mm que tem uma eficiência de 90%, a recuperação da massa de + 0,15 mm no *oversize* da desaguadora chega a aproximadamente 9,2 t/h, na produção da usina de Manganês do Azul. Com isto a produção passa de uma média 221 t/h para uma média 230t/h. Um ganho de recuperação em massa da usina na ordem de 4,16%. Isto significa que este aumento na produção, reduz o total de rejeito descarregado na barragem do azul na mesma proporção. Ou seja, algo em torno de 63.000 t/ano de rejeito a menos por ano.

Considerado neste cálculo: 24h x 365 dias x 85% de disponibilidade física x 93% de utilização física x 9,2t/h.

Com a implantação da peneira *Derrick* de alta frequência, *Stack Sizers* de 05 *decks*, utilizando telas 0,15mm, o percentual de partículas + 0,15mm existentes no rejeito da usina de Manganês do Azul, baixou em média 2,85 pontos percentuais, conforme apresentado na Figura 58. A figura 59 apresenta a redução do % de Mn contido no rejeito da usina do Azul. Isto evidencia a redução ocorrida no percentual de partículas + 0,15mm no rejeito.

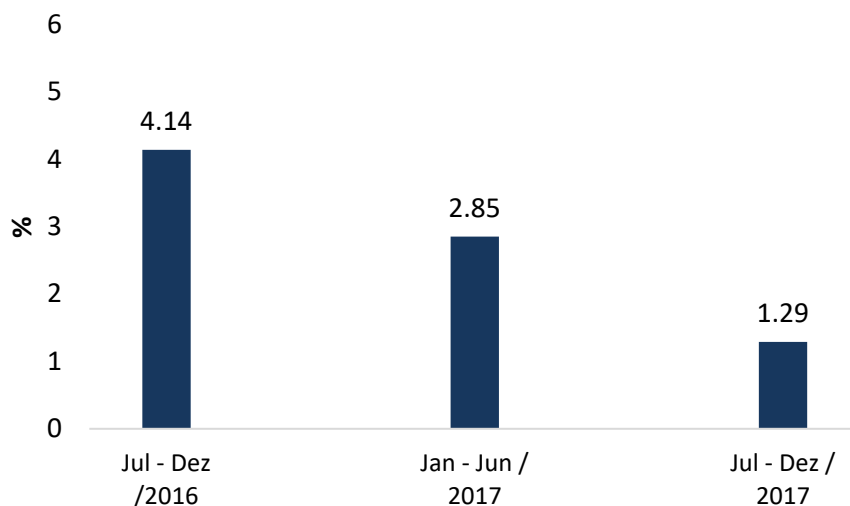


Figura 58: Percentual de partículas + 0,15 mm no rejeito.
Fonte: GADON (2016).

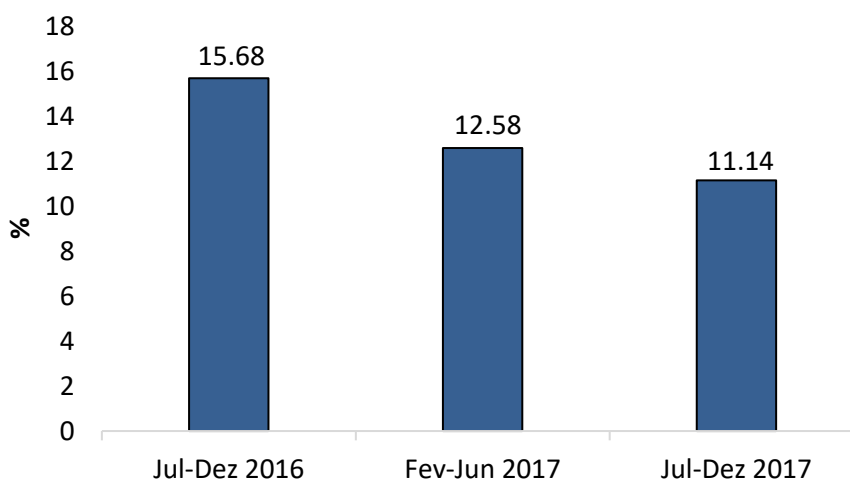


Figura 59: Teores de Manganês no rejeito.
Fonte: GADON (2016).

Isto fica evidenciado, também, na Tabela 13 que apresenta os dados do material passante na fração 0,15mm da alimentação, *oversize* e do rejeito final.

Tabela 13: DGs da alimentação, *oversize* e rejeito.

Malha (mm)	AL-PN-01	AL-PN-02	AL-PN-03	AL-PN-04	AL-PN-05	OS-PN-01	OS-PN-02	OS-PN-03	OS-PN-04	OS-PN-05	Rejeito Final
4,00	99,91	99,90	99,80	99,78	99,93	97,56	98,48	99,39	99,80	99,86	100,00
2,00	99,74	99,67	99,54	99,57	99,75	94,56	95,48	98,79	98,02	98,35	100,00
1,00	99,39	99,37	99,17	99,21	99,53	88,78	92,39	90,72	94,07	94,84	99,75
0,500	98,08	98,54	98,08	98,12	98,82	73,79	84,27	77,54	84,57	86,72	99,51
0,250	96,34	97,01	96,52	96,79	97,42	60,52	72,61	63,28	70,86	73,78	99,20
0,150	95,25	96,22	95,52	95,85	96,45	58,41	70,07	60,59	67,57	70,13	98,71
0,106	94,73	95,72	94,86	95,24	95,88	57,58	69,31	59,72	66,71	69,24	98,34
0,075	93,42	94,82	93,97	94,33	94,81	56,69	68,35	58,84	65,85	68,27	97,79
0,045	92,03	93,30	92,41	92,64	93,23	55,30	67,41	57,83	64,67	67,17	96,80
0,038	90,98	92,40	91,51	91,66	92,34	54,41	66,84	57,16	63,88	66,21	96,13
- 0,038	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: GADON (2016)

Em seguida, para análise dos resultados de implantação deste projeto, foram coletadas amostras do circuito de rejeito final da usina de Manganês do Azul. Este material coletado foi enviado para a empresa fabricante de peneiras de alta frequência (*Derrick Corporation*), que há vários anos fornece este tipo de peneiras para Vale S/A. As distribuições granulométricas (DGs) das amostras foram determinadas via peneiramento a úmido. Foram registrados dados de densidade, percentual de água, taxas mássicas, dentre outras informações relevantes para a modelagem e simulação do circuito de peneiramento.

A decisão de utilizar peneiras de alta frequência estava baseada na elevada capacidade destas de classificar partículas finas. Devido à vibração de alta frequência, a tensão da superfície do minério é quebrada. Assim, minérios finos vibrarão vigorosamente sobre a superfície da peneira, o que intensifica a separação dos minerais úteis com massa específica elevada. Isto permite que minérios extrafinos tenham mais oportunidade de contato com a superfície da peneira.

4.2. Modelagem e simulação

A modelagem e simulação nos ajuda a criar diferentes cenários para prever as consequências das mudanças de um ou mais parâmetros operacionais e físicos das peneiras e dos circuitos.

Ainda, a modelagem matemática consiste em escolher ou criar equações matemáticas que representem equipamentos na indústria da mineração. Com estas, podemos prever as eficiências dos equipamentos e as DGs das correntes.

Após escolher os modelos que melhor representassem os dados de DGs das correntes das peneiras do circuito de rejeito de Mn do azul, foram simuladas as eficiências das peneiras e do circuito. Os resultados foram validados, comparando as DGs das correntes simuladas às amostradas, de tal forma que a diferença relativa entre estas não fosse maior do que 5%.

Após, foram simuladas situações de operação diferentes das da amostragem para as peneiras. Também, foram realizadas simulações com a parte de classificação do circuito de rejeito, primeiramente, com desaguadoras (como era antes) e, depois, com *Stack Sizers* (depois) para fins de conclusão sobre as vantagens e desvantagens do uso destas últimas.

Os equipamentos possuem os mais variados tipos de modelos matemáticos. Somente para peneiras, existem pelos menos uns 10 modelos diferentes e, dentre estes, muitos são empíricos.

O objetivo neste estudo de caso do Mn do Azul, foi testar os modelos utilizados pelo *software ModSim* (KING, 2009)³² e validá-los para prever com certa precisão as granulometrias e eficiências do circuito de rejeito nas mais diversas situações.

Vale ressaltar que a escolha do *software ModSim* se deu em função de não ser necessário a compra de licença para a utilização do mesmo. Além disto, os resultados obtidos nas simulações com o *ModSim* foram bastante coerentes com os resultados das amostragens.

A seguir são dados alguns exemplos de como foram os procedimentos para modelar e simular o circuito.

Exemplo Deck 2 – Objetivos

1- Calcular a eficiência do *OS* para cada classe de tamanho (tamanho de partícula)

No caso, as classes de tamanho para fins de modelagem são representadas pelos seus respectivos tamanhos geométricos (d_{pi}), ou seja, a raiz do produto da malha superior pela malha inferior.

2- Modelar as curvas de eficiência do *OS* e ajustar o modelo aos dados experimentais quando necessário, de tal forma que os erros sejam desprezíveis (< 5% relativo).

3- Simular o *deck* em função de variações de:

- ✚ Granulometria da alimentação
- ✚ Taxa de alimentação
- ✚ % de sólidos na alimentação e no *OS*
- ✚ dentre outras condições.

Passo a passo da modelagem e simulação

Passo 1

✚ Dados da amostragem

Precisam ser inseridos no *Excel* ou diretamente no *ModSim* no mínimo os seguintes dados:

- ✚ *Feed* – retido simples da alimentação em %
- ✚ *Feed* – retido acumulado da alimentação em %
- ✚ *Feed* – passante acumulado da alimentação em %
- ✚ *OS* – Retido simples do *oversize* em %
- ✚ *OS* – Retido acumulado do *oversize* em %
- ✚ *OS* – Passante acumulado do *oversize* em %
- ✚ % Sólidos t/h na alimentação
- ✚ % sólidos t/h no *oversize*
- ✚ Rendimento mássico = $R_{OS}/R_{Feed} \times 100$ (%)
- ✚ R_{OS} = [soma (% sólidos t/h no *oversize*) de cada dp_i]
- ✚ R_{Feed} = [soma (% sólidos t/h na alimentação) de cada dp_i]

A Figura 60 mostra exemplos de dados de distribuição granulométrica: alimentação e *oversize* das peneiras por exemplo para cada classe de tamanho.

Dados amostrados							
	Malha (mm)	Feed (%)			OS (%)		
		Ret Simples	Ret. Ac	Pas. Ac	Ret. Simples	Ret. Ac	Pas. Ac.
dpi (mm)	4,000	0,08	0,08	99,92	1,52	1,52	98,48
	2,83	0,23	0,31	99,69	2,66	4,18	95,82
	1,41	0,30	0,61	99,39	3,42	7,60	92,40
	0,71	0,83	1,44	98,56	8,12	15,72	84,28
	0,35	1,53	2,97	97,03	11,67	27,39	72,61
	0,19	0,80	3,77	96,23	2,54	29,93	70,07
	0,013	0,50	4,27	95,73	0,76	30,69	69,31
	0,09	0,90	5,17	94,83	0,76	31,45	68,55
	0,06	1,53	6,70	93,30	1,14	32,59	67,41
	0,04	0,90	7,60	92,40	0,57	33,16	66,84
	0,01	92,40	100,00	0,00	66,84	100,00	0,00

Figura 60: Exemplo de dados de entrada (*input*)
Fonte: O autor

Passo 2

Escolher o modelo matemático que represente a eficiência das peneiras.

- **Detalhes sobre modelagem: SCR1: Single-deck vibrating screen (Software ModSim)**

Descrição: é um modelo para peneiramento a úmido descrito por Rogers (1982), sendo que a função classificação (eficiência) é dada por:

$$Efic. OS(X_i) = E = \frac{X_i}{X_i + \exp(\alpha(1 - X_i^3))} \times 100 \quad Eq(37)$$

Alfa variando de 0,8 a 4,0

$$X_i = dpi/d50c \quad Eq (38)$$

d_{pi} = tamanho geométrico na classe “i”

$$dpi = \sqrt{M_1 M_2} \quad Eq (39)$$

sendo M1 a malha superior e M2 a malha inferior.

O curto circuito (*by-pass*) para o OS segue a divisão da água. A classificação real é descrita por

$$C = 1 - A (1 - E_{(X_i)}) \times 100 (\%) \quad Eq. (41)$$

onde, A é a fração de água no undersize.

Este modelo tem se mostrado muito efetivo para polpas de carvão e peneiras de alta frequência *Derrick (Stack Sizers)*. O modelo, por tratar-se de uma equação muito simples, pode ser desenvolvida no *Excel* sem maiores problemas. O *Software ModSim* serve para conferência e para agilizar as mudanças que se desejam simular.

Ocorreram grandes variações na alimentação das peneiras em relação ao projeto, em função das diferentes litologias, sendo que a tendência é predominar o pelito tabular que é muito “mais fino”, estas simulações ajudam a validar os resultados mostrados pelo fabricante e possíveis cenários e incertezas no futuro.

PARÂMETROS:

- 1- d_{50} (*ModSim*) ou diâmetro de corte, tamanho no qual 50% da massa do oversize está acima ou abaixo.
- 2-Divisão de água para *OS*
- 3-Parâmetro de eficiência **alfa**

- **Detalhes sobre modelagem: SCRN: Single-deck vibrating screen (*Software ModSim*)**
Peneira vibratória de um deck. Este é um modelo simples, ideal para peneiramento. A tela fará a separação do material no tamanho da malha especificada, mas uma certa fração do *undersize* é transportada pela tela para o *oversize*. Isto é definido pela eficiência de transmissão. *Sprays* de água podem ser adicionados à tela.

PARÂMETROS:

- 1- Tamanho da malha;
- 2- Eficiência de transmissão para *undersize*;
- 3- Umidade do *oversize*;
- 4- Dimensões da tela. (Opcional).
 (“Marque a caixa especificar dimensões da tela, se desejar especificar as dimensões da tela”);
- 5- Número de telas em paralelo.

Passo 3

Retrocalcular as eficiências com bases nos dois modelos e verificar os resíduos com base nas simulações para validação.

Pode ser feito no *Excel* ou *ModSim* de acordo com as equações descritas anteriormente.

Passo 4

Observar e analisar os resultados de modelagem/simulação. As curvas geradas se ajustam aos pontos – dados?

No exemplo das Figuras 61 e 62, são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica para simulação do *deck 1*: pontos, ou seja, quadrados, círculos ou triângulos representam os dados, enquanto as linhas representam os resultados da simulação. Este é um típico exemplo de gráfico de output do *ModSim*, após a escolha do modelo, entrada de dados e simulação. Neste, os resíduos (diferenças dos quadrados, círculos e triângulos para as curvas de ajuste), usando o modelo *SCRN* ficaram em torno de 5% absoluto no máximo.

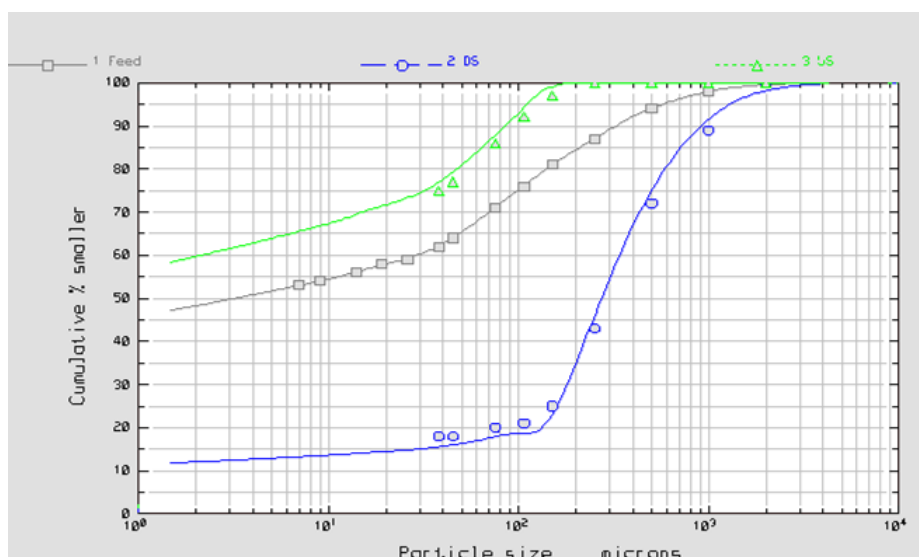


Figura 61: Modelagem e simulação (validação) do *deck 1*.

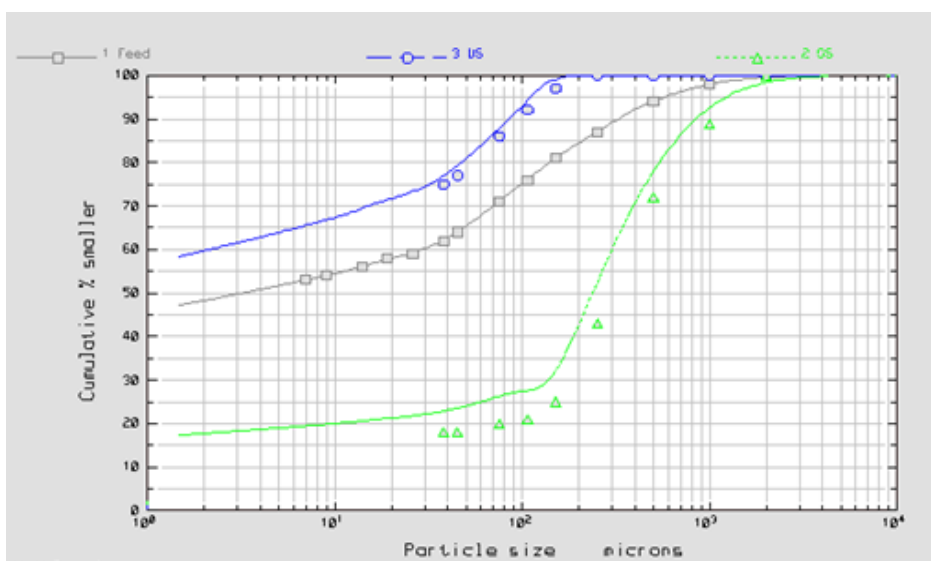


Figura 62: Modelagem e simulação/validação *deck 1*.

Fonte: O autor

Na Figura 62, usando o modelo *SCRNI*, os resíduos ficaram maiores do que 5% para o intervalo de confiança de 95%. Assim, optou-se neste caso pelo modelo *SCRN*. Ajustando, novamente, no entanto, os parâmetros, os erros tendem a diminuir, sendo que devem ser considerados os erros de amostragem como sendo proporcionais ao balanço de massa de entrada com respeito a saída.

As curvas de eficiência para *OS* e *US* (%), incluindo a validação de acordo com as funções de classificação *SCRNI* e *SCRN*, precisam ser realizadas no *Excel*. A Figura 63 é um exemplo de curvas de eficiência do *OS* (linha azul) e *US* (linha laranja) para o *deck 1*. Esta mostra que o *OS* recuperou 98% (incerteza de $\pm 5\%$) em +0.15mm.

Depois do “passo a passo”, um tutorial foi criado para execução deste trabalho, ou seja, para modelagem no *software ModSim* do circuito de rejeito.

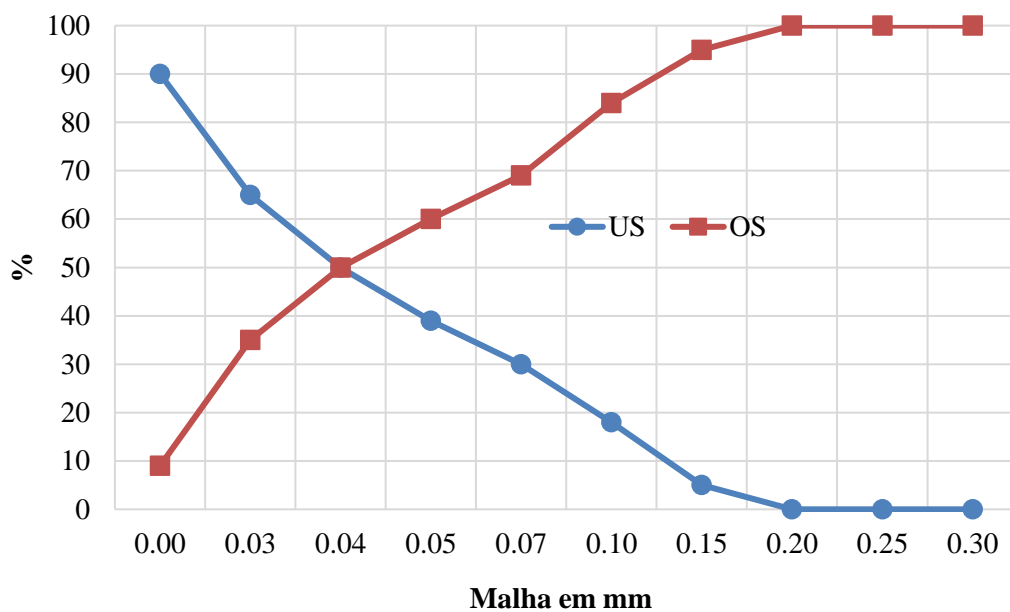


Figura 63: Curvas de eficiência de peneiramento.
Fonte: O autor

Detalhes sobre modelagem e validação no ModSim

Seguir os seguintes passos no software:

- 1) Menu → Save this Job as...(escolher o diretório em que quer salvar o arquivo)
- 2) Menu →Edit →Flowsheet

3) *Select* → *Classifier single deck screen (select equipment – vibrating screen)*

4) *Edit* → *rectangular cursor (desenhar as correntes de Feed, OS e US)*

5) *File* → *Accept flowsheet*

6) *Menu* → *Edit System Data (clique duas vezes sobre a corrente e entrar com os dados de passante acumulado versus tamanho mm e colocar um nome para a corrente) – “Accept”*

7) *Edit* → *Unit Model Parameters - escolhe o modelo de peneira clicando duas vezes sobre a sigla “SCRN 1” ou “SCRN” e preenche os parâmetros do modelo*

Exemplo

Utilização do modelo SCRN

Input (entrar com os seguintes dados)

- $d_{50}=0,15\text{mm}$
- *Eficiência de transmissão = 94%*
- *% de sólidos na alimentação = 27%*
- *t/h da alimentação = 15t/h*
- *% de água no OS = 48%*

A Figura 64 em diante mostram a sequência de passos realizadas no *ModSim*, como, por exemplo, escolher um equipamento no *ModSim* para construir a estrutura básica de simulação até fluxogramas mais complexos.

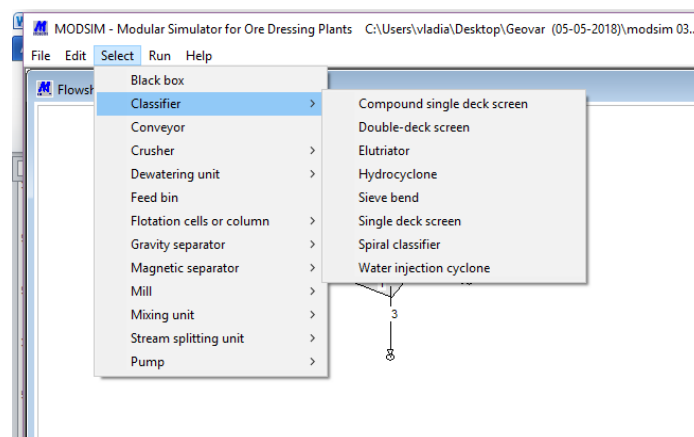


Figura 64: Passo a passo no ModSim.
Fonte: ModSim Version 3.6

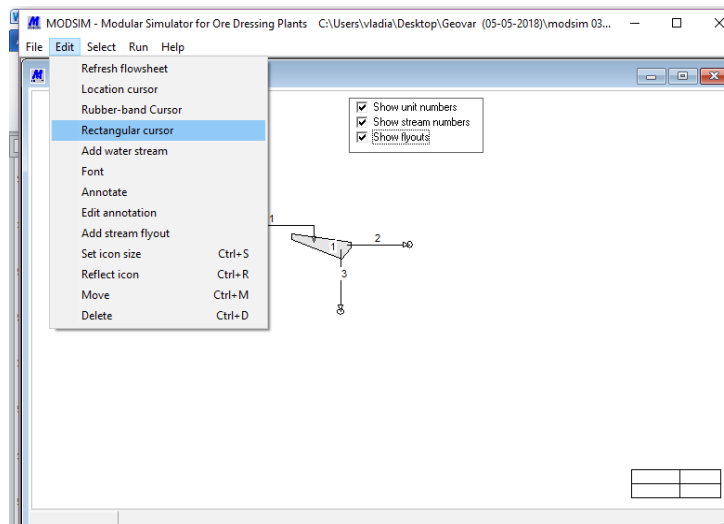


Figura 65: Passo a passo no ModSim.

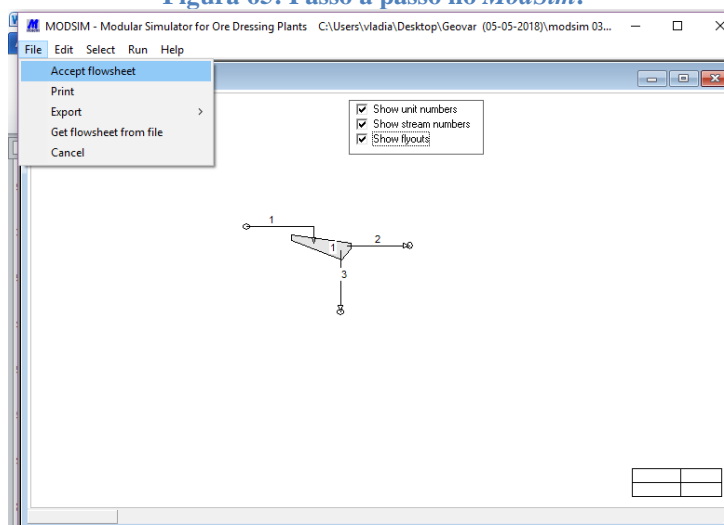


Figura 66: Passo a passo no ModSim.

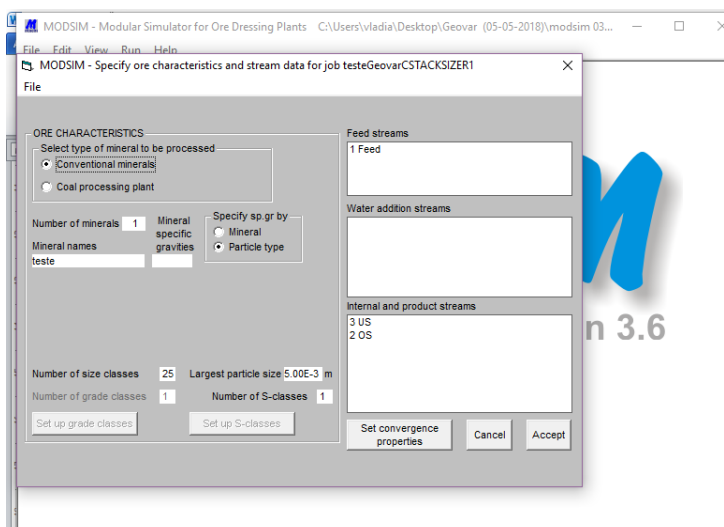


Figura 67: Passo a passo no ModSim
Fonte: ModSim Version 3.6

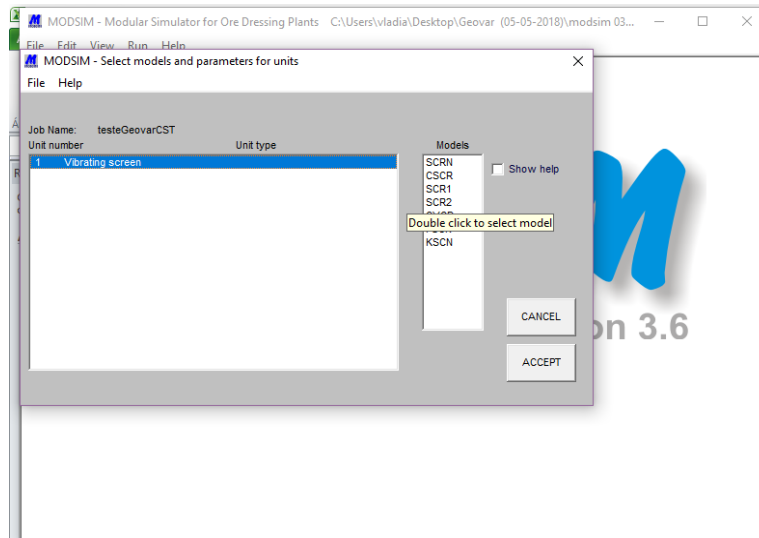


Figura 68 Passo a passo no *ModSim*

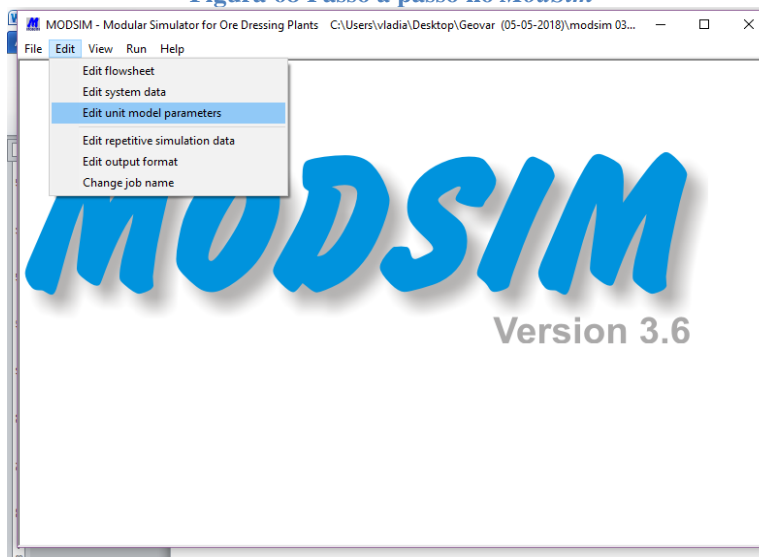


Figura 69: Passo a passo no *ModSim*

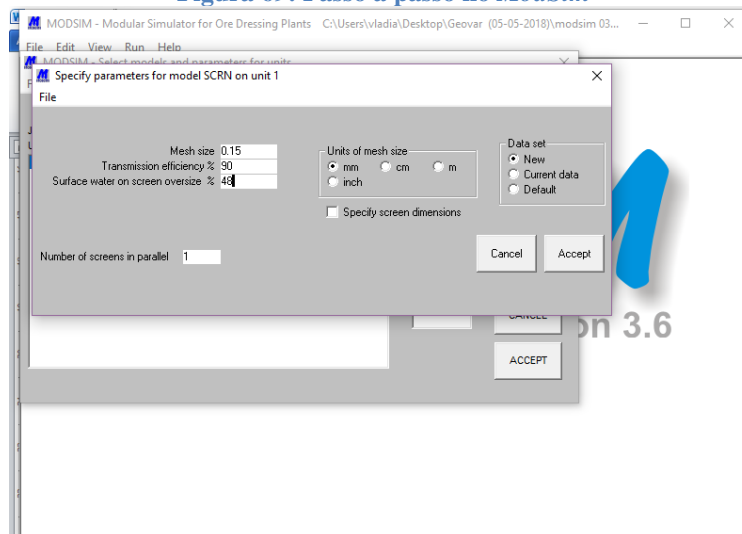


Figura 70: Passo a passo no *ModSim*
Fonte: *ModSim* Version 3.6

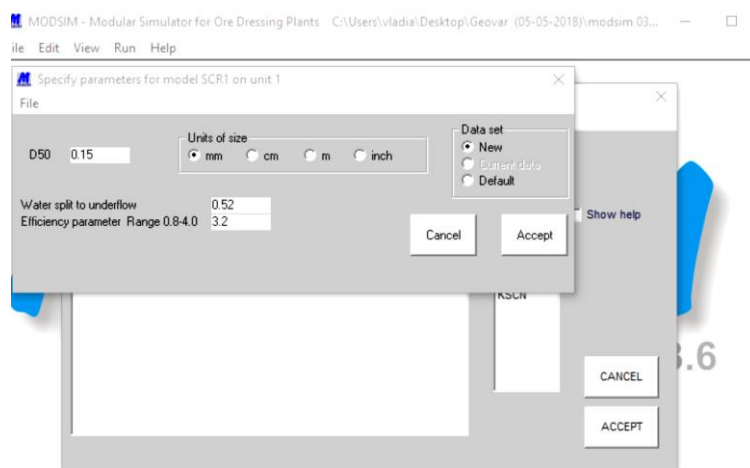


Figura 71: Passo a passo no ModSim
Fonte: ModSim Version 3.6

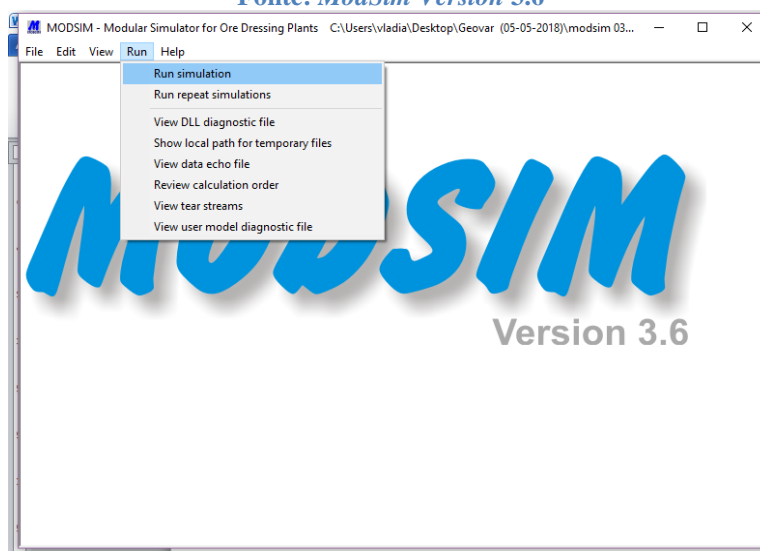


Figura 72: Passo a passo no ModSim
Fonte: ModSim Version 3.6

Após editados os parâmetros do modelo, foi acessado o “*Menu – Run Simulation*” – e após clicar “ok”, duas vezes, clicou-se em “*View size distribution graphs*” para verificar as simulações.

Após verificada se a simulação foi validada, foram copiados os dados do “*menu-view report file*” para o *Excel*, para melhor verificar os resíduos e graficar as curvas de eficiência. O “*Report File*” também fornece as dimensões e o número dos equipamentos (conforme descrito na revisão bibliográfica).

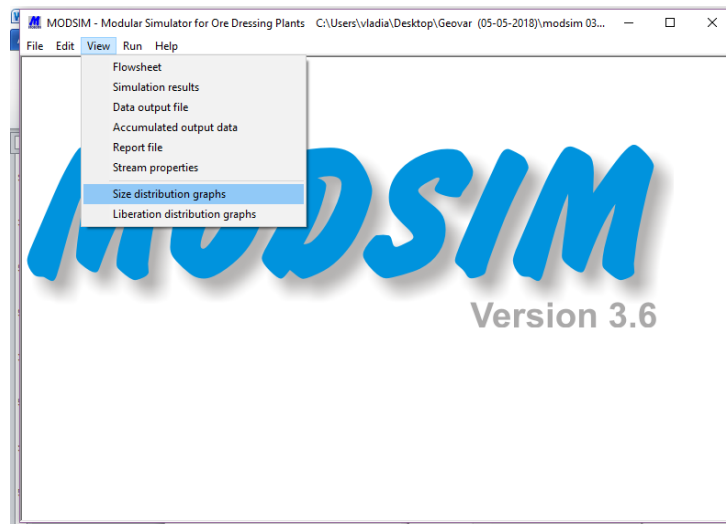


Figura 73: Passo a passo no *ModSim*
 Fonte: *ModSim Version 3.6*

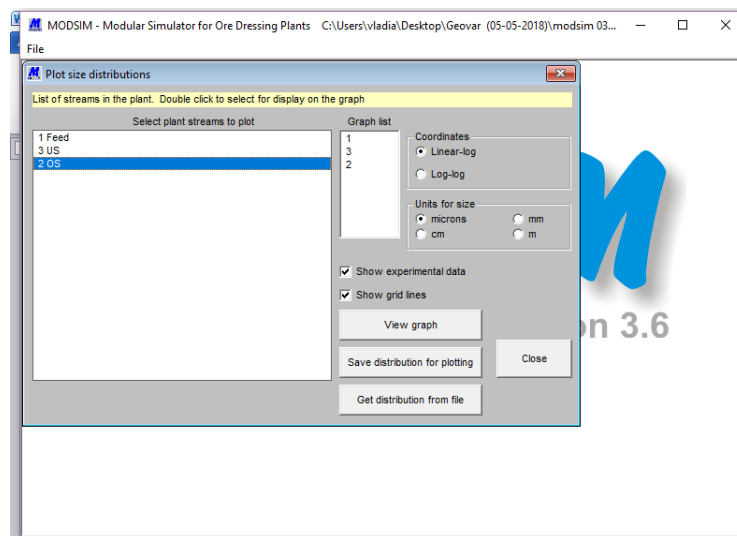


Figura 74: Passo a passo no *ModSim*
 Fonte: *ModSim Version 3.6*

Menu –View -Size distribution graphs - Clicar duas vezes sobre a corrente para plotar (*view graph*). Verificar a simulação (validar de acordo com os dados da amostragem). Simulando no *ModSim*.

Na Figura 76, podemos observar um exemplo dos resultados da simulação de dados de projeto no *ModSim* (fase de validação dos resultados).

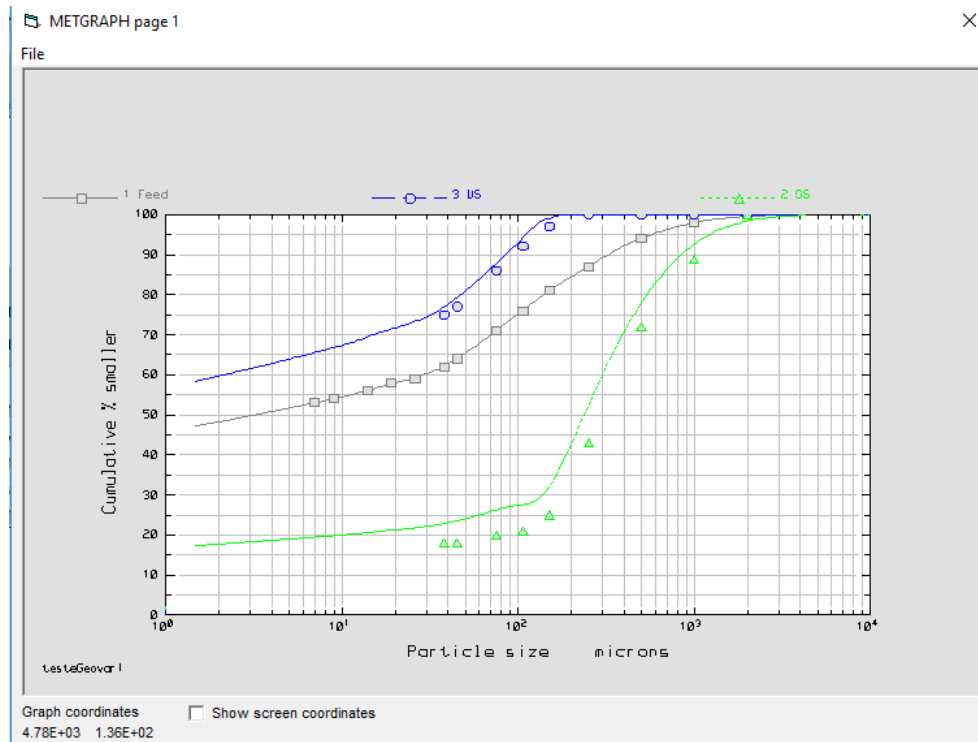


Figura 75: Visualizando resultados

Fonte: O autor

Todo processo consiste, portanto, em entrar com os dados de amostragem, escolher um modelo que represente matematicamente as curvas de DG do equipamento (função classificação), simular nas condições de amostragem, validar os resultados e após, simular diferentes condições como: DG diferentes, % de sólidos na alimentação (*Feed*), fluxo mássico da alimentação, rendimentos ou eficiências, etc.

A Figura 75 é um exemplo de gráfico resultante de curvas granulométricas para o *Feed* (cinza), *OS* (verde) e *US* (azul) de projeto (*ModSim*): DGs das correntes da peneira.

No próximo capítulo, aparecem os resultados da modelagem, validação e simulação para diferentes condições.

As seguintes simulações foram realizadas: simulações para validar as amostragens em cada *deck* das *Stack Sizers* instaladas e simulações para mostrar o que aconteceria se elas não tivessem sido instaladas, por conta de uma alimentação “mais fina” ao circuito de rejeito.

5. RESULTADOS

Os resultados apresentados nas Tabelas 14 e 15 referem-se à simulação do peneiramento do rejeito final com utilização das peneiras *Stack Sizer* na usina de Manganês do Azul.

Tabela 14: Dados do circuito da usina de Manganês do Azul

Taxa média da alimentação da usina	460t/h
Produção da usina de Mn	220,8t/h
Rejeito da usina de Mn	239,2t/h
Recuperação mássica média	48%
Vazão de Rejeito da usina	600m ³ /h
Densidade de polpa	1,2 g/cm ³
Densidade deslamada	1,03g/cm ³
%+0,15mm rejeito da usina	8%
Massa de rejeito recuperada	19,1t/h
Recuperação total (t/h)	239,9 t/h
Recuperação mássica total	52,16%

Fonte: O autor

Tabela 15: Dados de produção com *Stack Sizer*

Litotipos	Massa Alim. (t)	Produção (t)	Rec. (%)	Taxa TBN (t/h)	HT	DF (%)	UT (%)
Pelito Tabular	10018,78	5224,57	52,15	427,20	23,45	98,94	98,74
Pelito Tabular	6173,31	3506,52	56,80	444,40	13,89	67,57	85,66
Detrítico	9849,95	5581,66	56,67	445,30	22,12	94,34	97,68
Detrítico	10916,94	5712,40	52,33	472,00	23,13	96,67	99,71
Pelito Rico	11534,33	7514,06	65,15	511,70	22,54	95,97	98,87
Detrítico	11702,40	6593,77	56,35	520,30	22,49	96,04	97,58
Detrítico	11018,39	6166,68	55,97	552,90	19,93	99,65	83,34
Pelito Tabular	10442,53	5863,60	56,15	458,40	22,78	99,03	95,86
Pelito Rico	11805,08	7399,92	62,68	511,50	23,08	96,53	99,64
Pelito Tabular	10140,36	5458,47	53,83	440,30	23,03	98,23	97,67
Pelito Tabular	10303,90	5054,15	49,05	434,20	23,73	100,00	98,89
Massa Total	113905,97	64075,80	56,25				

Fonte: VALE S.A.

Para esta simulação foram utilizadas as mesmas taxas de alimentação da usina em TBN (taxa com umidade em base natural), realizadas na produção de acordo com o litotipo do minério alimentado. As horas trabalhadas (HT) da simulação levaram em consideração a DF (taxa de disponibilidade física da usina) e a UF (taxa de utilização

física da usina), realizadas nos dias em que a usina processou os minérios citados a seguir: Pelito Tabular, Detrítico, Pelito Rico e Maciço Químico.

Os resultados apresentados na Tabela 16 referem-se à produção da usina sem utilização das peneiras *Stack Sizers* na usina de Manganês do Azul. Esta produção foi obtida, considerando a taxa de alimentação da usina em TBN (taxa com umidade em base natural). As horas trabalhadas (HT) foi o resultado da DF (taxa de disponibilidade física da usina) e a UF (taxa de utilização física da usina) obtidas nos dias em que a usina processou os minérios citados a seguir: Pelito Tabular, Detrítico, Pelito Rico e Maciço Químico.

Tabela 16: Dados de produção sem *Stack Sizer*.

Litotipos	Massa Alim. (t)	Produção (t)	Rec. (%)	Taxa TBN (t/h)	HT	DF (%)	UT (%)
Pelito Tabular	10003,74	4523,75	45,22	426,60	23,45	98,94	98,74
Pelito Tabular	6163,95	3028,50	49,13	443,80	13,89	67,57	85,66
Detrítico	9250,24	5012,00	54,18	418,20	22,12	94,34	97,68
Detrítico	10337,12	5126,12	49,59	446,90	23,13	96,67	99,71
Pelito Rico	11534,33	6624,84	57,44	511,70	22,54	95,97	98,78
Detrítico	11613,18	5917,92	50,96	516,40	22,49	96,04	97,58
Detrítico	10665,40	5533,26	51,88	534,60	19,93	99,65	83,34
Pelito Tabular	10407,38	5078,83	48,80	456,90	22,78	99,03	95,86
Pelito Rico	11805,08	6524,39	55,27	511,50	23,08	96,53	99,64
Pelito Tabular	10124,15	4712,10	46,54	439,60	23,03	98,23	97,67
Pelito Tabular	10288,19	4368,27	42,46	433,60	23,73	100,00	98,89
Massa Total	112192,76	56449,98	50,32				

Fonte: VALE S.A. (2017)

Observa-se nesta simulação que há um ganho de 6,48 pp (pontos percentuais) na recuperação em massa da usina, mantendo as premissas de massa de cada litologia alimentada, taxa de alimentação e horas trabalhadas na usina (Tabelas 14, 15 e 16).

5.1. Resultados da modelagem e simulação

A seguir serão apresentados os principais dados de input para simulação e seus respectivos resultados.

A Tabela 17 mostra os dados de projeto (*input*) utilizados para modelagem e simulação do circuito de rejeito (retido e passante acumulado em % de cada corrente da peneira).

As Figuras 76 e 77 mostram as curvas de passante acumulado da alimentação e OS de projeto simulada e validada, usando o modelo *SCRN (ModSim)*.

Tabela 17: Dados do projeto.

mm	Feed		Oversize		Undersize	
	Retido	Passante	Retido	Passante	Retido	Passante
2,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1,00	2,50	97,50	11,15	88,80	0,00	100,00
0,50	6,30	93,70	28,31	71,70	0,00	100,00
0,25	12,70	87,30	56,80	43,20	0,00	100,00
0,15	18,90	81,10	74,70	25,30	2,80	100,00
0,11	23,70	76,30	78,76	21,20	7,80	97,20
0,08	28,70	71,30	80,10	19,90	13,90	92,20
0,05	36,40	63,60	81,64	18,40	23,40	76,60
0,04	38,1	61,9	82,02	17,90	25,50	74,50

Fonte: O autor

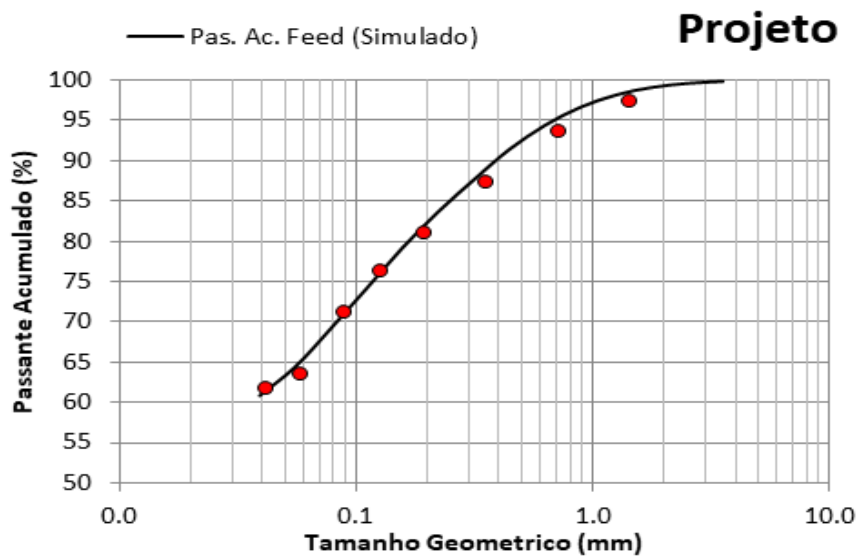


Figura 76: Passante acumulado da alimentação

Fonte: O autor

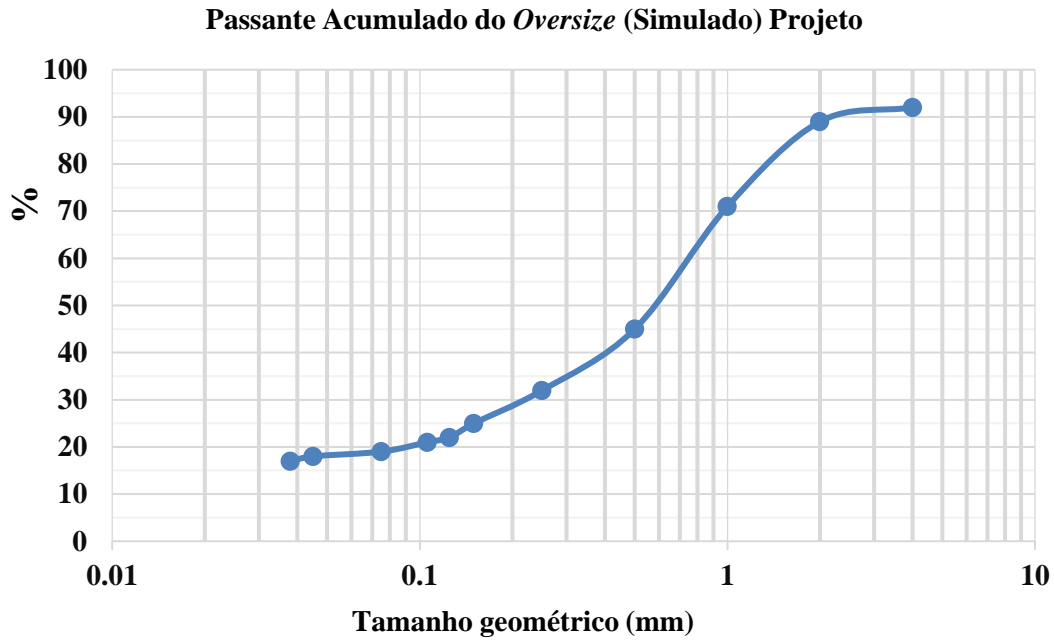


Figura 77: Passante acumulado do *oversize*.
Fonte: O autor

A Figura 78 mostra a curva do *undersize* de projeto simulada pelo modelo *SCRN*.
A Figura 80 mostra a curva de eficiência global simulada pelo modelo *SCRN*.

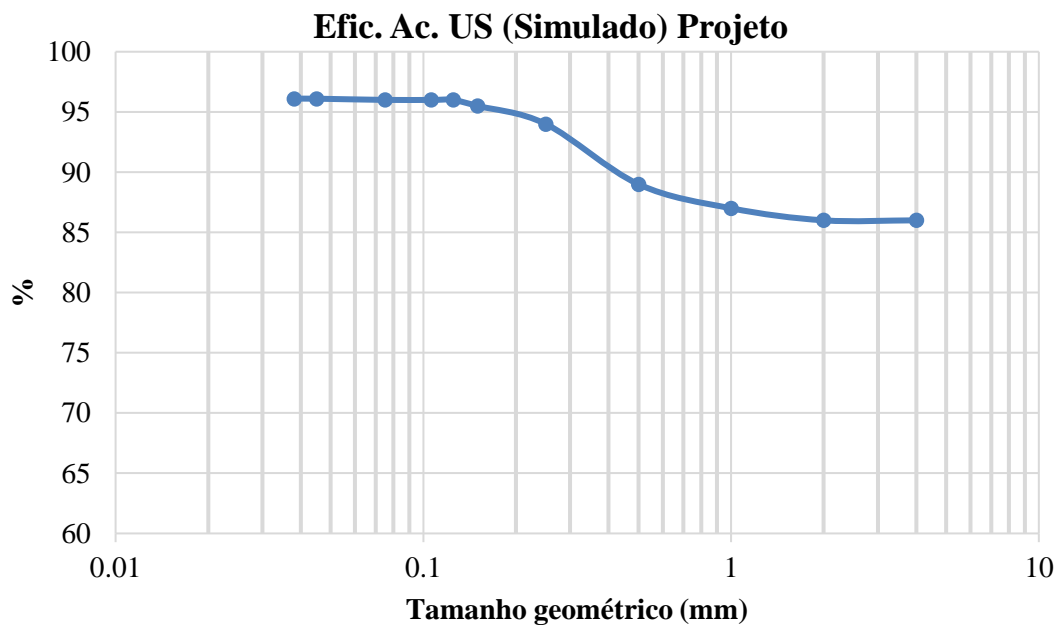


Figura 78: Passante acumulado do *undersize*
Fonte: O autor

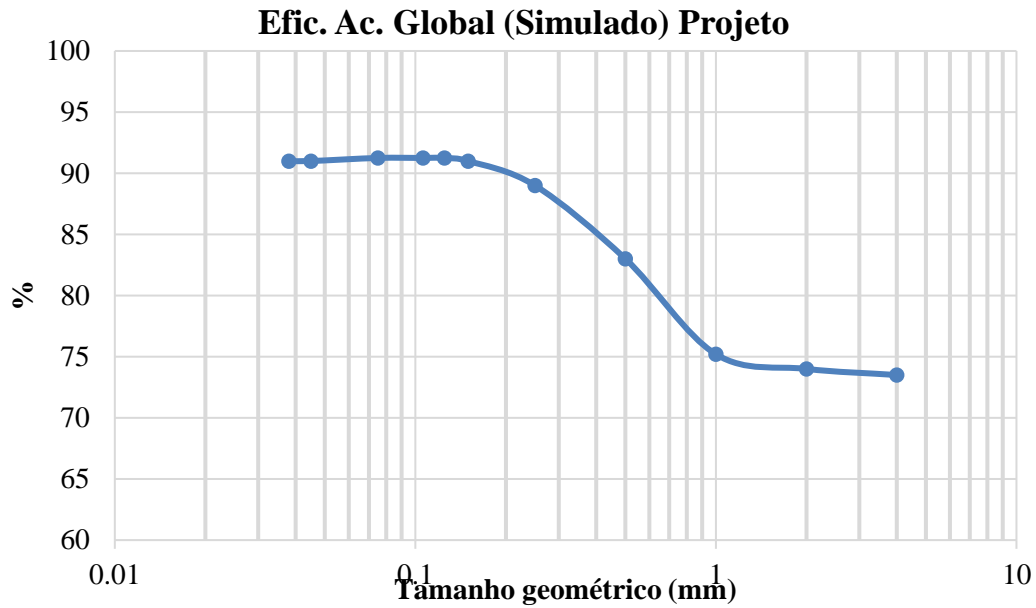


Figura 79: Eficiência Global simulada.

Fonte: O autor

A Figura 80 mostra a curva passante acumulado da alimentação (*feed*) do *deck 1* (modelo *SCRN-ModSim*) na situação dos pelitos tabulares (alimentação bem mais fina que projetada).

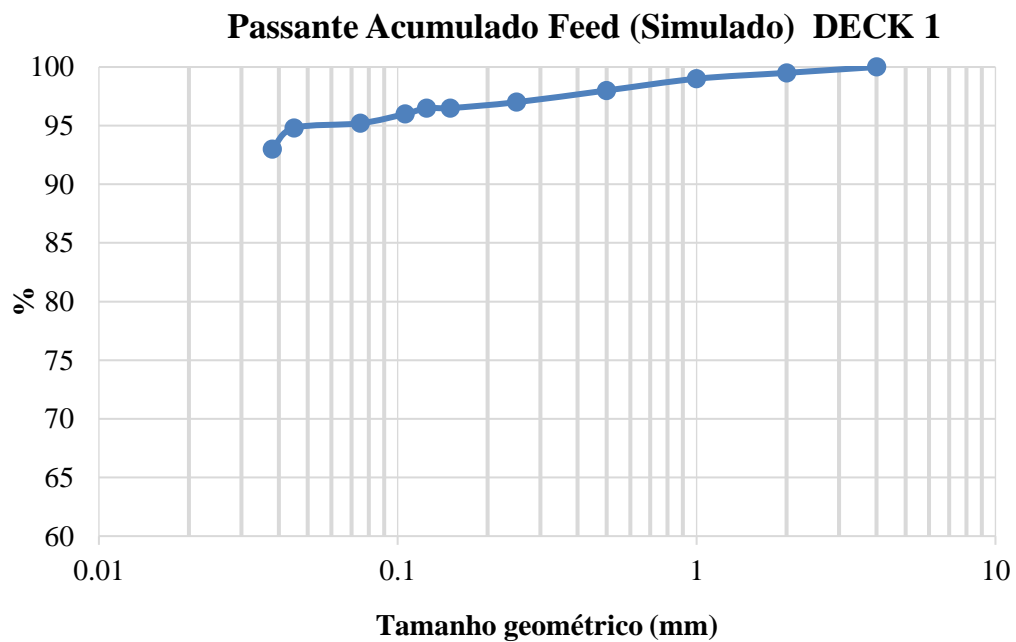


Figura 80: Curva da alimentação do *deck 1*.

Fonte: O autor

A Figura 81 mostra a curva de eficiência do undersize simulada do *deck 1* (modelo *SCRN-ModSim*). A Figura 82 mostra a curva de eficiência global simulada do *deck 1*.

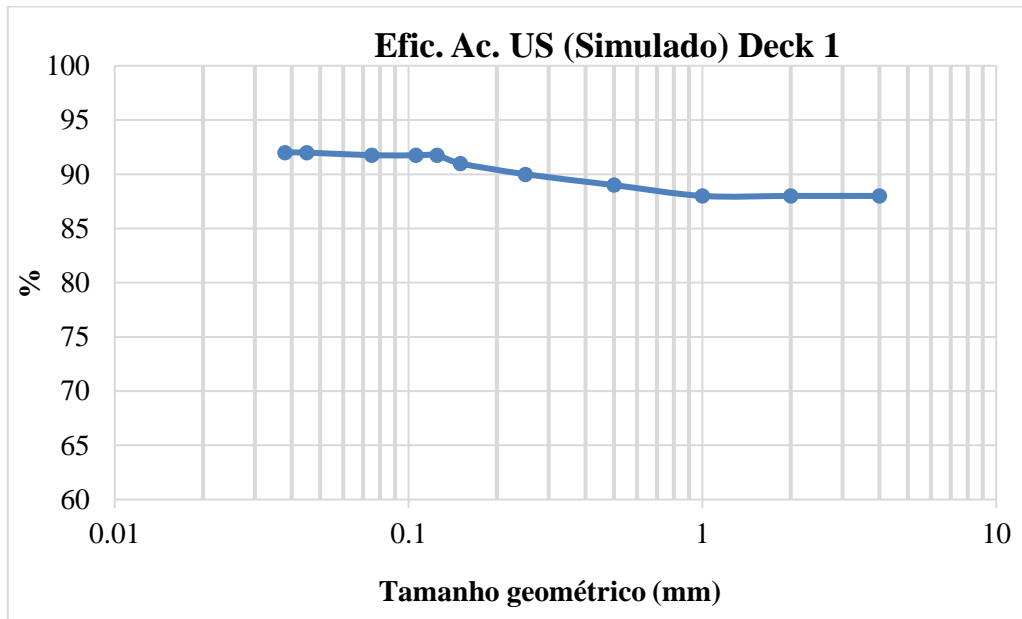


Figura 81: Eficiência do *undersize* do Deck 1.

Fonte: O autor

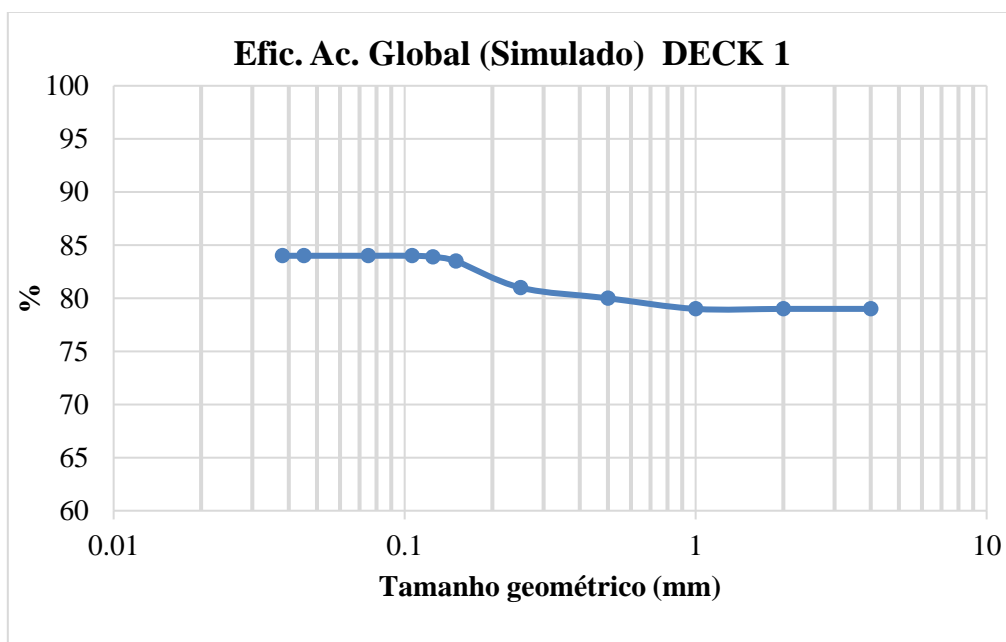


Figura 82: Eficiência Global do Deck 1

Fonte: O autor

A Tabela 18, a seguir mostra os resultados das simulações acima citadas.

Tabela 18: Resultados da simulação

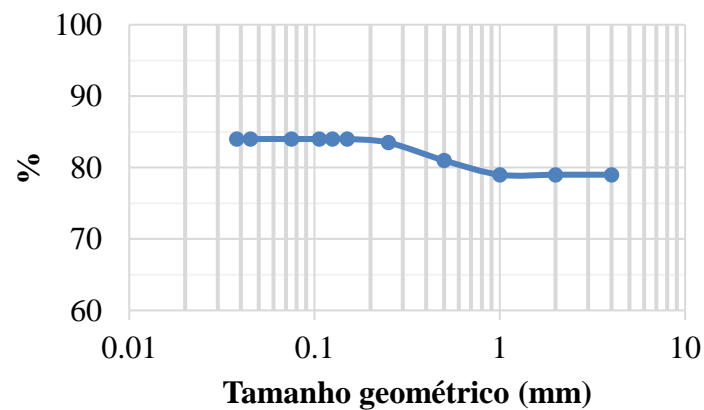
	FEED	US	OS	EG	RM	PAC	MR
	t/h	t/h	t/h	%	%	%	t/h
Projeto (1.1)	160	135	25	92	15,6	76,3	22,9
Deck 1 (1.2)	15	12,6	2,4	82	16,0	95,0	1,9
Deck 2 (1.2)	20	17,7	2,3	84	11,5	96,5	1,9
Deck 3 (1.2)	17	15,0	2,0	85	13,3	95,5	1,2
Deck 4 (1.2)	19	16,8	2,2	86	11,6	96,0	1,3
Deck 5 (1.2)	18,5	16,4	2,1	87	11,3	87,5	1,3

Fonte: o autor

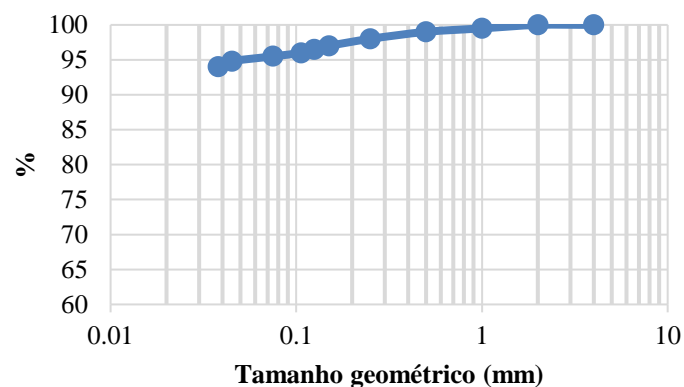
Dado que a DG do passante acumulado da alimentação do *deck* 1 é 14,13 p.p maior no tamanho 0,15mm, era esperado que sua eficiência global fosse menor. Por outro lado, sua eficiência caiu “apenas” 10% neste tamanho. Portanto, o *deck* 1 recupera + 0,4% com respeito ao projetado.

A Figura 83 mostra a curva de eficiência acumulada global do *deck* 2 pelo modelo *SCRN*. A Figura 84 mostra o passante acumulado da alimentação do *deck* 2.

Efic. Ac. Global (Simulado) DECK 2

Figura 83: Eficiência global do *deck* 2.

Passante Acumulado Feed (Simulado)

Figura 84: Curva da alimentação do *deck* 2.

Fonte: O autor

A seguir são mostrados os resultados das três simulações (cenários principais) ilustradas nas Figuras 85, 86 e 87.

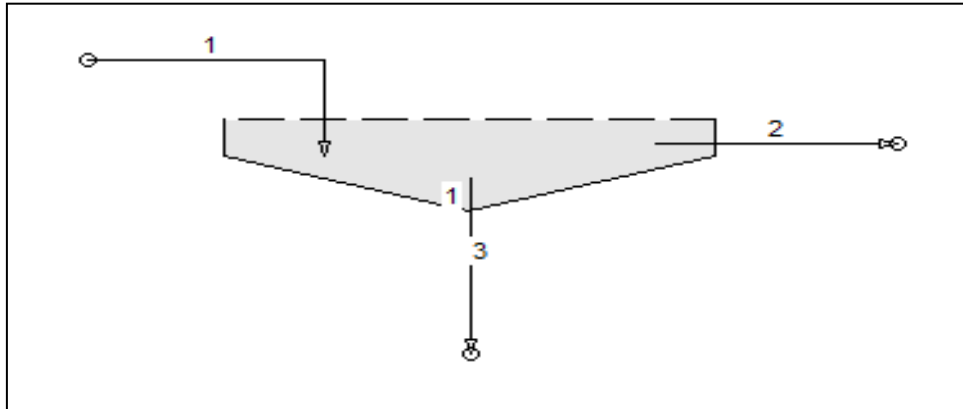


Figura 85: Semente desaguadora (*dewater*)

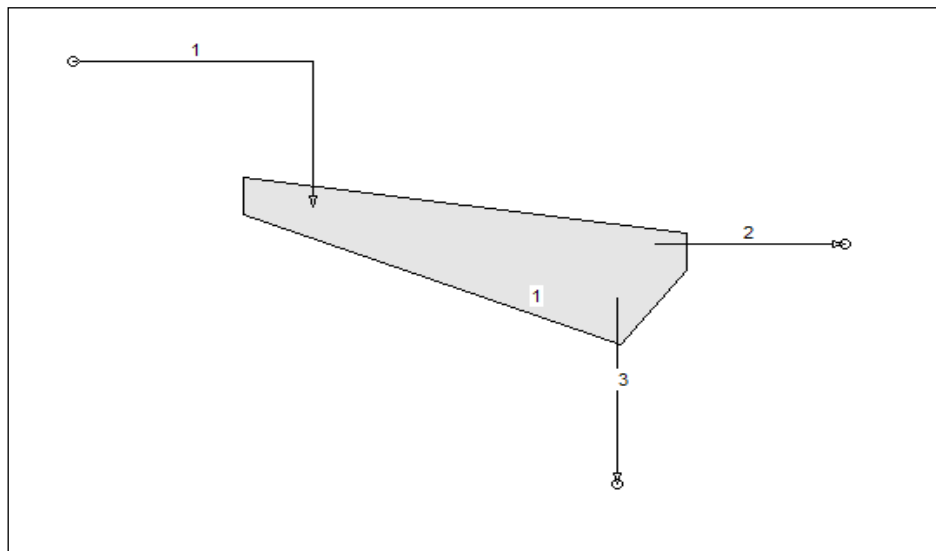


Figura 86: Semente peneira (*Stack Sizer*)

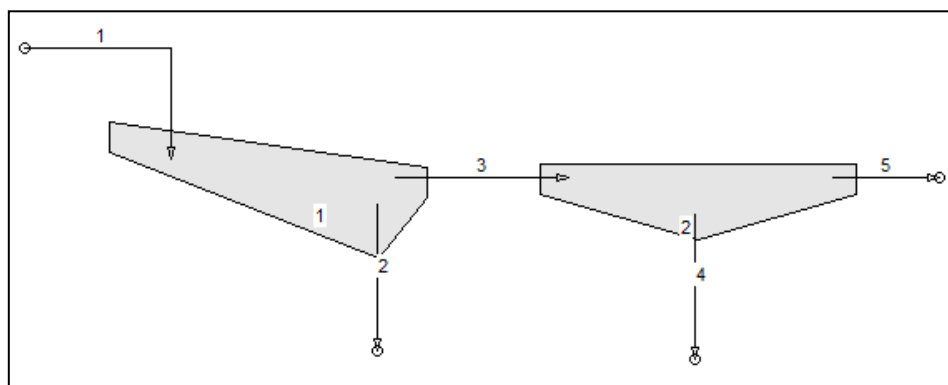


Figura 87: *Stack Sizer + Dewater*

Fonte: O autor

Simulação 1A – Simulação do circuito como seria “antes” se fosse **somente desaguadora**, alimentada por material com mesma distribuição de tamanhos estimada no projeto (2016). Cenário “UTÓPICO”.

Simulação 1B – Simulação do circuito como seria “antes” se fosse **somente desaguadora**, alimentada por material com distribuição de tamanho menor (bem “mais fina”) que a estimada em projeto, refletindo o empobrecimento dos minérios e a diminuição de sua granulometria, por conta da maior contribuição do pelito tabular. Este seria o pior cenário, mostrando o que aconteceria, senão tivesse ocorrido a mudança no circuito de rejeito; ou seja, a inserção de peneiras de alta frequência.

Simulação 2 - Constitui a simulação do circuito como seria se fosse **somente uma peneira (*Stack Sizer*)**, **sem desaguadora** com uma distribuição granulométrica “bem mais fina” que a de projeto (similar a 2016). Esta distribuição granulométrica de alimentação foi escolhida em função do empobrecimento dos minérios e diminuição de sua granulometria com maior contribuição do pelito tabular.

Simulação 3A - Constitui a simulação de um circuito tal como ficou “depois”: **uma peneira (*Stack Sizer*) mais a desaguadora**, com uma distribuição granulométrica “bem mais fina” que a de projeto (similar a 2016). Este cenário mostrou-se o “mais seguro”, com elevados ganhos em comparação ao circuito como era antes (somente desaguadoras), conforme esperado.

Simulação 3B - Constitui a simulação de um circuito tal como ficou “depois”: **uma peneira (*Stack Sizer*) mais a desaguadora**, com uma distribuição granulométrica igual a de projeto (similar a 2016).

Os dados utilizados para realizar a **simulação 3A** foram (*System Input Data*): alimentação de 160 t/h; *US* com 125 t/h; 27% sólidos na alimentação; recuperação mássica de 22% do *OS*, o que corresponde a 35 t/h; capacidade estimada de 9,4t/h/m², sendo área requerida total de 9,6m². Ainda 70% de H₂O no *OS*; abertura de 0,15mm e eficiência de transmissão de 94%, usando o modelo *SCRN*.

Esta simulação para ser validada precisou ajustar a recuperação mássica para 23% e requereu uma área de peneiramento de 10,6m², o que para metade da produção está ainda de acordo com o esperado.

O *oversize* (+0.15mm) na peneira (*Stack Sizer*) foi de 20% passante e na desaguadora foi de 7,5%. Estes resultados podem ser considerados bons, pois o percentual da desaguadora é muito menor, sendo então o ganho é expressivo.

Uma peneira de cinco *decks*, com uma área de 0,9m² cada, pode processar metade da massa de alimentação. Assim, foi verificada a necessidade de mais uma peneira com cinco *decks* para processar a massa total de 300 t/h. Isto está de acordo com as amostragens realizadas, quando a distribuição de tamanho da alimentação estava bem mais “fina” que a de projeto.

Na simulação 3B (*Stack + Dewater*), com D.G. da alimentação igual a de projeto, foram utilizados os seguintes dados de input: alimentação de 160 t/h; US de 125 t/h; 27% sólidos na alimentação e H₂O de 40% no OS. Malha de 0,15mm de abertura, eficiência de transmissão de 94% (modelo *SCRN*). Isto resultou em recuperação mássica de 25% e requereu 10,6 m², o que para metade da produção está de acordo. US (0,15mm) na *Stack Sizer* foi de 7% a mais de retido em 0,15mm (conforme o fabricante previu).

Na Figura 88, observam-se os passantes acumulados dos OS para as quatro simulações: 1A, 1B, 2 e 3.

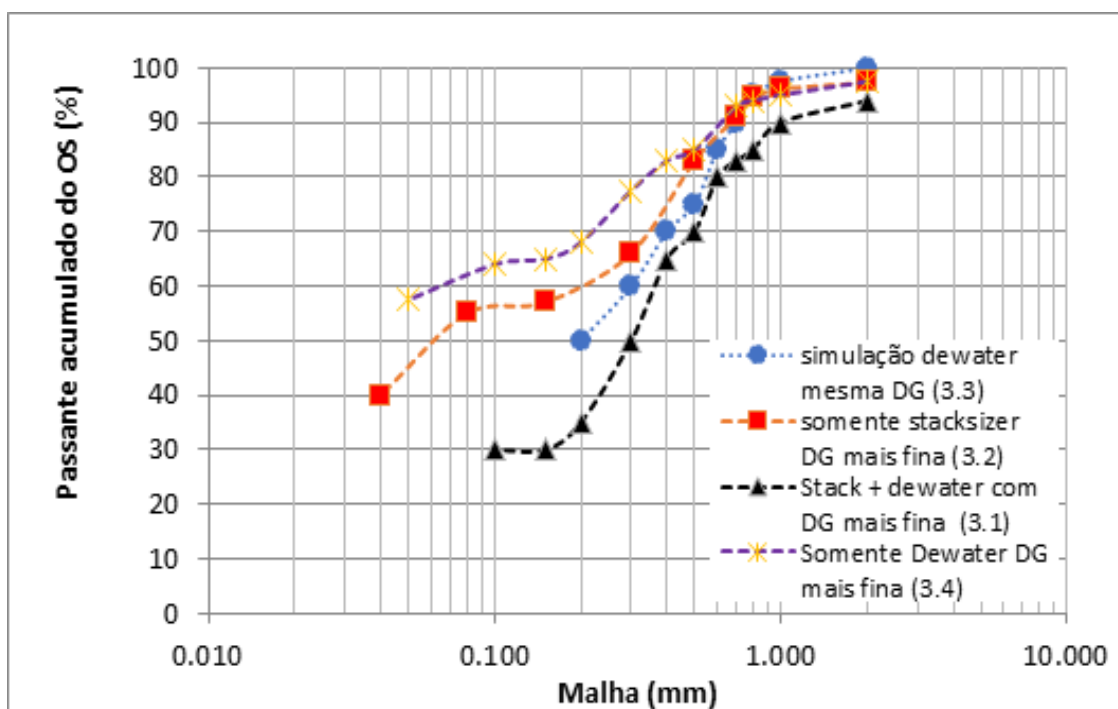


Figura 88: OS para as simulações 1, 2 e 3

Fonte: O autor

Observam-se as recuperações mássicas em +0,15mm do rejeito (eficiência do OS) na Figura 89, e nota-se que a pior situação teria sido uma DG de alimentação mais fina com somente desaguadora, ou seja, senão tivessem colocado as *Stack Sizers*.

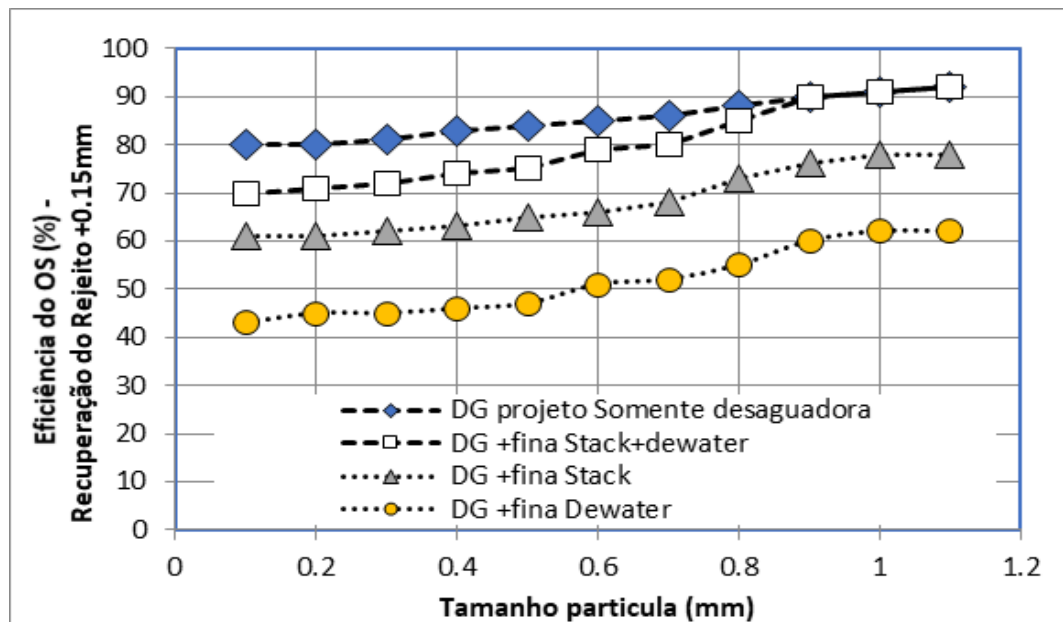


Figura 89: Curvas de eficiência de recuperação.

Fonte: O autor

Ainda, mostra que há uma possibilidade de ganho desde que com esta DG mais fina sejam realizadas algumas outras mudanças. Para tanto, é necessário que simulemos outros parâmetros de interesse, tais como % de H₂O na alimentação, a abertura da malha, além da vibração e amplitude (porém para estas duas últimas, torna-se necessário usar outros modelos matemáticos e realizar talvez mais amostragens). Deixam-se, então, estas tarefas como sugestão de continuidade do trabalho.

A Figura 90 mostra que o passante acumulado do *US* da desaguadora e *Stack Sizers* são muito parecidos, dada mesma alimentação.

Por outro lado, as *Stack Sizers* recuperam cerca de 10% mais em cada classe de tamanho. Dada a ponderação pelo rendimento mássico das desaguadoras versus *Stack Sizers*, estas últimas proporcionaram, mesmo como uma DG mais “fina”, quase 20% mais de recuperação de +0.15mm do rejeito. Logo, não há dúvida sobre a importância deste tipo de equipamento na recuperação dos finos, evitando estes de irem à barragem de rejeito.

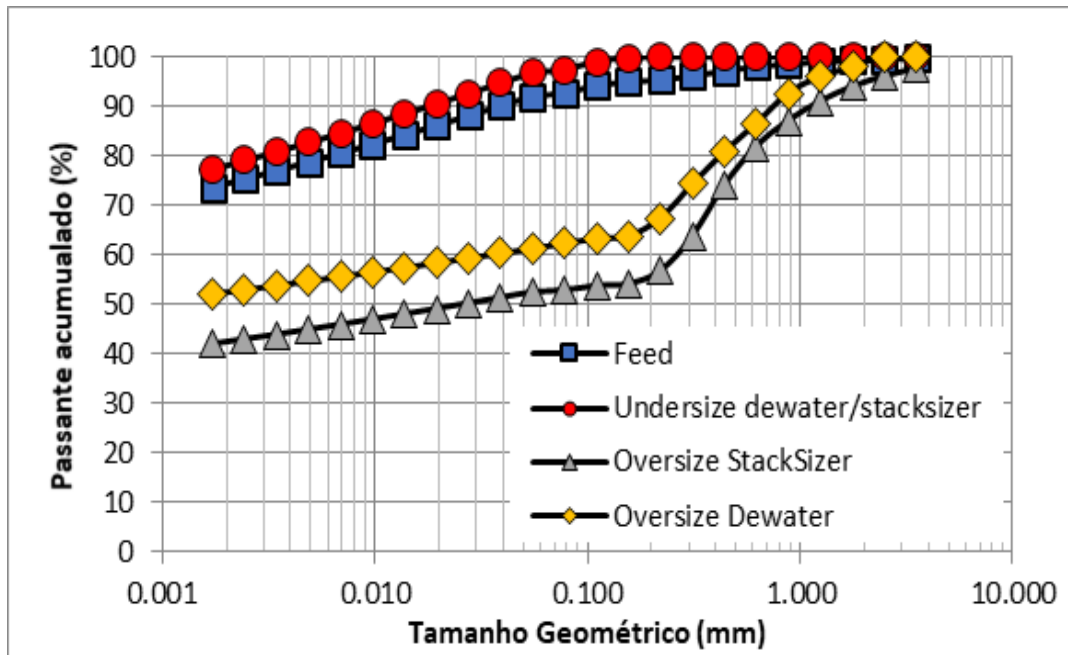


Figura 90: Comparação entre *dewater* e *stack sizer*.

Fonte: O autor

A seguir, da Figura 91 em diante são mostrados os gráficos de distribuição granulométrica das correntes para as simulações e respectivas validações (linhas versus pontos).

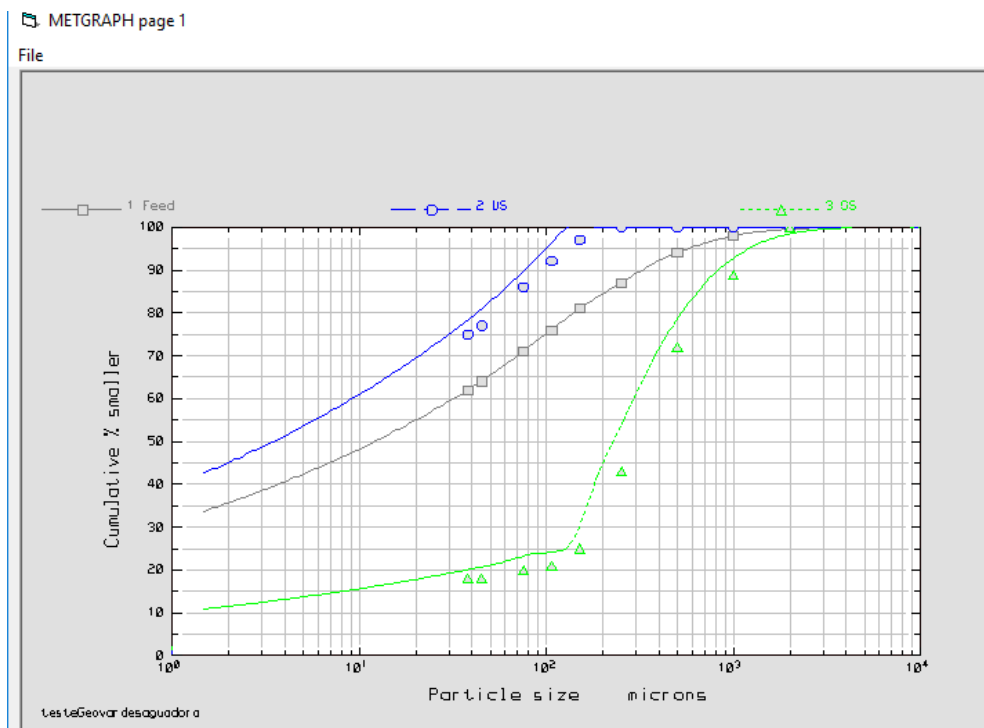


Figura 91: Somente desaguadora.

Fonte: O autor

A Figura 92 mostra a simulação e sua validação para uso de somente desaguadoras (*only dewater*) com mesma DG-Feed de projeto. A Figura 92 mostra a simulação e validação para uso de *stack sizers* e desaguadoras em conjunto (*stack sizers with dewater*) com mesma DG-Feed de projeto.

Na simulação *stack + dewater*, observou-se um ganho de 15 p.p no retido em 0,15mm do OS, sem modificações na DG da *US* ou *Feed* (de projeto). Isto significa que a eficiência foi proporcional.

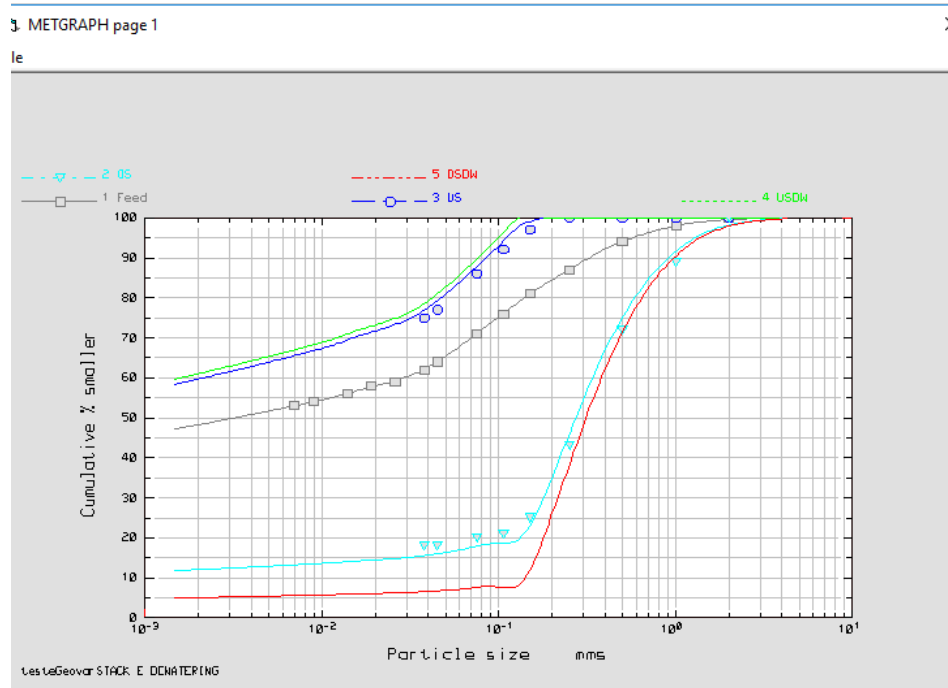


Figura 92: Stack sizers e desaguadora

Fonte: O autor

Observando a figura 92, nota-se que a DG da alimentação de projeto possui 81,2% passante acumulado em 0,15mm e 60% em 30um, enquanto a DG de alimentação “bem mais fina” apresenta 97% e 93,3% respectivamente nos mesmos tamanhos. Estas DGs foram validadas na ocasião da amostragem e com base em dados históricos de 2016.

A Figura 93 mostra a simulação do circuito “*stack sizers* mais desaguadoras” com DG de alimentação “mais fina”.

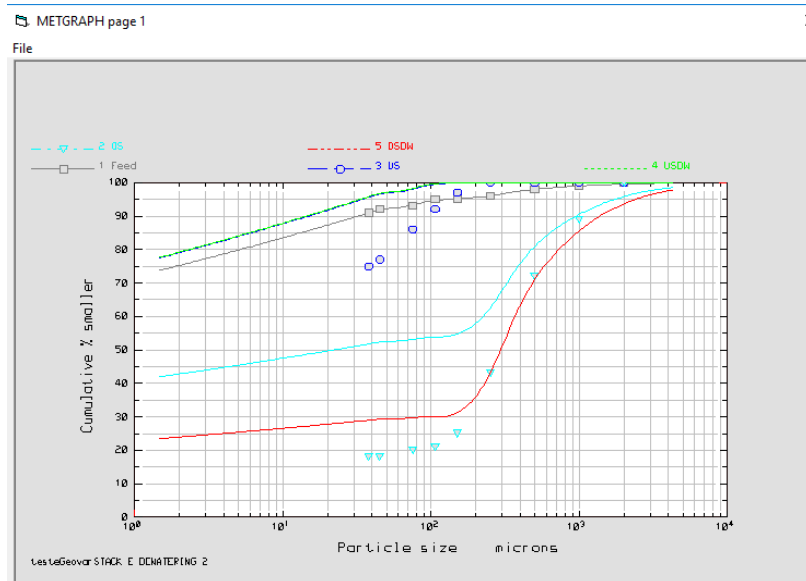


Figura 93: Stack sizers, dewater e Feed “mais fina”.

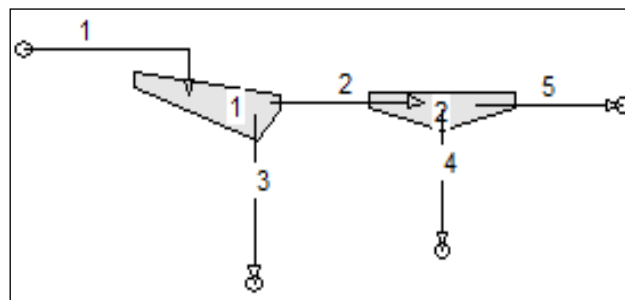


Figura 94: ModSim Version 3.6
Fonte: O autor

Na simulação “Stack + dewater” com DG de alimentação “bem mais fina”, Figura 94, observou-se um aumento no passante da DG de 5% em 150 μ m e 20% em 30 μ m do US. A Figura 95 mostra os resultados da simulação do circuito com somente desaguadoras e uma DG de alimentação “bem mais fina”.

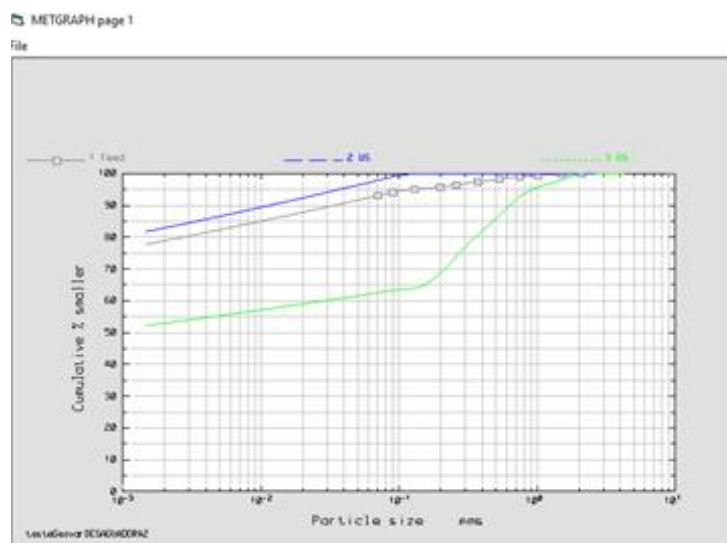


Figura 95: Somente dewater com Feed “mais fina”.
Fonte: O autor

Na Figura 97, observa-se:

- Um aumento no passante da DG mais fina de 95 e 45% do *US* em 150 e 30 um respectivamente;

- Um aumento no passante para DG mais fina de 50 e 60% do *OS* em 150 e 30 um respectivamente

Isto quantifica e dá significado à enorme perda de finos que ocorreria para o rejeito se a empresa não tivesse instalado as *Stack Sizers* diante da granulometria mais fina da alimentação.

O modelo utilizado para simular desaguadoras no *ModSim* foi o “*DWSC*”: *DeWatering Screen* proposto por *King* (1990). Neste modelo, os sólidos do *undersize* são levados peneira na proporção do fluxo de água.

A Figura 96 mostra os parâmetros do modelo usado para desaguadora.

Figura 96: Parâmetros do modelo usado para desaguadora

Fonte: *ModSim*, PARAMETERS: 1...Ultimate moisture content of the material (%) 2...Mesh size of the screen 3...Length of the screen 4...Width of the screen 5...Angle of inclination (degrees) 6...Vibration frequency (rpm) 7...Amplitude of vibration 8...Angle of

A Figura 97 mostra os passantes acumulados dos OS das *Stack Sizer* e desaguadoras da simulação com DG de alimentação mais fina. Sem diferenças nos passantes do *US*.

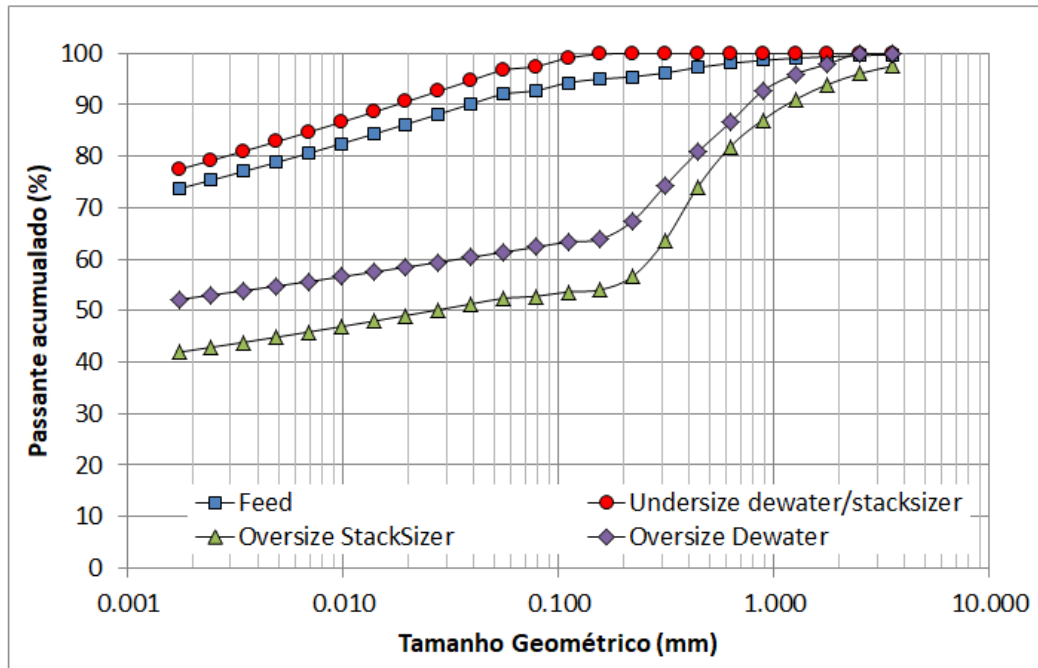


Figura 97: Granulometria Desaguadora e Stack Sizer.

Fonte: O autor

6. CONCLUSÕES

O processo de implantação das peneiras *Stack Sizer* na usina de Manganês do Azul foi realizado de forma paralela à produção e com isto não houve nenhuma perda de produção causada pela realização das obras da implantação do projeto, ou seja, a produção orçada para 2016 foi cumprida integralmente.

O projeto de instalação das peneiras foi dividido em duas etapas, sendo que a primeira etapa foi suficiente para processar aproximadamente 50% da geração de rejeito da usina. Os primeiros resultados mostraram que a recuperação em massa subiu 2.14 pontos percentuais. Isto significa que **63.000 toneladas de minério por ano, estão deixando de ir à barragem de rejeito!**

Os resultados poderiam ter sido ainda melhores, se não houvesse a redução expressiva das litologias nobres conhecidas como Maciço Metalúrgico, Maciço Químico, Pelito Rico e Detríticos. A grande variação ocorrida no depósito foi mostrada pelo modelo geológico revisado ao longo de 2016 e 2017. A partir do ano 2017, a mina passou a ser considerada uma mina de pelitos, basicamente (Pelito Tabular e Pelito Siltito). Este fato iria reduzir a recuperação mássica da usina de beneficiamento de Manganês do Azul em pelo menos 10%, se o projeto de instalação das peneiras *Stack Sizer* não tivesse sido implantado.

Analisando o rendimento mássico das peneiras desaguadoras versus peneiras *Stack Sizers*, estas últimas proporcionaram, mesmo como uma DG mais “fina”, quase 20% mais de recuperação de +0.15mm do rejeito. Logo, não há dúvida sobre a importância deste tipo de equipamento na recuperação dos finos, evitando estes de irem à barragem de rejeito.

Conclui-se, portanto, que a expectativa de redução da perda da fração +0,15mm no rejeito foi atingida conforme planejado, considerando que somente 50% do projeto foi realizado. As amostras indicam que a fração +0,15mm no rejeito final da usina reduziu em média de 4,2% para 1,29%, no período em que as amostras foram coletadas.

Cabe ressaltar que para manter estes resultados, é de extrema importância que as taxas de alimentação de cada *deck* da peneira *Stack Sizer* fiquem entre 15 t/h a 22 t/h e que o percentual de sólidos da alimentação, nunca ultrapasse os 28%. Caso ocorra taxas de alimentação acima de 22 t/h e percentual de sólidos inferiores 15%, nas peneiras *Stack*

Sizer, poderá aumentar de forma considerável o percentual de partículas finas (-0,15mm) no oversize, provocado pelo arraste destas partículas pela água existente na polpa e isto poderá impactar de negativamente a qualidade do produto final, principalmente no percentual de sílica.

Estes resultados demonstram que a 2ª etapa do projeto (instalação de mais uma peneira *Stack Sizer* com 05 decks) precisa ser realizado para que 100% do rejeito da usina seja alimentado nas peneiras *Stack Sizer*.

7. REFERÊNCIAS

- AGGREGATES MANAGER. **Demystifying dewatering**. Disponível em: <<https://www.aggman.com./demystifying.dewatering>>. Acesso em: 02 jun. 2018. ²¹
- ALBUQUERQUE, L.G.; WHEELER, J.E.; VALINE, S. B. Application of High Frequency Screens in Closing Grinding Circuits. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, n.6, 2009, Gramado. **Anais...** Gramado: UFRGS, p. 418-424. ²⁸
- ALBUQUERQUE, L.G.; VALINE, S.; WHEELER, J.E. Improvement of efficient classification with high frequency screens on closed circuit grinding - case studies. In: XXIV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, n. 24, 2011, Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA/IFBA, p. 416-423. ²⁹
- ALBUQUERQUE, L.G.; WHEELER, J.E.; VALINE, S. High frequency vibrating screens in closed grinding circuits. In: XXV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA & VIII MEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE ON MINERAL TECHNOLOGY, n.25, 2013, Goiânia. **Anais...**Goiânia: UFG, p. 417-424. ²⁹
- AVELAR, V. G.; LAFON, J. M.; CORREIA Jr. F. C., MACAMBIRA, E. M. B. O magmatismo arqueano da região de Tucumã – Província Mineral de Carajás: Novos Resultados Geocronológicos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 29, p. 452-460, 1999. ⁴⁹
- BARKHUYSEN, N, J. Implementing strategies to improve mill capacity and efficiency through classification by particle size only, with case studies. In: BASE METALS CONFERENCE., 2009, Kasane. **Proceedings...** Kasane: The South African Institute of Mining and Metallurgy-AusIMM, 2009, p.101-113. ²⁶
- BERNADELLI, A.L.; BEISIEGEL, V.R. Geologia econômica da jazida de Manganês do Azul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 30, 1978, Recife. **Anais...** Recife: SBG, 1978. v.4, p.1431-1444. ⁵⁷
- BRENTWOOD RECYCLING SYTEMS. **Trommels**. Disponível em: <http://www.brentwood.com.au/trommels_101_Trommels> 101: Understanding Trommel Screen Design>. Acesso em: 07 jun. 2018. ¹⁹
- B2BMAQUINAS. **Trommels**. Disponível em: <http://b2bmaquinas.com.br/Ads/Cimento_e_MineraAAo/MineraAAo/trommel_skega_paramoinhos/5975_412_5/>. Acesso em: 07 jun.2018. ²⁰
- CARRISSO, R. C.; CORREIA, J. C. Classificação e Peneiramento. In: **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. Cap.6, p. 209-257. ⁴
- CARVALHO, M. X. S. **Equipamentos de fragmentação: uma revisão avaliando circuitos alternativos para a moagem de finos**. 2012. Monografia - Escola de

Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.³⁸

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus, 2010. 22

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus, 2012. (V. 3, p. 37-136).¹³

C & B Due. **Peneiras**. Disponível em: <<https://www.cebdue.com/prodottosingoloENG.asp?id=17&idemenu=5>>. Acesso em 07 jun.2018.⁷

CLEARY, P.; WILSON, P.; SINNOTT, M. **Effect of particle cohesion on flow and separation in industrial vibrating screens**. Australia Minerals Engineering, Australia, v. 119, p. 191-204, 2018.³¹

COSTA, M. L.; FERNANDEZ; O. J. C.; REQUELME, M. E. R. Os depósitos de manganês do Azul, Carajás: estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica. In: LEITE, S. A. et al., **Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia**. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, CT-MINERAL, FINEP, ADIMB, 2005. Cap. V. p. 231-333.⁴²

(Disponível em:

https://www.adimb.com.br/site/publicacoes_amazonia/indice/Cap_V.pdf. Acesso em 21 set. 2017. Publicado por ADIMB – Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira).

COSTA, L.C.G. **Mina de Manganês do Azul: Mina 1 - Serra dos Carajás - PA**. Pará: Relatório interno CVRD, 2002, 35 p.⁴³

COSTA, M. L. da; CARMO, M. S.; BEHLING, H. Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, Belém, v. 35, n. 2, p. 165-176, 2005.⁵⁶

DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 2001.⁵⁰

DERRICK SOLUTIONS INTERNATIONAL. **Stack Sizers**.

Disponível em: <<http://derrickolutions.com/tag/stack-sizer/>>. Acesso em: 08 jun. 2018. 24

ERALKI. **Cribas-Vibrantes**. Disponível em: <<https://www.eralki.com/maquinas/cribas-vibrantes/>>. Acesso em: 06 jun. 2018.⁵

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. Cominuição. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2004. Cap.4, p.113-194.³⁷

FOGGIATTO, B. (2009). Previsão de desempenho no circuito de moagem de Carajás. Dissertação de mestrado. São Paulo, São Paulo, Brasil.³⁶

GADON - **Gerência de Desenvolvimento, Otimização de Processo e Laboratórios**, Vale Carajás, 2016.⁵⁸

JESUS, W.; OLIVEIRA, E.; DOMINGUES, G.; SOUZA, V. C. G.; KOPPE, J. C. Methods for crushing operational control. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, n. 26., 2015, Poços de Caldas. Anais... Poços de Caldas: Universidade Federal de Alfenas (Unifal), 2015, v.2, p.108-116.³

JWC-ENVIRONMENTAL. Industrial wastewater.

Disponível em:

<https://www.jwce.com/industrial_wastewater/>. Acesso em: 02 jun. 2018.¹⁴

KING, R. P. Dewatering performance of vibrating screens. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: **Journal of Process Mechanical Engineering**, Cidade, v. 204, n. 2, p. 73-79, 1990.⁶⁰

KING, R. P. **Modeling & simulation of mineral processing systems**. Utah: Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, Oxford, 2009.³²

LEITE, A. A. S. **Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico do Pará**. 2001. 330f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2001.⁴⁶

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.²

LUZ, J. A. M. da; CARVALHO, S. C. de. Modelamento matemático de peneiramento vibratório (Parte 1): dimensionamento clássico. **Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, v. 58, n. 1, p. 57-60, 2005.³³

MACAMBIRA, M. J. B.; LANCELOT, J. R. Times constraints for the formation on the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Cráton. **International Geology Review**, cidade publicação, v. 38, p. 1134-1142. 1996.⁴⁵

MACAMBIRA, E. M. B. O magmatismo arqueano da região de Tucumã – Província Mineral de Carajás: Novos Resultados Geocronológicos. **Revista Brasileira de Geociências**, cidade publicação, v. 29, p. 452-460, 1999.⁵¹

MACHADO, N.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T. E.; LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield. **Precambrian Research**, Brasil, v. 49, p. 329-354, 1991.⁴⁸

METSO MINERALS. **Manual de Britagem**. São Paulo: Grafilínea, 2005.¹²

METSO. Basics in Minerals Processing.

Disponível em: <<http://www.metso.com.br>>. Acesso em: 10 de out. 2017.¹¹

MIFAMA OPA CARBO. **Vibrating Screens.**

Disponível em:

<<http://mifama.com.pl/vibrating-screens-wlz-i425.en.html>>. Acesso em: 01 jun. 2018. ¹⁵

Mining Mill Operating Training, 2018. Disponível em: <https://millops.community.uaf/amit_145/amit_145-lesson_1/>. Acesso em: 09 jun. 2018. ¹⁰

MULAR, A. L. **Size Separation.** In: Principles of Mineral Processing. Fuerstenau, M. C. and Han, K. N. (Ed.) Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Colorado, 2000. ²⁷

NAPIER-MUNN, T. J.; MORRELL, S.; MORRISON, R. D.; KOJOVIC, T. **Mineral comminution circuits. Their operation and optimisation.** Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, 1996. ³⁰

NOGUEIRA, A. C. R. **Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Água Claras, Região Central da Serra dos Carajás – PA.** 1995. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, Belém, 1995. ⁵⁴

OUTOKUMPU. **Grinding Technology.** Finlândia.

Disponível na internet em:

<<http://www.outokumpu.com/mineralprocessing/grind-1b.htm>>. Acessado em: 18 jun. 2018. ³⁴

PEREIRA, C.E., Cominuição. In: PERES, A.E.C.; PEREIRA, C.E.; da SILVA, J.M.; DE ARAUJO, A.C., Curso de Beneficiamento de minérios. Belo Horizonte: 1989. ³⁵

PIMENTEL, M. M.; MACHADO, N. Geocronologia U-b dos terrenos granito-greenstone do Rio Maria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 38, 1994, Camboriú. Anais...Camboriú: editor, 1994. p. 390-391. ⁴⁷

PINHEIRO, R. V. L. **Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brasil.** 1997. 408 f. Tese (Doutorado) - University of Durham. Department of Geological Sciences, Durham, 1997. ⁵⁵

REIS, J. L. M. **Eletroperfilagem do desaguamento de granéis.** 2016. Dissertação de mestrado em Engenharia Mineral - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Ouro Preto, MG. ⁹

ROGERS, R. S. C. A classification function for vibrating screens. **Powder Technology.** Netherlands, v. 31, n. 1, p. 135-137, 1982. (Elsevier Sequoia S-A, Lausanne) ⁵⁹

SHAH, K. P. **Construction, Working and Maintenance of Electric Vibrators and Vibrating Screens, 2018.** Disponível em: <www.practicalmaintenance.net>. Acesso em 18 março. 2017. ⁶

STC. **Screening and Feeding.** Disponível em: <<http://www.stcserv.com/en/products/banana->>. Acesso em: 08 jun. 2018.¹⁶

SANDVIK. **Stationary-screens-and-feeder.**

Disponível em : <https://www.rocktecnology.sandvik/en/products/stationary-crushers-and-screens/stationary-screens-and-feeders/ss-and-sf-free-fall-screens/>>. Acesso em: 06 jun. 2018.¹⁷

TAGGART, A. F. **Handbook of mineral dressing.** New York, USA: John Wiley & Sons, 1945.⁴²

TEIXEIRA, H. G., 2013. **Análise e otimização de circuitos de preparação de minérios.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG.³²

TRAJANO, R.B. **Princípios de tratamento de minérios: operações unitárias e aparelhos.** Rio de Janeiro: editora x, 1966.⁴¹

TRENDALL, A. F.; BASEI, M. A. S.; LAETER Jr.; NELSON, D. R. SHRIMP. zircon U-Pb constraints on the age of the Carajás Formation. **Journal South American Earth Sciences**, v. 11, n. 3, p. 265-277, 1998.⁵²

USGS – United States Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries**, p. 105-106, 2018.¹

VALINE, S.; WHEELER, J.; ALBUQUERQUE, L., 2009. Fine Sizing with Derrick Stack Sizer Screen. In: **Recent Advances in Mineral Processing Plant Design.** Colorado: SME – Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2009.²²

VARELA, J. J. Estado da arte do processo de lavagem de minérios: conceito, aplicação e desenvolvimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, n. 23, 2009, Porto Alegre. **Anais...Porto Alegre:** Gramado, 2009, p. 225-232.³⁹

VARELA, J. J. Critérios de seleção de britadores aplicados ao processamento mineral. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, n. 24, 2011, Salvador. **Anais...Salvador:** Gramado, 2011, p. 384-391.⁴⁰

VALE S.A. Acervo Vale – Carajás, 2016.⁴³

VALE S.A. - Acervo Vale Mina de Manganês do Azul, 2017.⁴⁴

WHEELER, J.; PACKER, B. **Increasing capacity and efficiency of grinding circuits with high frequency screens.** In: Proceedings Met. Plant., 2011, Melbourne. Proceedings... Melbourne: editor, 2011, p. xx-xx.²⁵

WILLS, B.A.; FINCH, J. A. **Will's Mineral processing technology-An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. USA: Elsevier Science & Technology Books, 2016. ²³

WIRTH, K.R.; GIBBS A.K.; OLSZEWSKI, W. J. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v.16, n. 2, p.195-200, 1986. ⁵³

WURDINGER MANUFACTURING. **Manufactured Nursery Equipment and Nursery Machinery**. Disponível em: <<http://wurdingermanufacturing.com/nursery-equipment-and-nursery-machinery/trommels/>>. Acesso em: 07 jun. 2018. ¹⁸

ZLEQUIPAMENTOS. Peneira vibratória.

Disponível em: <<http://www.zlequipamentos.com.br>>. Acesso em: 02 de out. 2017. ⁸