

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E PETRÓLEO

MÔNICA KATYUSCA NUNES DE PAIVA

**Diagnóstico e simulação da usina de beneficiamento de bauxita da mina de
Juruti/PA**

SÃO PAULO

2019

MÔNICA KATYUSCA NUNES DE PAIVA

**Diagnóstico e simulação da usina de beneficiamento de bauxita da mina de
Juruti/PA**

Dissertação apresentada ao Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciências.

SÃO PAULO

2019

MÔNICA KATYUSCA NUNES DE PAIVA

**Diagnóstico e simulação da usina de beneficiamento de bauxita da mina de
Juruti/PA**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Junior

SÃO PAULO

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

PAIVA, MÔNICA K. NUNES DE

Diagnóstico e simulação da usina de beneficiamento da bauxita da mina de Juruti/PA / M. K. N. D. PAIVA – São Paulo, 2019.
209 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.BAUXITA (JURUTIPA) 2.BALANÇO DE MASSA
3.POROCESAMENTO DE MINÉRIOS INDUSTRIAIS I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria do Céu, aos meus irmãos Kalina Leila e Júnior Nunes, e ao meu noivo Rhaymá do Carmo, com amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram e incentivaram o desenvolvimento deste trabalho.

À Mina de Bauxita de Juruti da Alcoa, por possibilitar o desenvolvimento do presente estudo, suportando e incentivando cada etapa do mesmo.

Ao professor Dr. Homero Delboni Jr, pelo tempo e atenção dedicado à minha orientação, sempre com direcionamentos precisos e sugestões de imenso valor para o avanço e melhoria do trabalho.

À minha família, em especial minha mãe Maria do Céu e meus irmãos Kalina Leila e Júnior, pelo apoio, incentivo e torcida sempre presentes.

Ao meu noivo, Rhaymá Silva, pela compreensão dos momentos de ausência e por caminhar junto comigo nos momentos mais difíceis sempre me encorajando.

Aos amigos da USP/MinPro Thiago Jatobá, Wellington Lacerda e Victor Giacon, pelos conhecimentos compartilhados, vivência de campo durante a amostragem, suporte efetivo no desenvolvimento do trabalho e pela amizade construída.

Aos amigos Gustavo Correia e Bernardo Bandeira pelo companheirismo durante as viagens para realização das disciplinas na USP, compartilhamento de conhecimentos e motivação para juntos, nos mantermos firmes na busca do nosso objetivo.

À professora Ana Carolina, pela motivação e incentivo para ingressar no mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos amigos Paulo Sérgio, Carlos Cruz, Ever Dias e Daniel Bortoleto, que desde o início desta trajetória me incentivaram e acreditaram no meu trabalho.

RESUMO

Duas campanhas de amostragem foram realizadas no circuito industrial de lavagem de bauxita, localizado em Juruti, PA. O circuito é composto de etapas de britagem, lavagem em *scrubbers*, peneiramento, classificação em ciclones e filtragem. Balanços mássicos e metalúrgicos foram obtidos e modelos matemáticos foram calibrados com auxílio do simulador JKSimMet, de modo a permitir um diagnóstico atual detalhado de cada etapa do processo e possibilitar a execução de simulações. O objetivo foi apresentar cenários que possibilitem identificar oportunidades de melhorias dos índices de desempenho do circuito de beneficiamento, bem como intervenções necessárias para comportar aumentos de capacidade, mantendo os mesmos níveis de qualidade do produto. Considerando o aumento de vazão estipulado, os pontos de atenção identificados nas simulações foram: (a) a eficiência de lavagem, frente a uma consequente redução do tempo de residência conectada à mudança da característica do minério alimentado à usina, (b) capacidade das peneiras primárias e secundárias e (c) eficiências de classificação. Índices de desempenho de cada operação unitária balizaram a etapa de seleção de alternativas na direção de elevar a eficiência dos equipamentos existentes, assim como na inclusão de novos equipamentos e repotenciamento daqueles existentes. Os cenários simulados foram acompanhados de cálculos de recuperação mássica e estimativas sobre a qualidade do produto lavado.

Palavras chave: bauxita; modelos; simulação; otimização de processos.

ABSTRACT

Two sampling campaigns were carried in the industrial bauxite washing circuit, located in Juruti, PA. The circuit is made of crushing, scrubbing wash, screening, cyclone sorting and filtration steps. Mass and Metallurgical balances were obtained, and mathematical models were calibrated with the assistance of JKSimMet simulator, in order to allow a current and detailed diagnosis of each stage of the process and to allow the simulation performances. The objective was to present scenarios which allow identifying improvement opportunities for the beneficiation circuit performance index, as well as necessary interventions to include capacity increases, keeping the same product quality levels. Considering the stipulated increase in flow rate, the identified attention points in the simulations were: (a) washing efficiency, in the face of a consequent reduction in the residence time connected with the change of the ore characteristic fed to the plant, (b) capacity of primary and secondary screens and (c) classification efficiencies. Performance indexes of each unit operation marked the stage of selection of alternatives in the direction of increasing the efficiency of the existing equipment, as well as the addition of new equipment and re-planning those existing ones. Simulated scenarios were followed by mass recovery figures and washed product quality estimates.

Keywords: bauxite; modeling; simulation; process optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Britador de rolos dentados.....	31
Figura 2 – Esquema de um britador de impacto.....	32
Figura 3 - <i>Scrubber</i> acoplado à uma peneira rotativa (<i>trommel</i>).....	33
Figura 4 - Peneira vibratória inclinada.....	35
Figura 5 - Ciclone.....	38
Figura 6 - Representação dos tipos de descarga do <i>apex</i>	38
Figura 7 - Curva de partição real padrão de cilones.....	39
Figura 8 - Curva de partição corrigida.....	41
Figura 9 - Fluxograma do processo de beneficiamento da bauxita na MRN.....	45
Figura 10 - Fluxograma ilustrativo simplificado do processo de beneficiamento da Mineração Paragominas.....	46
Figura 11 - Fluxograma representativo das operações de beneficiamento da CBA.....	48
Figura 12 - Curva de partição típica para a operação de peneiramento.....	51
Figura 13 - Dependência do parâmetro de eficiência N na taxa de alimentação em função do tipo de material do deck.....	53
Figura 14 - Fator “C” em função da abertura da malha da peneira.....	61
Figura 15 - Fator “M” em função da porcentagem de <i>oversize</i> na alimentação.....	61
Figura 16 - Fator “K” em função da porcentagem de material menor que a metade da abertura nominal da alimentação.....	62
Figura 17 – Estimativa de parâmetros dos modelos.....	68
Figura 18 - Simulação para condições operacionais definidas.....	68
Figura 19 - Balanço de massa em um ciclone.....	70
Figura 20 - Localização geográfica da cidade de Juruti.....	78
Figura 21 - Evolução da produção da Mina de Bauxita de Juruti (MTPA).....	79
Figura 22 - Perfil litológico de Juruti.....	81
Figura 23 - Detalhamento da supressão vegetal.....	82
Figura 24 - Método de lavra da bauxita de Juruti.....	83
Figura 25 - Fluxograma da usina.....	85
Figura 26 - Operação da mina de bauxita de Juruti.....	86
Figura 27 - Fluxograma da usina com destaque para os pontos amostrados.....	90
Figura 28 - Treinamento do time da amostragem.....	91
Figura 29 - Amostras coletadas e armazenadas no laboratório físico.....	92
Figura 30 - Série temporal das leituras de vazão mássica da linha 1 e 2 durante 48 horas de operação.....	100
Figura 31 - Série temporal das leituras de vazão mássica da linha 1 durante o seu respectivo período de amostragem.....	100
Figura 32 - Série temporal das leituras de vazão mássica da linha 2 durante o seu respectivo período de amostragem.....	101
Figura 33 - Série temporal das leituras de densidade da polpa alimentada à ciclonagem da linha 1 durante o seu período de amostragem.....	102
Figura 34 - Série temporal das leituras de densidade da polpa alimentada à ciclonagem da linha 2 durante o seu período de amostragem.....	102
Figura 35 - Série temporal das leituras de vazão volumétrica de polpa alimentada à ciclonagem da linha 1 durante o seu período de amostragem.....	103

Figura 36 - Série temporal das leituras de vazão volumétrica de polpa alimentada à ciclonagem da linha 2 durante o seu período de amostragem.	104
Figura 37 - Série temporal dos registros de pressão das baterias de ciclones da linha 1 durante o seu período de amostragem.	104
Figura 38 - Série temporal dos registros de pressão das baterias de ciclones da linha 2 durante o seu período de amostragem.	105
Figura 39 - Fluxograma para o caso base da linha 1.	110
Figura 40 - Fluxograma para o caso base da linha 2.	115
Figura 41 - Distribuição granulométrica do produto granulado experimental e simulado para o caso base.	129
Figura 42 - Distribuição granulométrica do produto fino experimental e simulado para o caso base.	129
Figura 43 - Distribuição granulométrica do produto combinado (granulado + finos) experimental e simulado para o caso base.	130
Figura 44 - Série temporal dos resultados de recuperação mássica (resultado diário).	132
Figura 45 - Série temporal dos resultados de partição do produto final (resultado diário).	133
Figura 46 - Histograma e <i>box plot</i> para os dados históricos da recuperação da usina.	134
Figura 47 - Histórico de distribuição granulométrica da alimentação da usina.	135
Figura 48 - Distribuição granulométrica para o minério fino, médio e grosso.	136
Figura 49 - Fluxograma SIM 1A.	139
Figura 50 - Distribuição granulométrica do produto granulado para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento reduzida.	143
Figura 51 - Distribuição granulométrica do produto granulado para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento da amostragem.	143
Figura 52 - Distribuição granulométrica do produto fino para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento reduzida.	145
Figura 53 - Distribuição granulométrica do produto fino para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento da amostragem.	145
Figura 54 - Comparação da degradação entre o lavador da linha 1 e linha 2.	149
Figura 55 - Revestimento interno do lavador da linha 1.	151
Figura 56 - Revestimento interno do lavador da linha 2.	151
Figura 57 - Função descarga e taxas de quebra para o lavador da linha 1.	152
Figura 58 - Curvas granulométricas da alimentação e produto do lavador para as simulações realizadas.	152
Figura 59 - Fluxograma SIM 1B.	183
Figura 60 - Fluxograma SIM 2A.	187
Figura 61 - Fluxograma SIM 2B.	191
Figura 62 - Fluxograma SIM 3A.	195
Figura 63 - Fluxograma SIM 3B.	199

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de reservas e produção de bauxita e produção de alumina.	28
Tabela 2 - Produção brasileira de bauxita (base úmida, unidade:1.000 toneladas).	43
Tabela 3 - Valores do fator “Q3” em função do tamanho de separação.....	63
Tabela 4 - Balanço de massa de um ciclone.....	72
Tabela 5 - Série de peneiras utilizadas para processamento das amostras.	93
Tabela 6 - Variáveis registradas no PIMS referente ao dia da amostragem.	99
Tabela 7 - Correlação de Pearson para as variáveis da linha 1.	106
Tabela 8 - Correlação de Pearson para as variáveis da linha 2.....	106
Tabela 9 - Parâmetros geométricos e operacionais dos lavadores e britador durante a amostragem (linha 1).	108
Tabela 10 - Parâmetros geométricos e de operação das peneiras durante a amostragem (linha 1).	108
Tabela 11 - Parâmetros geométricos e de operação dos ciclones durante a amostragem (linha 1).	109
Tabela 12 - Balanço de massa para o caso base da linha 1: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.	111
Tabela 13 - Balanço de massa para o caso base da linha 1: ciclonagem primária e secundária de finos (ciclones de 26”) e superfinos (ciclones de 10”)......	112
Tabela 14 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 1: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.	113
Tabela 15 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 1: ciclonagem primária e secundária de finos (ciclones de 26”), e primária e secundária de superfinos (ciclones de 10”)......	114
Tabela 16 - Balanço de massa para o caso base da linha 2: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.	117
Tabela 17 - Balanço de massa para o caso base da linha 2: ciclonagem primária e secundária de finos (ciclones de 26”), e primária e secundária de superfinos (ciclones de 10”)......	118
Tabela 18 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 2: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.	119
Tabela 19 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 2: ciclonagem primária e secundária de finos (ciclones de 26”), e ciclonagem primária e secundária de superfinos (ciclones de 10”).	120
Tabela 20 - Índices de eficiência para o caso base da linha 1.	122
Tabela 21 - Análise da fração passante na malha 0,037 mm (linha 1).....	123
Tabela 22 - Índices de eficiência para o caso base da linha 2.	124
Tabela 23 - Análise da fração passante na malha 0,037 mm (linha 2).....	125
Tabela 24 - Comparativo entre as eficiências da linha 1 e linha 2.	126
Tabela 25 - Parâmetros do modelo de curva de eficiência aplicado ao peneiramento.	128
Tabela 26 - Parâmetros dos modelos Nageswararao aplicado à ciclonagem.	128
Tabela 27 - Estatística descritiva para os dados históricos de recuperação mássica da usina e partição do produto final entre granulados e finos.	133

Tabela 28 - Distribuição granulométrica para o minério fino, médio e grosso.	136
Tabela 29 - Cenários selecionados para simulação.	138
Tabela 30 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento da rebitagem, primário e secundário (SIM 1A).	140
Tabela 31 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e primária e secundária de superfinos (SIM 1A).	141
Tabela 32 - Índices de eficiência para a simulação SIM 1A.	142
Tabela 33 - Distribuição granulométrica do produto granulado para os cenários simulados.	144
Tabela 34 - Distribuição granulométrica do produto fino para os cenários simulados.	146
Tabela 35 - Eficiência das etapas do processo de beneficiamento.	147
Tabela 36 - Comparação da degradação entre o lavador da linha 1 e linha 2.	150
Tabela 37 - Distribuição granulométrica dos lavadores para as simulações realizadas.	153
Tabela 38 - Parâmetros do <i>trommel</i>	154
Tabela 39 - Resultados das simulações para o rebitador, considerando a massa direcionada pelas duas linhas para o mesmo.	154
Tabela 40 - Parâmetros da peneira da rebitagem para o primeiro <i>deck</i>	156
Tabela 41 - Parâmetros da peneira da rebitagem para o segundo <i>deck</i>	157
Tabela 42- Parâmetros das peneiras de grossos para o primeiro <i>deck</i>	159
Tabela 43 - Parâmetros das peneiras de grossos para o segundo <i>deck</i>	160
Tabela 44 - Área necessária e espessura da camada para cada cenário simulado para o peneiramento de intermediário, primeiro <i>deck</i>	162
Tabela 45 - Parâmetros das peneiras de intermediários para o segundo <i>deck</i>	164
Tabela 46 - Análise de capacidade das baterias de ciclones.	166
Tabela 47 - Sumário das intervenções requeridas nos equipamentos.	169
Tabela 48 - Eficiência de classificação global.	170
Tabela 49 - Resultados das simulações para aumento de recuperação mássica...	172
Tabela 50 - Resultados das simulações para aumento de qualidade do produto para as simulações de SIM 1B a 7B.	174
Tabela 51 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 1B).	184
Tabela 52 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 1B).	185
Tabela 53 - Índices de eficiência para a simulação SIM 1B.	186
Tabela 54 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 2A).	188
Tabela 55 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 2A).	189
Tabela 56 - Índices de eficiência para a simulação SIM 2A.	190
Tabela 57 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 2B).	192
Tabela 58 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 2B).	193
Tabela 59 - Índices de eficiência para a simulação SIM 2B.	194

Tabela 60 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 3A).....	196
Tabela 61 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 3A).....	197
Tabela 62 - Índices de eficiência para a simulação SIM 3A.	198
Tabela 63 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 3B).	200
Tabela 64 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 3B).....	201
Tabela 65 - Índices de eficiência para a simulação SIM 3B.	202

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO
ACM	ACUMULADO
AG	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
ALUNORTE	ALUMÍNIO DO NORTE DO BRASIL S.A.
CB	CASO BASE
CBA	COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO
DIT	INDICADOR E TRANSMISSOR DE DENSIDADE
EF	EFICIÊNCIA DO PENEIRAMENTO
FIT	INDICADOR E TRANSMISSOR DE VAZÃO
IM	IMPERFEIÇÃO DE MALHA
JKMRC	<i>JULIUS KRUTTSCHNITT MINERAL RESEARCH CENTRE</i>
MRN	MINERAÇÃO RIO DO NORTE
MTPA	MILHÕES DE TONELADAS POR ANO
O/F	<i>OVERFLOW</i>
O/S	<i>OVERSIZE</i>
PIT	INDICADOR E TRANSMISSOR DE PRESSÃO
R.O.M.	<i>RUN OF MINE</i>
SIM 1A	SIMULAÇÃO COM GRANULOMETRIA MÉDIA E EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO REDUZIDA
SIM 1B	SIMULAÇÃO COM GRANULOMETRIA MÉDIA E EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO TAL QUAL A DA AMOSTRAGEM
SIM 2A	SIMULAÇÃO COM GRANULOMETRIA GROSSA E EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO REDUZIDA
SIM 2B	SIMULAÇÃO COM GRANULOMETRIA GROSSA E EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO TAL QUAL A DA AMOSTRAGEM

SIM 3A	SIMULAÇÃO COM GRANULOMETRIA FINA E EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO REDUZIDA
SIM 3B	SIMULAÇÃO COM GRANULOMETRIA FINA E EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO TAL QUAL A DA AMOSTRAGEM
TPH	TONELADAS POR HORA
U.S.G.S	UNATED STATESGEOLOGICAL SURVEY
U/F	<i>UNDERFLOW</i>
U/S	<i>UNDERSIZE</i>
UN	UNIDADE
VOL	VOLUMÉTRICA

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Mesh
%SOLa	Porcentagem de sólidos na alimentação
%SOLo	Porcentagem de sólidos no <i>overflow</i>
%SOLu	Porcentagem de sólidos no <i>underflow</i>
"	Polegada
AL	Vazão de sólidos na alimentação
ai	Percentual de massa em cada fração granulométrica da alimentação
β	Ponto de inflexão superior da curva de partição para o <i>overflow</i>
β^*	Parâmetro que ajusta a curva de partição para que esta tenha ordenada igual a 0,5C para a abscissa $d = 50$
C	$100 - \beta_a$
Cp	Capacidade básica par separação específica (m^3/h de alimentação por m^2 de área da peneira).
Cv	Fração volumétrica de sólidos na alimentação do ciclone
$d_{50 \text{ exp}}$	Tamanho de partícula real ou experimental no qual o fluxo de alimentação se divide 50% para o <i>underflow</i> e 50% para o <i>overflow</i>
d_{50c}	Tamanho de partícula corrigido no qual o fluxo de alimentação se divide 50% para o <i>underflow</i> e 50% para o <i>overflow</i>
D_c	Diâmetro do ciclone (m)
D_i	Diâmetro do círculo cuja área é equivalente à área do <i>inlet</i>
D_o	Diâmetro do <i>vortex finder</i> (m)
D_u	Diâmetro do <i>apex</i> (m)
$E_0(x)$	Fração de partículas presente na alimentação que passam ao produto grosso
f_0	Fração de área aberta

FP	Fator de projeto que depende do nível de incerteza em relação ao minério a ser peneirado (variando geralmente de 1 a 1,4).
h	Abertura da peneira
k	Parâmetro utilizado para fins de ajuste da curva
K	Fator relativo à porcentagem de material da alimentação inferior à metade do tamanho da operação especificada.
L	Número de fluxos
L_c	Comprimento da parte cilíndrica
M	Fator dependente da porcentagem de material retido na peneira
n	Número de medidas realizadas
N	Parâmetro de eficiência
O	Vazão de sólidos no <i>overflow</i>
oi	Percentual de massa em cada fração granulométrica do <i>overflow</i>
ui	Percentual de massa em cada fração granulométrica do <i>underflow</i>
P	Pressão
P80	Diâmetros cuja porcentagem passante é 80%
P_{ci}	Partição corrigida de partículas contidas na malha i
P_{ri}	Partição real de partículas contidas na malha i
Q_i	Vazão medida para o fluxo i
q_i	Vazão ajustada
Q_n	Fator de correção resultante da multiplicação entre os fatores Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 e Q_6 .
SSQ	Soma do quadrado dos desvios
s_i	Desvios padrão para as vazões
s_{ij}	Desvios padrão para as medidas
T	Alimentação do deck da peneira
t/h	Tonelada por hora

t/m^3	Tonelada por metro cúbico
U	Vazão de sólidos no <i>underflow</i>
X	Medida experimental
x	Valor ajustado de X
α	Inclinação da curva no segmento próximo ao d_{50c} .
β_a	Partição de água (fluido)
Θ	Ângulo da parte cônica do ciclone (graus)
ρ_p	Densidade de polpa na alimentação

Todas as medidas empregadas seguiram o sistema internacional, as exceções estão listadas no texto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	OBJETIVO	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1	BAUXITA	26
3.2	OPERAÇÕES UNITÁRIAS DO BENEFICIAMENTO DE BAUXITA	29
3.2.1	Cominuição	30
3.2.2	Lavagem e Desagregação	33
3.2.3	Peneiramento	34
3.2.4	Classificação	37
3.3	CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITOS BRASILEIROS DE BENEFICIAMENTO DE BAUXITA	42
3.3.1	Mineração Rio do norte	44
3.3.2	Mineração Paragominas	46
3.3.3	Companhia Brasileira do Alumínio	47
3.4	MODELAGEM MATEMÁTICA	48
3.4.1	Modelo matemático da operação de peneiramento	51
3.4.2	Modelo matemático de ciclones	55
3.5	METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PENEIRAS	58
3.5.1	Método <i>Allis-Chalmers</i> para dimensionamento de peneiras	59
3.6	DIAGNÓSTICO E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	63
3.6.1	Balanco de Massa	69
3.7	AMOSTRAGEM INDUSTRIAL	74
4	DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO	78
4.1	LOCALIZAÇÃO	78
4.2	HISTÓRICO	79
4.3	ASPECTOS GEOLÓGICOS E RESERVAS	80
4.4	DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO	82
4.4.1	Supressão vegetal e método de lavra	82
4.4.2	Beneficiamento	83
4.4.3	Estocagem, transporte e expedição	85
4.4.4	Controle de qualidade	87
5	MÉTODO	88
5.1	AMOSTRAGEM INDUSTRIAL	88
5.2	PROCESSAMENTO FÍSICO E QUÍMICO DAS AMOSTRAS	92

6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	98
6.1	AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA PLANTA DURANTE A AMOSTRAGEM	98
6.2	BALANÇOS DE MASSA E FLUXOGRAMAS	107
6.2.1	Linha 1	107
6.2.2	Linha 2	114
6.3	DIAGNÓSTICO DE DESEMPENHO	121
6.3.1	Linha 1	121
6.3.2	Linha 2	123
6.3.3	Comparativo da eficiência das duas linhas	126
7	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS E SIMULAÇÕES	128
7.1	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS	128
7.2	IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS OPERACIONAIS PARA AUMENTO DE CAPACIDADE	130
7.2.1	Premissas das simulações	131
7.2.1.1	Recuperação	132
7.2.1.2	Eficiências de peneiramento	137
7.2.1.3	Cenários simulados	137
7.2.2	Resultados das simulações dos cenários propostos	143
7.2.3	Análise de necessidade de intervenção nos equipamentos para aumento de produção	148
7.2.3.1	Lavadores rotativos com <i>trommel</i>	148
7.2.3.2	Rebritador	154
7.2.3.3	Peneira da Rebritagem	155
7.2.3.4	Peneiramento primário ou peneiramento de grossos	158
7.2.3.5	Peneiramento secundário ou peneiramento de intermediários	161
7.2.3.6	Ciclonagem	165
7.2.3.7	Resumo das alterações necessárias	168
7.3	SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DE MELHORIAS DE DESEMPENHO NO CIRCUITO DE CLASSIFICAÇÃO	169
7.3.1	Simulações com objetivo de aumento de recuperação mássica	170
7.3.2	Simulações com o objetivo de aumento de qualidade do produto	173
8	CONCLUSÕES	176
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	178

Apêndice A – Resultados das simulações para os cenários simulados variando-se a granulometria da alimentação da usina e eficiência de peneiramento.....	182
--	------------

1 INTRODUÇÃO

A bauxita é a principal fonte natural para obtenção de alumínio metálico, sendo este o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre. Mesmo com sua elevada abundância, não há notícias acerca da ocorrência de alumínio metálico na natureza (SAMPAIO *et al.*, 2005). A bauxita apresenta coloração avermelhada e é encontrada, sobretudo, em regiões tropicais e subtropicais do planeta, uma vez que se trata de um minério residual, formado mediante a ação de intemperismo sobre aluminossilicatos.

De acordo com a U.S.G.S. (2019) as reservas mundiais conhecidas de bauxita estão estimadas entre 55 a 75 bilhões de toneladas e estão distribuídas na África (32%), Oceania (23%), América do Sul e Caribe (21%), Ásia (18%) e outros (6%). Com base no consumo e níveis de aproveitamento atuais, a estimativa é que as reservas mundiais atuais sejam suficientes para atender à demanda dos mercados globais pelos próximos 250 a 300 anos.

A bauxita ocupa a segunda posição de recursos naturais produzidos e beneficiados no Brasil, com cerca de 38 milhões de toneladas anuais (ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2017). No panorama global, a produção brasileira de bauxita em 2017 ocupou o quarto lugar com 38,5 milhões de toneladas produzidas, antecedida pela Austrália, China e Guiné, respectivamente com 87,9, 70 e 46,2 milhões de toneladas (U.S.G.S., 2019).

São quatro as principais mineradoras de bauxita do Brasil. A Mineração Rio do Norte (MRN), uma das pioneiras em projetos industriais de grande porte na Amazônia iniciou sua operação em 1979, conta com capacidade atual de 18,3 MTPA de bauxita. A Hydro Paragominas, que iniciou suas operações em 2007, conta com capacidade de produção de 10 MTPA. A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), empresa do grupo Votorantim, atua nos municípios de Poços de Caldas, Itamarati de Minas e Mirai em Minas Gerais. Poços de Caldas apresenta capacidade de 1 MTPA e Mirai com capacidade instalada de 2,4 MTPA. Já a mina de Itamarati de Minas encerrou a produção em 2015. A quarta mina importante de bauxita é a Alcoa Juruti, foco do presente trabalho, que iniciou suas operações em setembro de 2009 com uma

produção à época de 2,6 MTPA e que opera atualmente com uma capacidade de 7,5 MTPA de bauxita.

O grau de complexidade do beneficiamento da bauxita para atender às especificações do processo de refino e transformação em alumina é função das características físicas e químicas de cada minério. O beneficiamento da bauxita que inclui a assim denominada lavagem, é uma operação realizada apenas no Brasil, uma vez que nos demais países produtores tais como a Austrália e a China, o minério é enviado diretamente da lavra para etapas de cominuição e então para as refinarias. Desta forma, as refinarias internacionais são configuradas para receber bauxitas de baixos teores de alumina aproveitável, e ainda com a presença de contaminantes e elementos deletérios (CHAVES *et al.*, 2007a).

Em função do cenário de crises econômicas e da elevada competitividade no mercado mineral, as empresas buscam melhorar o desempenho, produtividade e confiabilidade dos respectivos processos de beneficiamento de minérios. Neste contexto, há necessidade de avaliar, diagnosticar e propor melhorias para os processos de maneira rápida e eficiente. Neste sentido, surge a aplicação da modelagem matemática dos processos produtivos por meio do uso de simuladores, que se destacam como um recurso poderoso, pois permitem prever o desempenho, bem como otimizar as operações unitárias de forma rápida, confiável e a um relativo baixo custo.

O processo de simulação tem por base modelos matemáticos calibrados para a operação selecionada. Inicia-se assim com o planejamento e execução de amostragens dos fluxos em cada equipamento do processo. Na sequência do tratamento de amostras oriundas da amostragem são aplicadas rotinas de balanço de massa, cujo conjunto de dados consistentes será a base para calibração de modelos matemáticos de equipamentos de processo. Tais modelos calibrados e integrados em um fluxograma de processos serão então empregados para simulações que assim visem a melhoria de desempenho local ou global do circuito industrial. Uma das grandes vantagens da simulação é a economia de tempo e recursos na identificação de alternativas que possibilitem a melhoria de desempenho dos processos ou até mesmo defina novas rotas de beneficiamento para projetos em desenvolvimento.

Neste sentido, o presente trabalho pretendeu diagnosticar o desempenho, calibrar modelos matemáticos e realizar simulações do processo de beneficiamento da mina de bauxita de Juruti, a partir de amostragens conduzidas na usina industrial. Constou inicialmente de uma revisão bibliográfica sobre os principais circuitos brasileiros de beneficiamento de bauxitas, seguida de revisão de modelagem das operações unitárias envolvidas no beneficiamento de bauxita. As análises das amostragens, dos balanços de massas e das calibrações de modelos constituíram-se na base para os exercícios de simulação, estes visando tanto aumentos de eficiência das atuais operações unitárias que compõem o processo, quanto alternativas para o aumento de produção ou expansão.

2 OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo calibrar modelos matemáticos e simular o processo de beneficiamento da bauxita de Juruti, visando diagnosticar o respectivo desempenho, assim como identificar oportunidades de melhoria de eficiência operacional e oportunidades de expansão de capacidade.

O estudo foi realizado a partir de amostragens realizadas no circuito industrial de beneficiamento de bauxita de Juruti, PA, incluindo também o uso de programas computacionais, atualmente bastante difundidos na indústria mineral. No presente trabalho foi utilizado o simulador JKSimMet, versão 6.0.1, desenvolvido pelo JKMRC - *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*, da Universidade de Queensland, na Austrália.

Os objetivos específicos do presente trabalho foram os seguintes:

- i. Realizar uma pesquisa bibliográfica acerca das operações unitárias que compõem o beneficiamento da bauxita e suas operações no Brasil;
- ii. Estabelecer balanços de massas e metalúrgico do processo da usina de Juruti;
- iii. Quantificar o desempenho de cada etapa do processo da usina de Juruti;
- iv. Calibrar um modelo integrado para a operação atual da usina de Juruti;
- v. Através de simulações, propor melhorias dos índices de desempenho do circuito de beneficiamento;
- vi. Através de simulações, propor melhorias ou intervenções nas operações unitárias para comportar aumentos de capacidade, mantendo-se os mesmos níveis de qualidade do produto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre os fundamentos relacionados ao tema do trabalho, quais sejam, bauxita e suas características, operações unitárias empregadas no seu beneficiamento, principais configurações dos circuitos de beneficiamento de bauxita do Brasil, descrição dos fundamentos da modelagem matemática, esta última com ênfase nos modelos aplicados às operações de peneiramento e ciclonação. Por fim, um resumo sobre diagnóstico e simulação de processo é apresentado, destacando informações sobre a amostragem industrial, etapa base para trabalhos de desenvolvimento de balanços de massa, metalúrgico e simulações de processo.

3.1 BAUXITA

A bauxita foi descoberta em 1821 por Berthier, na localidade de Les Baux, no sul da França. Trata-se de uma rocha de coloração avermelhada, rica em alumínio, com mais de 40% de alumina (Al_2O_3). A proporção dos óxidos de ferro determina a coloração da rocha. Assim, a bauxita branca contém de 2 a 4% de óxidos de ferro, ao passo que na bauxita vermelha essa proporção atinge 25%.

A bauxita é a fonte natural do alumínio, o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. Mesmo com sua elevada abundância, não há notícias acerca da ocorrência de alumínio metálico na natureza. Constata-se sua maior ocorrência na forma combinada com outros elementos, principalmente o oxigênio, com o qual forma alumina (SAMPAIO *et al.*, 2005).

A rocha bauxita compõe-se de uma mistura de minerais de alumínio, sendo os mais importantes a gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, o diásporo $\text{AlO}(\text{OH})$ e a boehmita $\text{AlO}(\text{OH})$. Esses minerais são conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio, cujas proporções na rocha, variam muito entre os depósitos, bem como o tipo e a quantidade das impurezas do minério, tais como: óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, entre outras.

São considerados dois tipos de bauxita, em função da sua aplicação industrial. O primeiro tipo, bauxita de grau metalúrgico, apresenta maior proporção de gibbsita e é utilizada na produção de alumínio metálico. Neste tipo de bauxita a presença de diásporo (AlOOH) é deletéria, uma vez que este exige uma temperatura maior para que ocorra a sua solubilização. O segundo tipo é a bauxita de grau não metalúrgico: amplamente aplicada em diversas áreas da indústria, como refratários, abrasivos, cimentos, indústria química (principalmente na produção de sulfato de alumínio) e outros. Apresenta maior proporção de diásporo em relação aos demais óxidos de alumínio.

A composição típica da bauxita de uso industrial é: 40%-60% de Al_2O_3 ; 12%-30% de H_2O combinada; 1%-15% de SiO_2 livre e combinada; 1%-30% de Fe_2O_3 ; 3%-4% de TiO_2 ; 0,05%-2% de outros elementos e óxidos (GREENWOOD, 1997).

A sílica, sob a forma de quartzo, tem comportamento inerte no processo Bayer para produção de alumina. Entretanto, os silicatos que integram a estrutura dos minerais de argila, denominados genericamente de sílica reativa, pois se referem ao dióxido de silício, reagem com soda cáustica durante a digestão da bauxita, formando compostos insolúveis. À medida que aumenta o teor de sílica reativa no minério, o crescimento do consumo de soda cáustica cresce em escala geométrica. Portanto, teores elevados de sílica reativa inviabilizam a utilização econômica da bauxita, como matéria-prima, para produção de alumínio (DAMASCENO, 1998).

Os óxidos de ferro normalmente estão presentes na composição física das bauxitas sob a forma de hematita, goethita ou, ainda, uma mistura desses óxidos. Os óxidos de ferro, juntamente com outras impurezas, vão constituir as denominadas lamas vermelhas do processo Bayer para produção de alumina. Os óxidos de titânio comumente presentes são o anatásio e o rutilo. O rutilo não reage durante o processo de digestão da bauxita, independentemente dessa digestão ocorrer à baixa ou alta temperatura. O anatásio, entretanto, é reativo nos processos ditos de alta temperatura, tendendo a inibir a precipitação da boehmita (DAMASCENO, 1998).

Além dos minerais já descritos, uma considerável variedade de elementos químicos e minerais podem estar presentes, em proporções consideradas pequenas, como cálcio, magnésio, fósforo, manganês, vanádio e gálio. Compostos orgânicos

normalmente ocorrem associados ao horizonte constituído por solos, onde o desenvolvimento da vegetação é frequentemente estimulado pelas altas taxas de precipitação pluviométrica, necessárias à consumação do processo de bauxitização (ANDREWS, 1984).

A caracterização dos minerais presentes na bauxita, assim como das impurezas, é de fundamental importância na fixação e controle dos parâmetros extrativos para a produção de alumina, com emprego do processo Bayer. A eficiência da extração da alumina é consequência direta da composição mineralógica, assim como da temperatura e pressão de digestão do minério moído nas soluções de soda cáustica.

No panorama global, a produção brasileira de bauxita em 2017 ocupou o quarto lugar, antecedido por Austrália, China e Guiné. A Tabela 1 apresenta a distribuição de reservas e produção de bauxita, bem como produção de alumina. Os dados de produções de 2017 referem-se aos efetivamente realizados, enquanto que os dados de 2018 foram estimados.

Tabela 1 - Distribuição de reservas e produção de bauxita e produção de alumina.

País	Alumina		Bauxita		Reservas
	2017	2018 ^e	2017	2018 ^e	
Austrália	20.500	19.000	87.900	75.000	6.000.000
China	69.000	72.000	70.000	70.000	1.000.000
Guiné	-	100	46.200	50.000	7.400.000
Brasil	10.900	7.900	38.500	27.000	2.600.000
Índia	6.060	6.500	22.900	24.000	660.000
Jamaica	1.780	2.500	8.250	10.000	110.000
Rússia	2.820	2.800	5.520	5.500	3.700.000
Indonésia	1.300	1.300	2.900	7.100	1.200.000
Vietnã	900	1.100	2.400	2.500	5.200.000
Malásia	-	-	2.000	2.000	500.000
Estados Unidos	1.430	1.500	W	W	20.000
Canadá	1.570	1.600	-	-	-
Outros Países	12.700	13.200	22.500	22.000	-
Total Mundo	15.700	16.300	22.500	22.000	20.000

Fonte: U.S.Geological Survey (2018). ^eEstimada; W Retido para evitar a divulgação de propriedade da empresa.

O crescente aumento da demanda por alumínio pelo mercado mundial e a exaustão de reservas de alto teor são fatores que levam à busca por melhorias das rotas de beneficiamento, almejando a otimização dos parâmetros de desempenho e, conseqüentemente, a qualidade do produto.

3.2 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DO BENEFICIAMENTO DE BAUXITA

O processo de beneficiamento da bauxita consiste em um conjunto de operações unitárias com o objetivo de remover a fração argilosa e os minerais de sílica, que são considerados contaminantes. De modo geral, tem-se dois grupos de processos para o beneficiamento da bauxita, um para o beneficiamento com fins metalúrgicos e outro grupo para fins não metalúrgicos. O grupo do beneficiamento para fins metalúrgicos é geralmente composto por etapas de britagem, atrição, peneiramento, classificação, filtragem e secagem, este último opcionalmente. O grupo do beneficiamento para fins não metalúrgicos contempla de maneira geral, operações unitárias de britagem, atrição, peneiramento, separação em meio denso, separação magnética, filtragem e secagem, esta última também como uma operação opcional. Dependendo das especificações e objetivos do empreendimento, operações específicas podem ser aplicadas para atender aos parâmetros de qualidade específicos requeridos pelos clientes.

A seguir são apresentadas as principais operações unitárias aplicadas no beneficiamento da bauxita para fins metalúrgicos, contemplando os tipos de equipamentos mais comumente utilizados nas usinas industriais de beneficiamento de bauxita do Brasil.

3.2.1 Cominuição

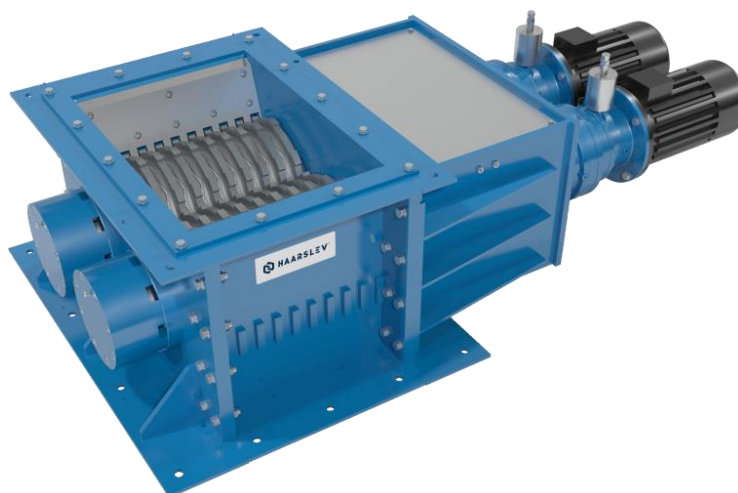
A cominuição é geralmente a primeira operação no processamento mineral e caracteriza-se pelo conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas, realizado de maneira controlada e com o objetivo de controlar o tamanho máximo dos produtos, evitando a geração de quantidades excessivas de finos (CHAVES,2012b). As operações de cominuição são de extrema importância no beneficiamento mineral por permitirem a adequação do material para transporte contínuo e manuseio, preparação da superfície do minério e liberação do mineral de interesse para os processos posteriores, sejam eles de concentração, reação química ou outro.

De acordo com Chaves (2012b) as operações de cominuição são geralmente estagiadas e são constituídas por britagem e/ou moagem. Estas duas operações são diferentes tanto em termos da faixa de tamanho considerada para aplicação, como também nos mecanismos de redução de tamanho. Na britagem, as partículas grosseiras sofrem a ação de forças de compressão, cisalhamento ou de impacto dependendo da relação de redução requerida, bem como do volume de material a ser britado. Esta operação caracteriza-se por uma relação de redução pequena se comparado à moagem. Reduções na ordem de 8:1 podem ser observadas em britagens primárias e de até 20 vezes em estágios com britagem quaternária. Na moagem o processo de cominuição se restringe às frações mais finas e a abrasão e arredondamento de partículas/arestas são os mecanismos envolvidos. A moagem leva a relações de redução grandes e usualmente é realizada em dois estágios: a grossa em moinho de barras e circuito aberto, e a fina em moinhos de bolas e circuito fechado. Rosa (2013) destaca que com os avanços tecnológicos dos equipamentos, a faixa granulométrica de trabalho das operações foram ampliadas e destaca que é possível encontrar moinhos autógenos ou semi-autógenos, por exemplo, alimentados diretamente com ROM, sendo a operação responsável por toda a redução de tamanho requerida em um único estágio. No beneficiamento da bauxita tanto a britagem como a moagem são aplicadas para atingir as especificações granulométricas do produto beneficiado.

Os tipos de britadores mais comumente utilizados no beneficiamento de bauxita são do tipo *sizer* ou rolos dentados, e, dependendo da operação, podem ser encontrados britadores de impacto.

Os britadores de rolos dentados consistem basicamente de dois rolos de aço que giram à mesma velocidade em sentidos contrários, mantendo entre si uma distância definida, conforme mostra a foto da Figura 1. Este tipo de britador é destinado a materiais friáveis ou de fácil fragmentação (FIGUEIRA *et al.*, 2010.). A alimentação é realizada descarregando-se o R.O.M. entre os rolos, cujo movimento resulta na passagem do minério entre os rolos promovendo, então, a fragmentação. A distância entre os rolos e os diâmetros dos mesmos está diretamente relacionada à granulometria do material alimentado ao mesmo.

Figura 1 - Britador de rolos dentados.

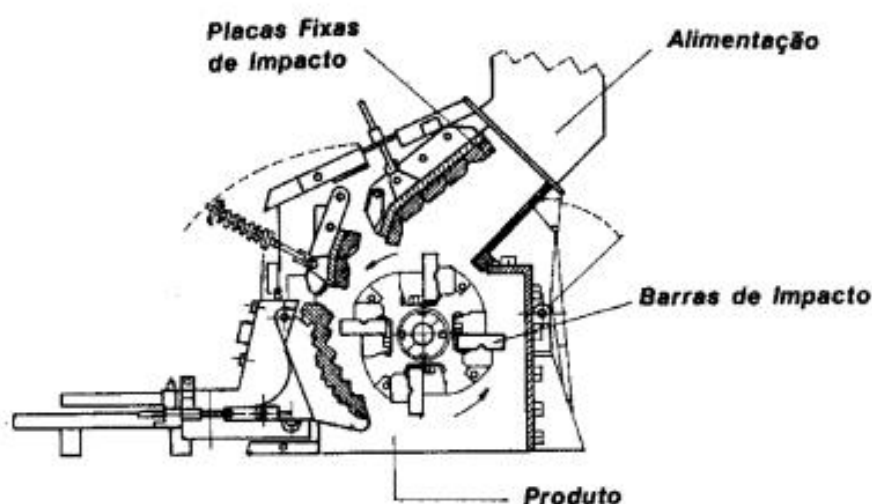


Fonte: imagens google.

Os elementos que promovem a fragmentação de minérios em britadores de impacto são barras metálicas que giram em um rotor em velocidades de 500 rpm até 3.000 rpm. O impacto das barras com o minério e/ou deste com as placas fixas de impacto no interior da câmara de britagem promovem uma fragmentação intensa, conforme ilustrado na Figura 2. Este tipo de britador apresenta, geralmente, elevado custo de manutenção devido ao desgaste, principalmente para minérios que

apresentam teor de sílica livre maior que 15%. Nos circuitos de beneficiamento de bauxita onde são aplicados este tipo de equipamento, são obtidos alta razão de redução e proporção elevada de finos gerados.

Figura 2 – Esquema de um britador de impacto.



Fonte: imagens google.

Moinhos de bolas e/ou moinhos de barras são os mais aplicados no processo de beneficiamento da bauxita. Moinhos de barras são tubulares e horizontais, possuindo barras como meio moedor. São selecionados devido à capacidade de processar a alimentação relativamente grossa (50 mm), gerando produtos relativamente finos (0,5 mm).

Moinho de bolas são também tubulares e horizontais, promovendo a fragmentação por meio de bolas geralmente de aço. São mais adequados à moagem fina, pois as bolas possuem maior área superficial por unidade de peso em relação a barras. Um caso de aplicação de moagem já no beneficiamento de bauxita na mina é encontrado na Mineração Paragominas, conforme descrito na sequência deste trabalho.

3.2.2 Lavagem e Desagregação

A lavagem da bauxita tem por objetivo promover a remoção de partículas finas, geralmente menores do que 0,037 mm, faixa de tamanho em que se concentram os argilominerais considerados contaminantes no processo produtivo. Como as partículas finas encontram-se geralmente aderidas às partículas minerais de maior tamanho, a lavagem promove a desagregação entre as frações granulométricas, que em etapas posteriores são separadas.

Para a realização da lavagem e desagregação da bauxita são empregados os seguintes equipamentos, com diferentes capacidades e especificações técnicas: *Log Washers*, *Haver Hydro-Clean*, Máquina de Atrição e o *Drum Scrubber* ou *Scrubber* (COSTA, 2010). Nas usinas de beneficiamento de bauxita, o equipamento mais comumente utilizado é o *scrubber* acoplado à uma peneira rotativa, ou *trommel*, conforme mostra a foto da Figura 3.

Figura 3 - *Scrubber* acoplado à uma peneira rotativa (*trommel*).



Fonte: imagens google.

O *scrubber* também denominado lavador rotativo ou tambor desagregador, é o equipamento mais utilizado na lavagem de bauxitas. Para promover a desagregação, o minério é alimentado juntamente com água na câmara cilíndrica giratória. O revestimento interno do *scrubber* é constituído por barras elevatórias, cuja função é

atritar e prover o levantamento do material durante o movimento giratório. Com o movimento giratório e o contato entre as partículas na presença de água, as partículas finas são desagregadas e o material é impulsionado para o *trommel*. A fração de partículas retidas no *trommel* geralmente segue para uma etapa de rebitagem, enquanto a fração passante segue para estágios subsequentes de peneiramento. Variáveis como concentração de sólidos da polpa, tempo de residência da polpa na câmara de escrubagem, velocidade de rotação do tambor, altura das barras elevatórias internas e o volume útil ocupado impactam significativamente no desempenho da lavagem e desagregação. Costa (2010) descreve como estas variáveis podem impactar no processo de escrubagem.

3.2.3 Peneiramento

Peneiramento é a operação unitária responsável por separar uma população de partículas em duas frações de diferentes tamanhos, aquela retida na tela, o *oversize*, e passante, *undersize*. Esta separação acontece pela passagem do material sobre telas, ou gabaritos, de aberturas pré-definidas com base na especificação de cada processo. O peneiramento pode ser realizado a seco, quando o material é peneirado apenas com sua umidade natural, e a úmido, quando o material é alimentado à peneira em forma de polpa e há adição de água sobre o minério disposto na peneira (CHAVES, 2012b).

O peneiramento pode ser realizado em diferentes tipos de equipamentos, os quais, de modo geral, podem ser classificados em: peneiras fixas, peneiras vibratórias inclinadas, peneiras vibratórias horizontais, grelhas e peneiras rotativas (*trommel*). No beneficiamento de bauxita encontram-se com maior frequência peneiras vibratórias, inclinadas e horizontais, ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Peneira vibratória inclinada.



Fonte: imagens google.

Os *decks* de peneiras vibratórias inclinadas movimentam-se de forma circular fazendo com que as partículas sejam lançadas para cima e para frente, promovendo o contato com a tela várias vezes. Este movimento também possibilita a melhor distribuição das partículas sobre as telas, permitindo que as maiores fiquem por cima e as menores por baixo. A direção da rotação pode ser a mesma ou oposta ao fluxo de *oversize*. Quando a rotação está no mesmo sentido do fluxo o escoamento é facilitado, dando mais capacidade, no entanto, a eficiência pode ser diminuída. Já quando a rotação está no sentido oposto ao fluxo, o escoamento é dificultado, mas a eficiência é aumentada, pois aumenta a probabilidade de as partículas atravessarem a tela (CHAVES, 2012b).

As peneiras vibratórias horizontais vibram de forma retilínea. Em função do seu movimento, esta peneira não é indicada para grandes aberturas de tela.

Conforme mencionado no tópico 3.2.2, são utilizadas peneiras rotativas (*trommel*) acopladas à descarga do lavador rotativo. As peneiras rotativas possuem a superfície de peneiramento cilíndrica ou ligeiramente cônica, que gira em torno do eixo longitudinal que possui uma inclinação entre 4° e 10°. A velocidade de rotação, bem como a angulação dependem da característica do material, bem como da velocidade

crítica, isto é, a velocidade mínima na qual as partículas ficam presas a superfície cilíndrica. Industrialmente a rotação permanece entre 35% a 40% da velocidade crítica (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

A eficiência (E_f) do peneiramento refere-se ao desempenho da operação em relação a separação granulométrica ideal, sendo definida como a relação entre a quantidade de partículas mais finas que a abertura da tela de peneiramento que passam pela tela e a quantidade dessas partículas presente na alimentação, conforme Equação 1.

$$E_f = \frac{t/h \text{ de undersize}}{t/h \text{ de material passante presente na alimentação}} \times 100\% \quad (1)$$

Em escala industrial a eficiência de peneiramento situa-se ente 80% e 90%, atingindo em alguns casos 95%. A fração crítica de peneiramento que tem grande influência no desempenho da operação é aquela com tamanhos compreendidos entre uma vez e meia superior ao tamanho de abertura da tela e aquelas inferiores à metade da abertura da tela (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

Um outro conceito importante que contribui com o conhecimento da eficiência da operação de peneiramento é a imperfeição de malha (IM), definida pela Equação 2 (CHAVES, 2012b).

$$IM = \frac{t/h \text{ de oversize}}{t/h \text{ de material passante presente na fração avaliada}} \times 100\% \quad (2)$$

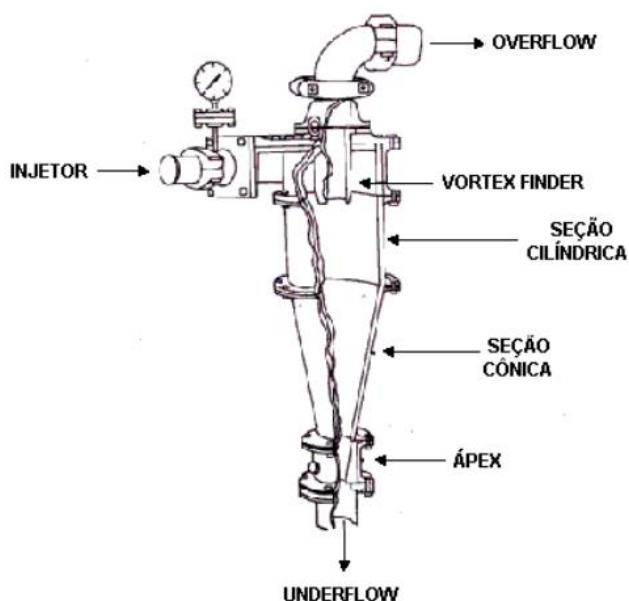
3.2.4 Classificação

Conceitualmente a classificação é a separação de uma população em outras duas populações, diferentes entre si em função da distribuição de tamanhos das partículas que constituem cada uma das duas novas populações. Uma população é caracterizada por apresentar, em maior quantidade, a porção de partículas grossas da alimentação, e a outra por apresentar predominantemente as partículas de menor tamanho ou dimensão presentes na alimentação. A operação de classificação é realizada pela ação de um meio fluido em movimento dentro de um equipamento de tal modo que a fração grosseira afunde e seja retirada por baixo do equipamento, por isso a denominação de *underflow*, e que a fração fina seja arrastada pela corrente fluida e descarregada por cima do equipamento, levando a denominação de *overflow* (CHAVES, 2012c).

Industrialmente encontram-se aplicados ao tratamento de minérios diferentes tipos de classificadores, quais sejam, classificador espiral, ciclones, cones de sedimentação e centrífugas. No beneficiamento de bauxita aplicam-se comumente ciclones.

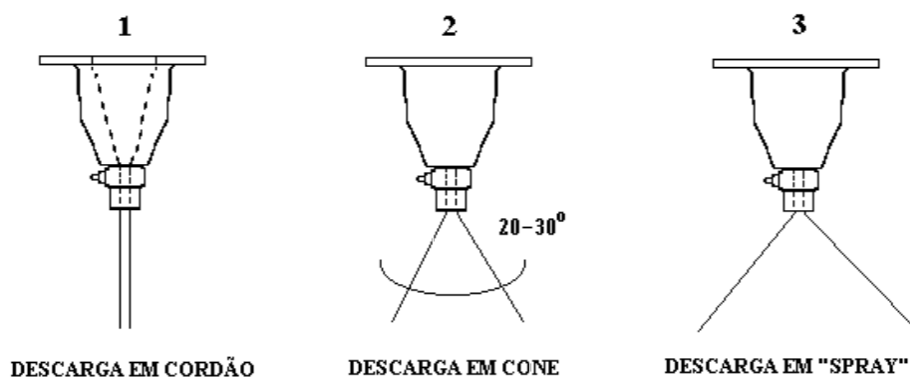
Os ciclones são constituídos de um vaso com parte em formato cilíndrico e parte em formato cônico, dotado de uma abertura de entrada e duas aberturas de saída. A entrada da alimentação é tangencial à porção superior da parte cilíndrica do ciclone. Uma das aberturas de saída encontra-se na extremidade inferior da porção cônica e é chamada de *apex*, por onde é descarregado o material grosseiro ou *underflow*. A outra abertura de saída encontra-se na parte superior do equipamento e é denominada de *vortex finder*, por onde obtém-se o *overflow* ou material fino (CORREIA *et al.*, 2010). A Figura 5 ilustra um ciclone típico. As características geométricas dos ciclones e a condição operacional são dependentes das especificações desejadas para os produtos, seja ele considerado como o *underflow* ou o *overflow*. Geometricamente as variáveis de maior influência no desempenho são o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone, o diâmetro do *vortex finder* e do *apex*, a área da abertura de entrada, ângulo da parte cônica e a altura da seção cilíndrica. Alterações nestas dimensões podem diminuir ou aumentar o diâmetro de corte do ciclone, bem como influenciar na capacidade do equipamento.

Figura 5 - Ciclone.



Fonte: Correia *et al.* (2010).

O diâmetro de abertura do *apex* influencia no regime de descarga do *underflow*, conforme mostra a Figura 6. Os esquemas 1 e 3 da Figura 6 indicam, em cada caso, descarga inadequada, respectivamente menor e maior do que aquele que proporciona um fluxo considerado adequado, este último mostrado no esquema 2.

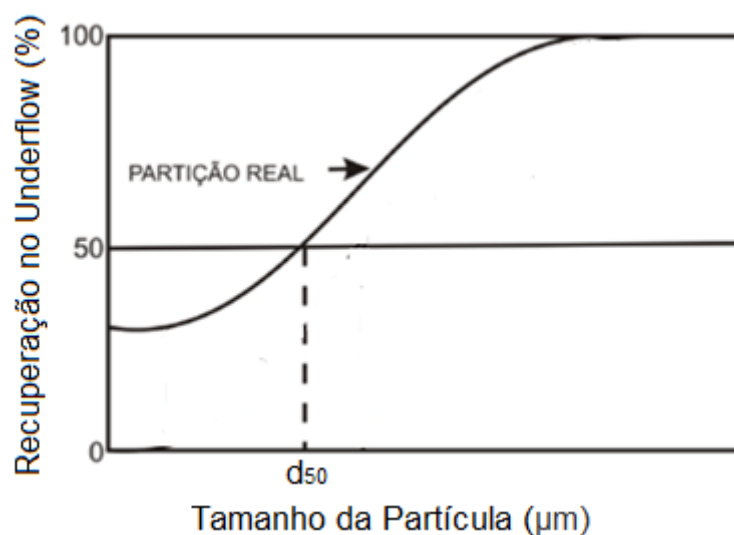
Figura 6 - Representação dos tipos de descarga do *apex*.

Fonte: Correia *et al.* (2010).

Em termos de operação as variáveis distribuição granulométrica da alimentação do cilone, densidade ou concentração de sólidos de alimentação da polpa ao equipamentos e pressão de operação são de significativa importância para obter-se o produto nas especificações requeridas. Ao aumentar-se a pressão de operação o diâmetro de corte diminui. Já com o aumento da concentração de sólidos na polpa, o diâmetro de corte aumenta (FOGGIATTO, 2009).

Para avaliar a eficiência da operação de classificação em ciclones emprega-se a curva de partição. A partição é definida como a fração da alimentação que passa para o produto contendo a maioria relativa de grossos. Na abscissa tem-se a classe de tamanho das partículas e na ordenada, a porcentagem de material da alimentação que sai no *underflow*. Estes pontos definem a curva de partição real onde o d_{50} é o tamanho correspondente a uma recuperação de 50% do material alimentado no cilone (CORREIA *et al.*, 2010). A curva de partição típica de ciclones é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Curva de partição real padrão de ciclones.



Fonte: Correia *et al.* (2010).

Na sua grande maioria, as curvas de partição reais não passam pela origem, em função do *by-pass* de finos para o *underflow* ocasionado pelo arraste das partículas,

isto é, encaminhamento indevido de partículas relativamente finas ao fluxo de grossos. Há também o *by-pass* de grossos, ou seja, encaminhamento de partículas relativamente grossas ao fluxo de finos ou *overflow*. Desta forma, na curva de partição real é possível observar os fenômenos de arraste e os fenômenos relacionados ao comportamento hidrodinâmico das partículas, este último dependente das forças gravitacional, empuxo e outras como centrífuga e tangencial também podem estar presentes. Ao se subtrair a parcela de *by-pass* ou arraste da curva de partição real obtém-se a chamada curva de partição corrigida (DELBONI JR, 2018)¹.

O método mais comumente utilizado para quantificar o fenômeno de arraste ou *by-pass* de finos e gerar a curva de partição corrigida, a partir da curva de partição real, é o proposto por Kelsall (KELSALL, 1953). Tal método associa a cada uma das classes granulométricas o mesmo valor de *by-pass*, igual a partição de água no *underflow* (DELBONI JR, 2018)¹. A Equação 3 apresenta a fórmula de cálculo da partição corrigida para cada fração ou faixa granulométrica.

$$P_{ci} = \frac{P_{ri} - \beta a}{(1 - \beta a)} \quad (3)$$

Onde:

P_{ri} = Partição real de partículas contidas na fração granulométrica i .

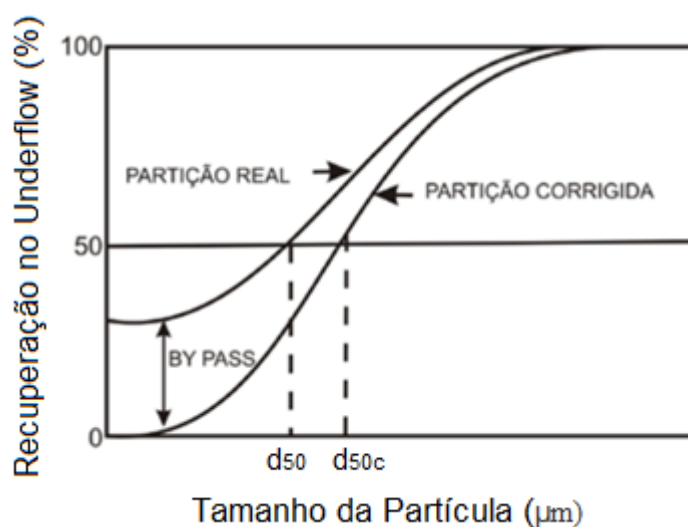
P_{ci} = Partição corrigida de partículas contidas na fração granulométrica i .

βa = Partição de água (fluido).

A Figura 8 apresenta uma curva de partição corrigida típica de uma operação de classificação, incluindo os parâmetros d_{50} experimental (d_{50}) e o d_{50} corrigido (d_{50c}).

¹ DELBONI JUNIOR, H. Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018. Notas de Aula da Disciplina PMI – 5004: Modelagem de Circuitos de Cominuição e Classificação.

Figura 8 - Curva de partição corrigida.



Fonte: Correia *et al.* (2010).

A caracterização da operação de classificação a partir da curva de partição é realizada avaliando-se os seguintes parâmetros:

- Inclinação (α) da curva no segmento próximo ao d_{50c} . Associa-se o parâmetro de dispersão α à nitidez da separação;
- O diâmetro das partículas que têm a mesma probabilidade de serem encaminhadas para o *underflow* ou *overflow* (d_{50c}). Sendo então um parâmetro de posição da curva de partição;
- O *by-pass*, associado à partição de água para o *underflow* (β_a).

Diante da significativa importância na avaliação do processo de classificação, a curva de partição corrigida foi objetivo de parametrização por diversos autores, tomando como base α e d_{50c} . As equações mais utilizadas para representar curvas de partição são a de Rosin-Rammler modificada e a de Whiten, apresentadas respectivamente nas Equações 4 e 5.

$$P_{c_i} = 1 - \exp(-0,693x_i^m) \quad (4)$$

$$P_{c_i} = \frac{e^{\alpha x_i} - 1}{e^{\alpha x_i} + e^{\alpha} - 2} \quad (5)$$

Onde,

$$x_i = \frac{d_i}{d_{50_c}}$$

Delboni Jr (2018)² destaca que apesar das parametrizações mencionadas acima representarem satisfatoriamente a grande maioria das operações de classificação, existem situações em que a curva de partição do sistema não corresponde ao formato esperado (“S”), se fazendo necessário o uso de outras metodologias para a parametrização da curva. Nestas situações, geralmente são utilizados métodos numéricos como *spline function* (WHITEN, 1972) e método discretizante (DELBONI JR, 1989)². O autor ainda destaca que os métodos numéricos apresentam como vantagem a sua adaptabilidade a qualquer situação, mas que suprimem o parâmetro de inclinação da curva que, representa um índice para efeito de comparações de nitidez do processo.

3.3 CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITOS BRASILEIROS DE BENEFICIAMENTO DE BAUXITA

Na natureza encontram-se tipos de bauxita que apresentam elevados teores de alumina aproveitável, baixos teores de sílica reativa e impurezas associadas aos minerais de alumínio. Nestes casos, o processo de beneficiamento consiste apenas na cominuição das bauxitas, não havendo necessidade, portanto de remoção de

² DELBONI JUNIOR, H. Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018. Notas de Aula da Disciplina PMI – 5004: Modelagem de Circuitos de Cominuição e Classificação.

contaminantes/elementos deletérios para que se atinjam as especificações estipuladas pelas refinarias.

No entanto, a maioria das bauxitas apresentam elementos contaminantes e em percentuais elevados, que podem assim prejudicar e/ou inviabilizar os processos de obtenção da alumina. Os principais contaminantes são a sílica reativa, óxido de ferro e óxido de titânio. As bauxitas brasileiras se enquadram, na sua grande maioria, nesta característica, requerendo, portanto, a aplicação de processos físicos para a remoção dos contaminantes e elementos deletérios.

A Tabela 2 apresenta a produção anual de bauxita de empreendimentos brasileiros para os anos de 2015, 2016, 2017, dados estes mais recentes publicados pela Associação Brasileira do Alumínio (2019). Ressalta-se que a parcela da produção do Brasil denotada por “outros” refere-se ao total da produção das empresas Mineração Curimbaba (MG), Bauminas Mineração (MG/SC), Mineração Santo Expedito (GO) e Mineração Varginha (MG).

Tabela 2 - Produção brasileira de bauxita (base úmida, unidade:1.000 toneladas).

Composição	2015	2016	2017
Suprimento (toneladas/ano)	37.063,9	39.449,3	38.456,2
Produção (toneladas/ano)	37.057,0	39.244,2	38.122,5
1. Alcoa Alumínio S.A	5.728,7	6.232,4	6.830,7
1.1 Poços de Caldas (MG)	379,8	275,8	408,0
1.2 Juruti (PA)	5.348,9	5.956,6	6.422,7
2. Companhia Brasileira de Alumínio			
2.1 Mirai, Itamarati de Minas e Poços de Caldas (MG)	2.116,4	1.959,3	2.045,6
3. Hindalco do Brasil Indústria e Comércio Ltda			
3.1 Ouro Preto	204,7	282,0	342,4
4. Mineração Rio do Norte (MRN)			
4.1 Oriximiná, Porto Trombetas	17.822,6	18.202,0	16.279,6
5. Nors Hydro Brasil Ltda			
5.1 Mineração Paragominas S.A (PA)	10.060,5	11.132,2	11.435,2
6. Outros	1.124,1	1.436,3	1.189,0

Fonte: ABAL (2017).

A seguir são apresentadas as principais configurações de fluxogramas das operações de beneficiamento de bauxita no Brasil, quais sejam, Mineração Rio do Norte, Mineração Paragominas, Companhia Brasileira do Alumínio e Alcoa Alumínio - Mina de Bauxita de Juruti. Para esta última é dedicado um capítulo exclusivo contendo a descrição detalhada do empreendimento, por ser objeto de estudo do presente trabalho.

3.3.1 Mineração Rio do norte

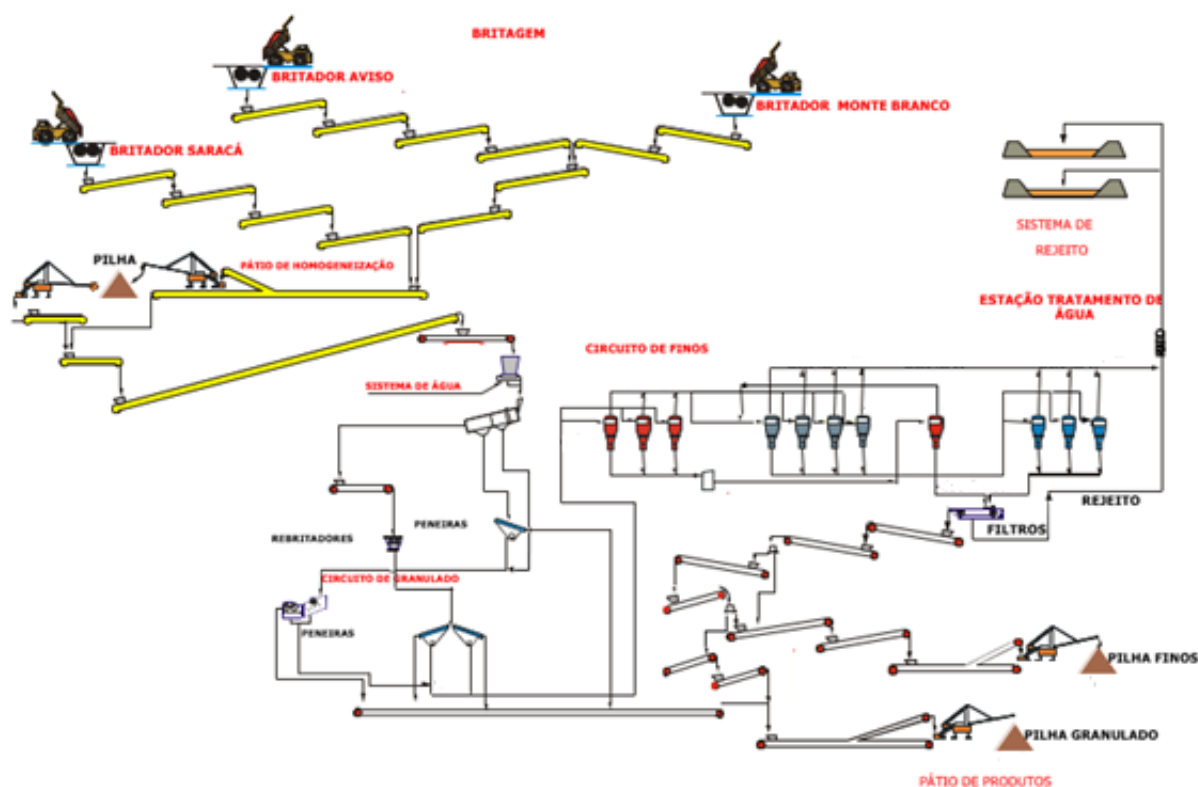
A Mineração Rio do Norte é uma empresa constituída por uma associação de empresas nacionais e estrangeiras que, desde 1979, opera no oeste do estado do Pará com a finalidade de extrair, beneficiar e comercializar bauxita (MRN, 2018). O empreendimento contempla operações de supressão vegetal, lavra, beneficiamento, sistema de armazenamento e manejo de rejeitos e secagem da bauxita.

Em função das características e composição da bauxita da MRN se faz necessário aplicar o processo de lavagem, cujo objetivo é diminuir a quantidade de contaminantes da bauxita para atender às especificações de qualidade requeridas pelos clientes.

O processo de beneficiamento se inicia com a operação de britagem primária e secundária. Os britadores utilizados na MRN são do tipo *sizer* e impacto. Após a britagem, o minério segue em transportadores de correia para a usina de beneficiamento, onde é descarregado em silos, cada um referente à uma das nove linhas de produção que compõem a usina. Cada linha de produção é composta por lavadores ou conjunto *scrubber* mais *trommel*. O material retido no *trommel* segue para uma etapa de rebritagem ou, como também é denominada, britagem terciária, para ajuste de granulometria. A fração passante na malha do *trommel* segue para o estágio de peneiramento, juntamente com o produto da britagem terciária. O *oversize* do estágio de peneiramento constitui o produto final denominado granulado e segue para empilhamento no pátio de produto final. O *undersize* do peneiramento segue para a etapa de ciclonagem, na qual o objetivo é a classificação em 0,037 mm (400# Tyler). O *underflow* da ciclonagem segue para filtros de correia onde é desaguado para,

então, ser transportado via transportadores de correia para o pátio de produto final. Já o *overflow* da ciclonagem segue em tubulações para o sistema de armazenamento e manejo de rejeitos. A Figura 9 apresenta o fluxograma representativo das principais operações de beneficiamento da MRN.

Figura 9 - Fluxograma do processo de beneficiamento da bauxita na MRN.



Fonte: acervo do autor.

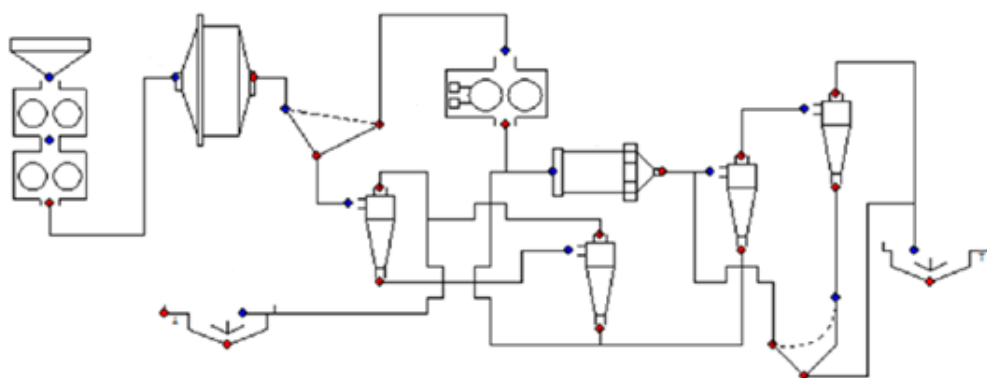
O produto final, granulado e finos, é transportado da usina até o porto por meio de trem. No porto o produto granulado é seco em secadores rotativos. A bauxita beneficiada é então disposta em porões de navios cargueiros para transporte.

3.3.2 Mineração Paragominas

A empresa *Norsk Hydro* lava bauxita de sua própria jazida em Paragominas, no estado do Pará. As atividades de lavra em Paragominas começaram em 2007 com o principal objetivo de suprir a necessidade de bauxita da refinaria de alumina Alumínio do Norte do Brasil S.A. (ALUNORTE), está localizada no município de Barcarena, região metropolitana de Belém. O empreendimento compreende três principais operações, sendo elas a lavra, beneficiamento e transporte do produto via mineroduto para a refinaria de alumina (NORSK HYDRO, 2018).

A usina industrial de beneficiamento do minério de Paragominas é composta por duas linhas de produção, onde cada uma conta com etapas de cominuição, classificação e desaguamento. O produto gerado deve atender a especificações de granulometria e concentração de sólidos, conforme requeridas para transporte em polpa via mineroduto. A Figura 10 apresenta um fluxograma simplificado do referido processo de beneficiamento.

Figura 10 - Fluxograma ilustrativo simplificado do processo de beneficiamento da Mineração Paragominas.



Fonte: adaptado de Van Deursen (2016).

A primeira etapa do processo de beneficiamento consiste em dois estágios de britagem em britadores de rolos dentados ou *sizers*. O produto britado é empilhado

para homogeneização e, após retomado, transportado para um moinho SAG, cuja descarga verte sobre uma peneira vibratória horizontal, cujo *undersize* prossegue para uma sequência de etapas de classificação em ciclones. O produto fino destas etapas é desaguado em espessado e bombeado para as bacias de rejeitos. A fração grossa da ciclonagem é bombeada para o circuito do moinho de bolas, que também recebe o produto do britador de impacto, o qual é alimentado pelo *oversize* da peneira do moinho SAG. O circuito do moinho de bolas segue a configuração convencional em circuito fechado com ciclones, em que o *overflow* é desaguado em ciclones e espessador, sendo posteriormente peneirado em peneiras do tipo DSM, antes da estocagem nos tanques de produto final (COSTA, 2010).

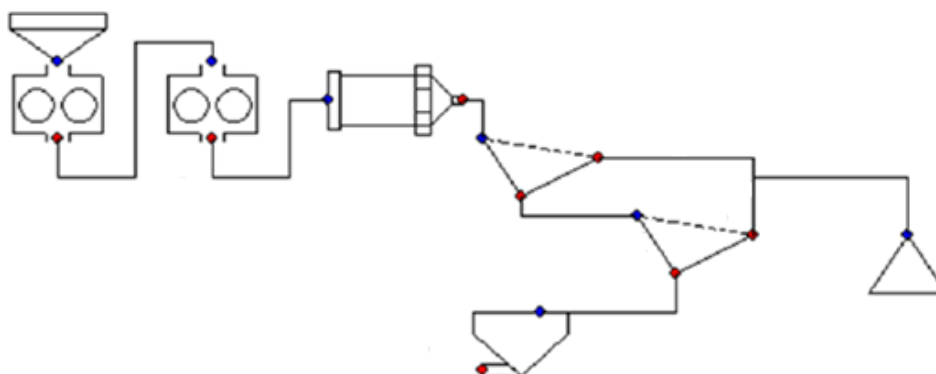
Se comparado ao fluxograma da usina da MRN, o circuito de beneficiamento de Paragominas é mais complexo, principalmente em função das especificações rígidas de granulometria requerida para o transporte da polpa via mineroduto.

3.3.3 Companhia Brasileira do Alumínio

A Companhia Brasileira do Alumínio (CBA) opera desde 2008 uma usina de beneficiamento de bauxita em Mirai, Minas Gerais.

A atual operação em Mirai é composta por lavra e beneficiamento da bauxita. O beneficiamento inicia-se com britagens primária e secundária, cujo produto é alimentado a um *scrubber*, cujo produto segue para dois estágios de peneiramento. O *oversize* do peneiramento constitui o produto final do processo, enquanto o *undersize* representa o rejeito do processo (Van Deursen, 2016). A Figura 11 apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento da usina de Mirai.

Figura 11 - Fluxograma representativo das operações de beneficiamento da CBA.



Fonte: adaptado de Van Deursen (2016).

Na Usina de Mirai o *undersize* do peneiramento, apesar de apresentar teores e massa recuperáveis de alumina aproveitável, não possui um processo de reaproveitamento. Em 2016 a CBA investiu em aumento da recuperação mássica, realizando alterações no *scrubber* e modificações na abertura das telas do peneiramento. Na sua configuração inicial, o peneiramento apresentava abertura de 0,84 mm, passando para 0,60 mm em 2014 e para 0,50 mm em 2016. A recuperação mássica da usina passou de 37% para 41,5% após a primeira modificação em 2014, e para 49% em 2016 (CBA, 2017).

Até 2015 também operava uma usina em Itamarati de Minas. De acordo com Massola (2008) a usina de Itamarati era composta basicamente pelas operações unitárias de britagem, desagregação em *scrubbers* e peneiramento, do qual o *oversize* constituía o produto beneficiado e o *undersize* era deslamado e processado em espirais concentradoras.

3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Um modelo matemático é uma representação conceitual, uma idealização da situação real. É uma equação ou um conjunto de equações que transformam dados de entrada em dados de saída, e que representam um fenômeno ou um processo. As

equações de um determinado modelo visam à descrição matemática de um fenômeno e traduzem o conhecimento atual dos mecanismos que regem este processo e sua quantificação. É sempre uma representação simplificada do processo selecionado (SECCHI, 1995)³.

Os modelos matemáticos podem ser classificados em três categorias principais: modelo teórico ou fundamental, baseado nas leis físicas que interagem no processo; fenomenológico, baseado na aplicação de princípios fundamentais e na ampla observação do comportamento de parâmetros em escala industrial ou de laboratório; e empírico, baseado simplesmente em descrições de uma determinada observação experimental (NAPPIER-MUNN e LYNCH, 1992).

Os modelos teóricos ou fundamentais são considerados os mais abrangentes por possibilitarem previsões em ampla faixa de valores, permitindo uma compreensão robusta do processo e dos fenômenos que descrevem. Os mesmos modelos teóricos consideram a aplicação de conceitos fundamentais de força, energia, fenômenos de transporte, entre outros.

A modelagem fenomenológica se baseia em princípios básicos de conservação e em relações constitutivas. A sua construção é um processo iterativo de ajustes sucessivos, onde se procura o entendimento do fenômeno ou do processo, por meio de observações do comportamento destes. Os modelos fenomenológicos podem ser classificados quanto à natureza das variáveis, quanto à dependência com a variável tempo e quanto à natureza das equações resultantes, conforme descrito a seguir (SILVA, 2013).

Segundo a natureza das variáveis:

³SECCHI, A. R. **Notas de aulas:** apostila do curso de modelagem e simulação. Porto Alegre: Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. p. 8 - 11.

- i. modelos determinísticos: são aqueles em que cada variável ou parâmetro pode ser associado a um número fixo definido. A sua solução fornece valores exatos para a variável de resposta;
- ii. modelos estocásticos: os modelos estocásticos são utilizados para fornecer a probabilidade de um determinado valor ocorrer para uma variável. A solução desses modelos é uma probabilidade e não um valor exato.

Segundo a dependência com a variável tempo:

- i. modelos de estado estacionário: não há termo de acúmulo, isto é, não há variação com o tempo. Normalmente utilizados para o projeto de operações unitárias, as quais são normalmente realizadas em estado estacionário;
- ii. modelos de estado dinâmico: nesses modelos há variação com o tempo, normalmente utilizados em controle de processos.

Segundo a natureza das equações resultantes:

- i. modelos representados por equações algébricas;
- ii. modelos representados por equações diferenciais ordinárias;
- iii. modelos representados por equações diferenciais parciais.

Os modelos empíricos são baseados em observações experimentais do processo. Os dados obtidos são reduzidos a números adimensionais de similaridade, esses são correlacionados por meio de técnicas de regressões lineares e não-lineares, correlacionando variáveis operacionais, geometria dos equipamentos e parâmetros de desempenho do processo. Este tipo de modelo é bastante restrito, não podendo ser extrapolado para condições sob as quais as variações não foram estudadas. Os modelos empíricos são relativamente fáceis de construção e frequentemente auxiliam no desenvolvimento de modelos fenomenológicos, contribuindo com o melhor entendimento do processo e com o desenvolvimento de modelos mais abrangentes (SILVA, 2013).

No tratamento de minérios os modelos mais utilizados são os fenomenológicos e os empíricos, ou ainda, a combinação destes, em face da complexidade dos

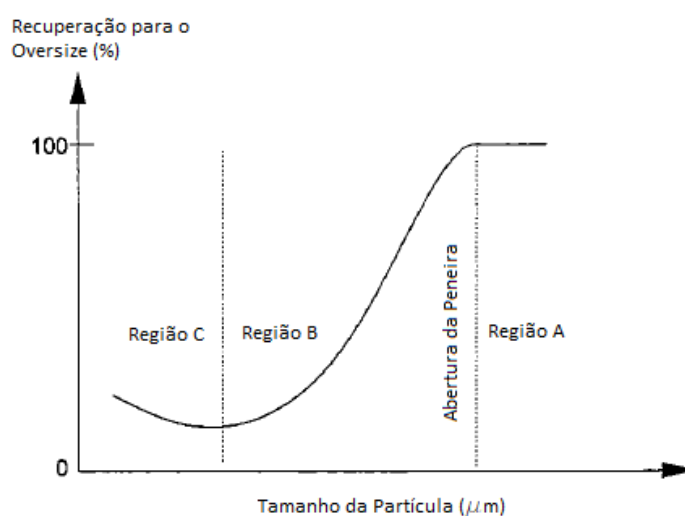
mecanismos envolvidos nos processos. Deve-se ressaltar, no entanto, que os fundamentos dos modelos teóricos devem sempre estar presentes para que não ocorra a aceitação de modelos fisicamente irreais.

A seguir são descritos os modelos matemáticos aplicados às operações de peneiramento e ciclonação da mina de bauxita de Juruti, objeto de estudo do presente trabalho.

3.4.1 Modelo matemático da operação de peneiramento

O processo de peneiramento pode ser descrito mecanisticamente como a separação de materiais sólidos granulados de diversos tamanhos em duas porções, cada uma delas mais uniforme em tamanho que a composição original da alimentação, por meio de tentativas (saltos) em uma superfície perfurada. O número de tentativas é equivalente ao número de saltos realizados pela partícula durante seu deslocamento no comprimento da peneira. A Figura 12 apresenta uma curva de partição típica para peneiras vibratórias.

Figura 12 - Curva de partição típica para a operação de peneiramento.



Fonte: adaptado de Nappier-Munn *et al.* (1999).

Observam-se três importantes regiões na curva apresentada na Figura 12, conforme descritas a seguir.

- Região A: esta região descreve o comportamento do material de tamanho maior que a abertura da tela.
- Região B: esta região descreve o comportamento das partículas que possuem tamanho abaixo ou próximo à abertura.
- Região C: esta região descreve o comportamento das partículas ultrafinas que estão aderidas às partículas de maior tamanho.

Whiten e White (1980) propuseram uma equação para um modelo para representar o peneiramento, considerando a região B da curva apresentada na Figura 12, conforme apresentado na Equação 6.

$$E_o(x) = \exp \left[-N f_0 \left(1 - \frac{x}{h} \right)^k \right] \quad (6)$$

Onde,

$E_o(x)$ = é a fração de partículas presente na alimentação que passam ao produto grosso.

h = é a abertura da peneira.

f_0 = é a fração de área aberta.

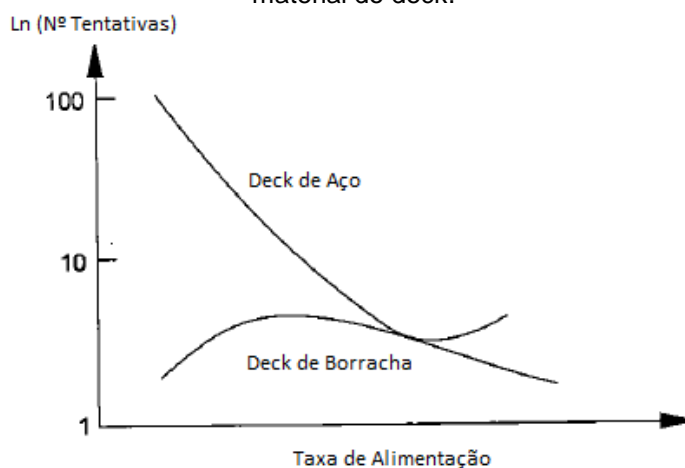
N = é o parâmetro de eficiência.

k = é um parâmetro utilizado para fins de ajuste da curva, usualmente em torno de 2.

O parâmetro de eficiência, N , é análogo ao número de tentativas pelos quais a partícula passa ao percorrer todo o comprimento da peneira. Este parâmetro depende da vazão de alimentação da peneira em função do tipo de material da tela, aço ou

borracha. A Figura 13 apresenta o comportamento do parâmetro de eficiência N em função do material das telas.

Figura 13 - Dependência do parâmetro de eficiência N na taxa de alimentação em função do tipo de material do deck.



Fonte: adaptado de Nappier-Munn *et al.* (1999).

A diferença entre as curvas apresentadas no gráfico da Figura 13 é devida ao fato de que quando a vazão de alimentação é baixa em *decks* de borracha, as partículas se movem independentemente, acumulam energia, resultando em saltos grandes, diminuindo as oportunidades de a partícula passar pela tela. Um aumento de vazão de alimentação provoca aumento das colisões entre as partículas, redução da energia acumulada, bem como redução do comprimento dos saltos, conseqüentemente aumentando o número de tentativas ou oportunidades que as partículas têm de passar pela tela, aumentando, assim, a eficiência de peneiramento.

Em telas metálicas, no entanto, o coeficiente de restituição é baixo e as partículas não acumulam energia. Os saltos das partículas são relativamente pequenos e eficiências altas podem ser obtidas mediante o maior contato com a tela, proporcionando maior chance de passar pela mesma. À medida que a vazão de alimentação aumenta, a interferência entre as partículas aumenta, reduzindo o

número de tentativas ou possíveis contatos com a tela, conseqüentemente, reduzindo a eficiência de peneiramento.

No presente trabalho, para modelar a operação e a eficiência de peneiramento foi utilizado o modelo da curva de partição. Segundo Napier-Munn *et al.* (1999), apenas algumas frações de tamanho podem definir a forma da curva e, portanto, o método de calcular a eficiência média em uma faixa de tamanho é de grande importância. O desempenho do peneiramento pode, então, ser descrito pela distribuição de tamanhos da alimentação, pela massa da alimentação e pela curva de eficiência, conforme proposto por vários autores (Lynch, 1977; Karra, 1979; Batterham, Weller, Norgate e Birkett, 1980). No presente trabalho foi utilizada para modelar a operação de peneiramento a formulação proposta por Whiten (1980), conforme a Equação 7 apresentada a seguir.

$$Eo(x) = C \left[\frac{(1 + \beta\beta^*x)(\exp(\alpha) - 1)}{\exp(\alpha\beta^*x) + \exp(\alpha) - 2} \right] \quad (7)$$

Onde:

$$x = d/d_{50c}$$

$$C = 100 - \beta_a$$

α = é a inclinação da curva no segmento próximo ao d_{50c} . Associa-se o parâmetro de dispersão α à nitidez da separação.

β = é o parâmetro que modula o perfil de anzol da curva de partição para partículas finas,

β^* = é o parâmetro que ajusta a curva de partição para que esta tenha ordenada igual a 0,5 C para a abscissa $d = d_{50}$.

Importante reforçar que a Equação 7 descreve a curva de partição para o *overflow*. O conceito é similar ao da curva de partição para *underflow*, sendo ambas as curvas imagens espelhadas uma da outra.

3.4.2 Modelo matemático de ciclones

A aplicação de modelos matemáticos à operação de classificação é uma ferramenta de extrema utilidade para o controle de processo, essencialmente pelo fato da possibilidade de previsão das distribuições de tamanho dos dois fluxos gerados pelo processo de classificação, sejam grossos ou finos.

Desde o início da calibração e utilização de modelos matemáticos no tratamento de minérios, a operação de classificação recebeu especial atenção de pesquisadores em função da significativa importância e vasta aplicação desta operação para circuitos industriais de moagem.

Vários autores estudaram o fenômeno da classificação em ciclones e desenvolveram modelos para sua operação, entre eles destacam-se os desenvolvimentos de Lynch e Rao (1975), Lynch (1977), Plitt (1976), Whiten (1972), Delboni Jr. (1989), Nageswararao (1978).

Os modelos matemáticos acima listados são, em sua maioria, empíricos, isto é, modelos onde sua forma é uma conveniência matemática e não uma descrição da natureza do processo, além de não serem extrapoláveis (CHAVES, 2012c). De acordo com Chaves (2012c), o modelo matemático de classificação caracteriza-se como modelo fenomenológico, por partir da compreensão de um fenômeno populacional com comportamento estatístico. De acordo com o referido autor, a fórmula é empírica, mas o modelo é fenomenológico, reforçando o fato de que mesmo sendo uma equação desenvolvida empiricamente, não deve ser descartada a importância da compreensão de seus mecanismos.

No presente trabalho aplicou-se o modelo de Nageswararao, que está descrito a seguir.

De acordo com Delboni Jr (2018)⁴, o modelo de Nageswararao deriva do modelo de Lynch e Rao, admitindo que a curva de partição é independente da condição

⁴ DELBONI JUNIOR, H. Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018. Notas de Aula da Disciplina PMI – 5004: Modelagem de Circuitos de Cominuição e Classificação.

operacional do sistema e ainda, mostra-se válida para ciclones de diferentes tamanhos. No entanto o modelo de Nageswararao apresenta diferenças conceituais, peculiaridades e limitações que diferem do modelo de Plitt.

O modelo de Nageswararao é um modelo empírico e baseia-se em quatro principais equações para estimar os parâmetros: d_{50} , partição de água, partição de polpa e vazão volumétrica de alimentação do ciclone. A cada intervalo granulométrico atribui-se valores de partição real, que são determinados a partir dos três primeiros parâmetros mencionados anteriormente. Com os três últimos parâmetros são definidas as vazões da alimentação e dos produtos gerados (DELBONI JR, 2018)³.

A Equação 8 relaciona o d_{50c} com as variáveis geométricas e de operação do ciclone.

$$d_{50c} = K_{D_0} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,5} (\theta)^{0,15} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,2} (D_c)^{0,35} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0,52} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-0,47} (\lambda)^{0,93} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0,22} \quad (8)$$

Onde:

D_i = diâmetro do círculo cuja área é equivalente à área do *inlet* (alimentação do ciclone), em metros;

D_c = diâmetro do ciclone (m);

D_o = diâmetro do *vortex finder* (m);

D_u = diâmetro do *apex* (m);

θ = ângulo da parte cônica do ciclone (graus);

L_c = comprimento da parte cilíndrica (m);

P = pressão na alimentação (kPa);

ρ_p = densidade de polpa na alimentação (t/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

Sendo λ descrito por:

$$\lambda = \frac{10^{1,82C_v}}{(8,05 * (1,0 - C_v)^2)}$$

Onde C_v é a fração volumétrica de sólidos na alimentação do ciclone.

A constante K_{D_0} depende, entre outros aspectos, da característica do minério, especificamente da distribuição granulométrica e peso específico. Esta é a constante que permite a calibração desta equação.

A Equação 9 representa, segundo Nageswararao a partição de água para o *underflow* do ciclone:

$$R_f = K_{W_1} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,5} (\theta)^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,22} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1,19} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{2,40} (\lambda)^{0,27} \left(\frac{P}{\rho_P g D_c}\right)^{-0,53} \quad (9)$$

A constante K_{W_1} destina-se à calibração da equação para aplicações específicas e depende, segundo Nageswararao, exclusivamente das características do minério alimentado ao ciclone.

Equação 10 representa, segundo Nageswararao, a partição de polpa para o *underflow* do ciclone:

$$R_v = K_{V_1} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,25} (\theta)^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,22} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-0,94} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{1,83} \left(\frac{P}{\rho_P g D_c}\right)^{-0,31} \quad (10)$$

A constante K_{V_1} destina-se à calibração da equação e depende, segundo Nageswararao, exclusivamente das características do minério alimentado no ciclone.

Equação 11 representa, segundo Nageswararao, a relação entre pressão e vazão de alimentação do ciclone:

$$Q = K_{Q_0} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,45} (\theta)^{-0,1} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,2} D_c^2 \left(\frac{P}{\rho_p}\right)^{0,5} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0,68} \quad (11)$$

Para a aplicação do modelo de Nageswararao se faz necessária pelo menos uma amostragem da operação específica, para a obtenção da inclinação da curva de partição, que está relacionada à nitidez da classificação e depende do conjunto minério-equipamento, ciclone (CHAVES, 2012c). A partir desta curva é possível executar simulações com o referido modelo.

O modelo de Nageswararao considera que a curva de partição independe a condição de operação do ciclone, dependendo apenas da distribuição granulométrica e da densidade real do minério alimentado ao equipamento. E ainda, considera-se válida para equipamentos com as mesmas relações geométricas entre seus elementos (DELBONI JR, 2018)⁵.

A parametrização da curva de partição corrigida empregada no modelo de Nageswararao é aquela proposta por Whiten, conforme descrita anteriormente na sessão 3.4.1.

3.5 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DE PENEIRAS

Os métodos de dimensionamento de peneiras estão divididos em quatro grandes grupos, quais sejam, os métodos empíricos, os semiempíricos, os numéricos e os físicos (Domingues, 2019). Cada um dos métodos possui suas especificidades e aplicabilidade.

⁵ DELBONI JUNIOR, H. Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018. Notas de Aula da Disciplina PMI – 5004: Modelagem de Circuitos de Cominuição e Classificação.

Não é objetivo deste trabalho apresentar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de dimensionamento de peneiras disponíveis na literatura. O objetivo deste capítulo é apresentar de forma resumida o método de dimensionamento de peneiras utilizado no presente trabalho, o método *Allis-Chalmers*, que suportou a análise de diagnóstico, eficiência e balizou a definição de repotenciamento e/ou adição de peneiras a rota de beneficiamento da usina de Juruti.

3.5.1 Método *Allis-Chalmers* para dimensionamento de peneiras

O método *Allis-Chalmers* de dimensionamento de peneiras é considerado um método empírico e consiste principalmente em utilizar uma curva de capacidade unitária padrão em função da abertura efetiva da malha da peneira, aplicando-se ao valor lido na curva fatores de correção que dependem de desvios das condições padronizadas, condições estas que foram definidas pelo fabricante no momento da definição da curva padrão de capacidade unitária das peneiras (Domingues, 2019).

O referido método considera o cálculo de dois principais parâmetros para avaliação (Nunes, 2017):

- i. Área necessária para passagem de todo o *undersize*.
- ii. Largura da peneira para que a altura do leito na descarga do *oversize* seja de no máximo até quatro vezes a abertura da tela.

Deste modo, a primeira etapa do método é calcular a área necessária para remover o material passante na alimentação e a partir deste resultado especificar o comprimento e largura da peneira que permitirão o atingimento da área calculada. A Equação 12 apresenta a fórmula de cálculo da área da peneira apresentada no método *Allis-Chalmers*.

$$\text{Área} = \frac{T \times FP}{C_p \times M \times K \times Q_n} \quad (12)$$

Onde:

Área = área necessária da superfície da peneira (m²).

T = alimentação do *deck* da peneira (m³/h).

FP = fator de projeto que depende do nível de incerteza em relação ao minério a ser peneirado (variando geralmente de 1 a 1,4).

C_p = capacidade básica por separação específica (m³/h de alimentação por m² de área da peneira).

M = fator dependente da porcentagem de material retido na peneira.

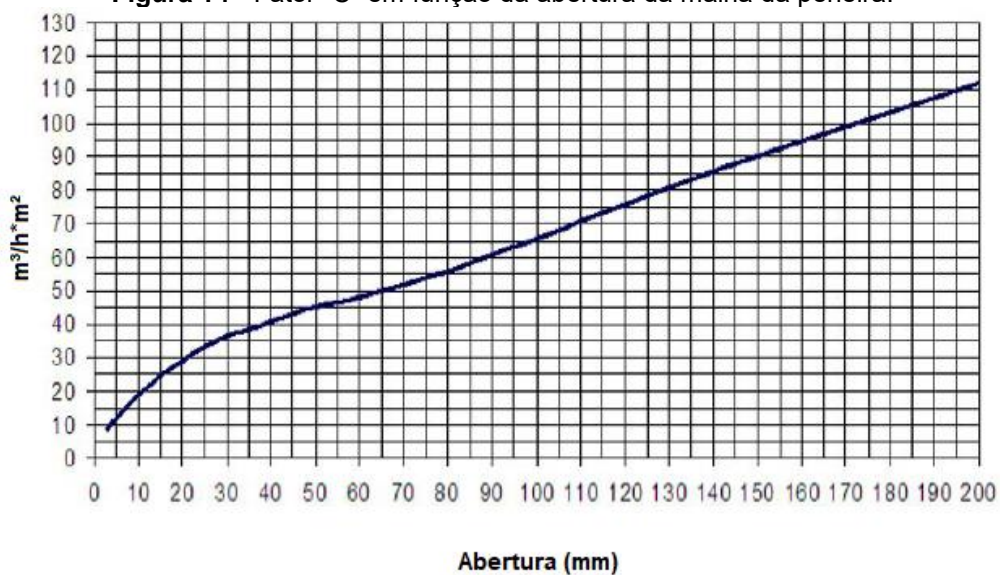
K = fator relativo à porcentagem de material da alimentação inferior à metade do tamanho da operação especificada.

Q_n = fator de correção resultante da multiplicação entre os fatores Q₁, Q₂, Q₃, Q₄, Q₅ e Q₆.

A seguir são apresentadas considerações sobre cada um dos fatores indicados na Equação 12.

O fator “C” foi obtido empiricamente a partir de uma curva que correlaciona a vazão horária por metro quadrado da peneira com a abertura da malha da peneira, conforme apresentado na Figura 14.

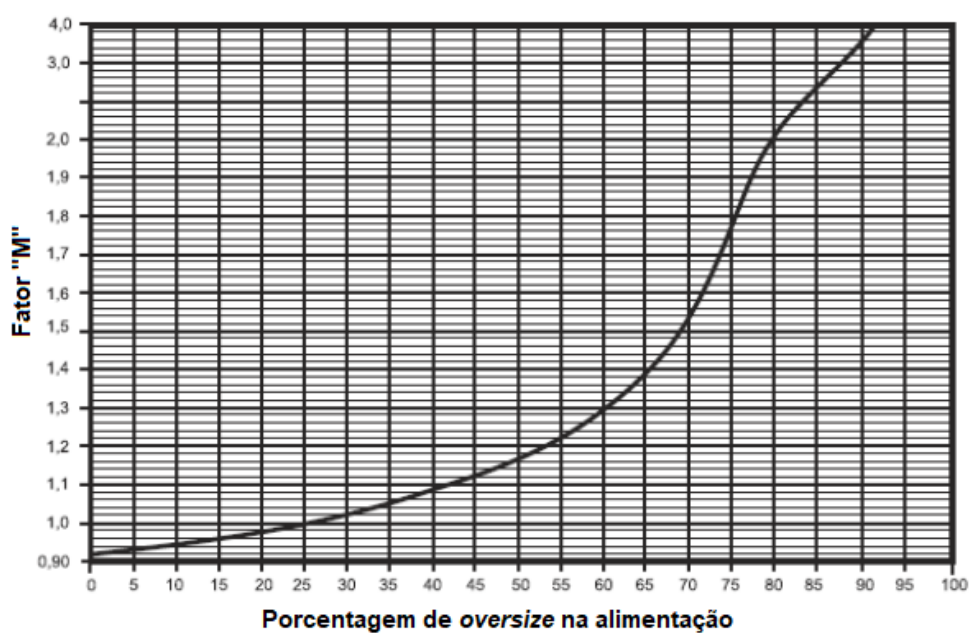
Figura 14 - Fator "C" em função da abertura da malha da peneira.



Fonte: adaptado de Nunes (2017).

O fator "M" permite considerar na formulação de cálculo a área da peneira a diferença entre a porcentagem de material retido no caso em estudo e a condição padrão do fabricante. Para isso utiliza-se a curva apresentada na Figura 15.

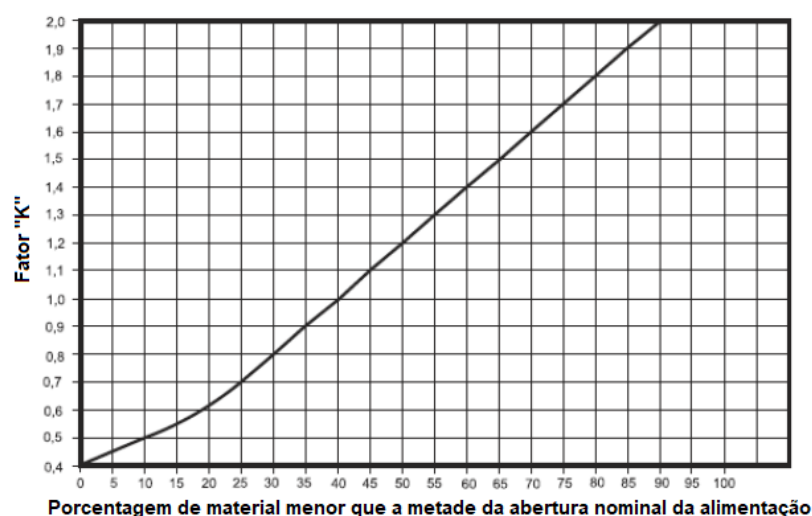
Figura 15 - Fator "M" em função da porcentagem de oversize na alimentação.



Fonte: adaptado de Nunes (2017).

O fator “K” representa a diferença entre a porcentagem da fração passante no caso em estudo e a condição padrão do fabricante. Para isso utiliza-se a curva apresentada na Figura 16.

Figura 16 - Fator “K” em função da porcentagem de material menor que a metade da abertura nominal da alimentação.



Fonte: adaptado de Nunes (2017).

Quanto aos fatores “Q”, estes consideram vários aspectos do peneiramento, quais sejam:

Q1 refere-se à posição relativa ao deck, sendo considerado o valor 1 para o primeiro deck, 0,9 para o segundo e 0,8 para o terceiro deck.

Q2 refere-se ao formato das partículas, considerando-se 1 para partículas cúbicas e 0,9 para partículas lamelares.

Q3 refere-se ao peneiramento realizado à úmidos e para cada tamanho de separação recomenda-se utilizar um valor específico, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores do fator “Q3” em função do tamanho de separação.

Separação (mm)	1 - 6	6 - 12	12 - 25	26 - 40	41 - 50	51 - 75	+75
Q3	1,4	1,3	1,25	1,2	1,1	1,15	1

Fonte: adaptado de Nunes, 2017.

Q4 refere-se à porcentagem de umidade no peneiramento considerado à seco, onde para umidade menor que 3% considera-se o valor de Q4 igual a 1, para umidades entre 3% e 5% adota-se 0,85 e entre 6% e 8% considera-se 0,7.

Q5 refere-se à porcentagem de área aberta da tela ou tipo de tela. Comummente considera-se o valor de Q5 igual a 1 para telas de aço quadrada e 1,05 para tela de aço retangular. Já para placa em aço perfura quadrada utiliza-se 0,75 e retangular 0,8. Para telas em poliuretano ou borracha quadrada 0,8 e retangular 0,9. E para telas de borracha flexível de abertura quadrada utiliza-se 0,9 e retangular 1.

Q6 refere-se ao tipo da peneira em estudo. Para peneiras de movimento circular considera-se Q6 igual a 1 e para movimento linear igual a 1,1.

Este foi o método utilizado para possibilitar o diagnóstico e análise de eficiência do peneiramento da usina de Juruti, considerando como dados de entrada as informações provenientes das simulações, tais como distribuição granulométrica, vazões de alimentação, *undersize* e *oversize*. Combinando o método e as informações disponíveis a partir de simulações de processo é possível identificar gargalos operacionais e definir repotenciamento dos equipamentos e/ou adição de peneiras novas ao circuito, buscando atender às especificações de produção e qualidade do negócio.

3.6 DIAGNÓSTICO E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

A simulação computacional está consolidada no beneficiamento de minérios. Trata-se, portanto, de uma prática comum, tanto em melhorias de desempenho como no dimensionamento de circuitos industriais de beneficiamento de minérios. A

simulação de processos permite a avaliação do desempenho de diferentes circuitos, por meio da alteração da configuração, tamanho e capacidade dos equipamentos, bem como as condições sob as quais os mesmos podem ser operados.

À medida que um processo se torna mais complexo, haverá necessidade maior de emprego de técnicas de análise dos problemas associados ao projeto e operação. Análises modernas de problemas de processos envolvem alguma forma de modelagem matemática. Naturalmente, existem vários modelos matemáticos para o mesmo sistema, apresentando variados graus de complexidade, assim como de variáveis a serem calibradas. Para o usuário, o importante é selecionar um modelo adequado em função, principalmente, do grau de detalhe requerido para solução do problema, assim como da quantidade e qualidade de dados disponíveis. Quanto mais rigorosa for a descrição de um processo, maior será a quantidade de variáveis contidas em equações, resultando assim em dificuldades crescentes de calibração. Embora tais equações possam ser resolvidas, é aconselhável ao analista usar julgamentos de engenharia para reduzir as equações para um conjunto menos complexo que, para propósitos práticos, resultará em soluções compatíveis com a precisão dos dados proporcionados (SECCHI, 1995)⁶.

A modelagem e a simulação de processos não substituem os ensaios tradicionais de laboratório, mas os complementa. Sua vantagem é a de economizar tempo e recursos na seleção da melhor alternativa de projeto ou da otimização de processos existentes.

Uma das grandes e comuns aplicações da simulação de processos é na avaliação e diagnóstico das operações. O objetivo do diagnóstico de processos é obter um entendimento mais detalhado da condição atual de um processo. Para isso, deve ser realizada uma investigação e caracterização da condição atual, por meio de levantamento de dados da operação, característica do material, amostragens no circuito produtivo, estratégias de operação, malhas de controle existentes, entre

⁶SECCHI, A. R. **Notas de aulas:** apostila do curso de modelagem e simulação. Porto Alegre: Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. p. 8 - 11

outras informações que possam contribuir com a compreensão e definição da condição existente.

Com base em uma avaliação robusta da condição existente, é possível propor um conjunto de recomendações para que a condição estipulada possa ser atingida, isto é, estabilidade operacional, otimização dos índices de desempenho, entre outras melhorias requeridas pelo estudo.

Deste modo, entende-se que o diagnóstico de processos é a primeira etapa de ajuste ou calibração de um simulador para representar um processo específico.

O diagnóstico de processos permite verificar quais os problemas, ou gargalos, mais críticos do processo produtivo, sejam eles relacionados à eficiência das operações unitárias ou modos incorretos de operação. Como exemplo podem ser citadas pressões ou diluições, impacto das características do material, inconsistências na rota de beneficiamento para um dado material, ou ainda se existem equipamentos operando no seu limite crítico de capacidade.

Os diagnósticos são a base para a adoção de medidas corretivas que visem os ajustes necessários no processo, de forma a estabelecer a condição desejada de desempenho e resultado do processo produtivo.

De acordo com Teodoro (2018) a essência da simulação consiste na elaboração de um modelo matemático que traduza, da maneira mais fiel possível, um processo de forma integral. Este é o assim denominado caso base. A partir desse modelo é possível simular situações e verificar os resultados que as mesmas podem ou não gerar. A interpretação destes, bem como a escolha da melhor opção e aplicação desta “mudança” permitem encaminhar uma otimização do processo estudado. De maneira não imediata, porém efetiva, a otimização vem como um resultado “a longo prazo” que, nos dias de hoje, pode ser considerado bem pequeno, visto o desenvolvimento tecnológico e a cobrança do atual mercado por respostas praticamente instantâneas. A simulação de processos é uma ferramenta indispensável quando o assunto é o estudo e o planejamento de projetos, bem como o de processos já em operação, trazendo benefícios como a otimização destes de forma rápida e eficiente (TEODORO, 2018).

São encontrados na literatura muitos trabalhos que aplicaram simuladores para otimização de processos, tais como JKSimMet e UsimPac. No entanto, não são muitos os disponíveis na literatura sobre o processo de beneficiamento de bauxita.

Leite (2017) aplicou a simulação de processos para avaliar diferentes cenários de aumento de capacidade produtiva da Mineração Serra Grande da empresa AngloGold Ashanti, localizada em Crixás, GO, Brasil. O trabalho descreve o método de amostragem, caracterização das amostras, modelagem e simulação do circuito de moagem industrial da referida mineradora. O simulador utilizado foi o simulador JKSimMet. Utilizando a ferramenta de simulação de processos foi possível projetar o circuito de expansão, avaliando-se cenários com diferentes configurações de equipamento, realizar a avaliação de interferências com os equipamentos e instalações já existentes, bem como comparar o consumo de energia entre as alternativas de expansão selecionadas. Entre as simulações e cenários avaliados, o Vertimill foi a alternativa que apresentou necessidade de menor potência instalada.

Gomes *et al.* (2017) desenvolveu um estudo sobre a operação do circuito de moagem e concentração da Vanádio de Maracás (VMSA) com o objetivo de elaborar um diagnóstico da operação em relação aos desempenho e eficiência de processo, bem como recomendar ações a serem tomadas com relação aos gargalos operacionais e de processo, buscando otimizar os resultados da unidade. Para a análise e definição das ações a serem tomadas foi utilizada a simulação matemática de processos utilizando o simulador JKSimMet. A partir dos dados e das informações obtidas em campanhas de amostragem foram realizadas calibrações de modelos matemáticos de cada equipamento amostrado e a integração dos mesmos foi realizada por meio do simulador, de modo a configurar uma plataforma representativa da operação do circuito. Com base nesta, simulações para avaliação de otimização de desempenho de processo foram estudadas e as ações com maior potencial de ganho foram recomendadas para implementação. De acordo com o autor, o método utilizado baseado em amostragem industrial, modelagem e simulação demonstrou ser robusto e confiável para estudos de melhoria de processo de circuito de moagem. O autor ainda destaca que o sucesso do método depende fortemente de uma campanha de amostragem representativa.

Costa (2012) investigou sob enfoque da modelagem matemática a operação de escrubagem de bauxita, com vistas a fornecer parâmetros para previsão de desempenho e otimização da operação. O mesmo autor analisou a influência das seguintes variáveis operacionais: grau de enchimento, velocidade de rotação e tempo de residência do processo de escrubagem, em escala de laboratório, na degradação de uma amostra de bauxita de Paragominas. O trabalho resultou no desenvolvimento de um modelo matemático empírico para a previsão da quantidade de finos gerados por um *scrubber*.

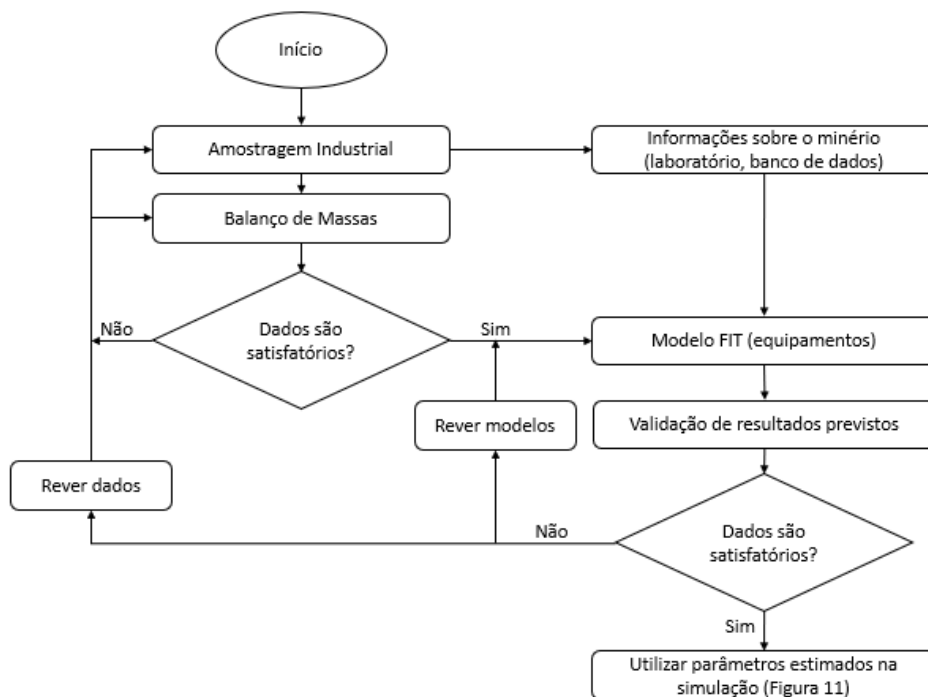
Machaca (2010) desenvolveu a modelagem matemática do desempenho de ciclones, incluindo o efeito da reologia em polpas de bauxita e de fosfato, por meio de ensaios de classificação nos quais foram variadas a concentração de sólidos, os diâmetros do *apex* e do *vortex finder* e a pressão de alimentação. Os resultados indicaram que a viscosidade da polpa exerce um papel muito importante no desempenho dos ciclones.

Miller (2004) desenvolveu um modelo para seleção da geometria de *scrubbers*, bem como a respectiva potência. O método proposto por Miller é baseado em resultados de ensaios que definem o tempo de residência necessário para promover o grau de lavagem esperado.

Para o desenvolvimento das simulações, os processos precisam ser modelados a partir de campanhas de amostragem, observações em campo e/ ou experimentos em laboratório.

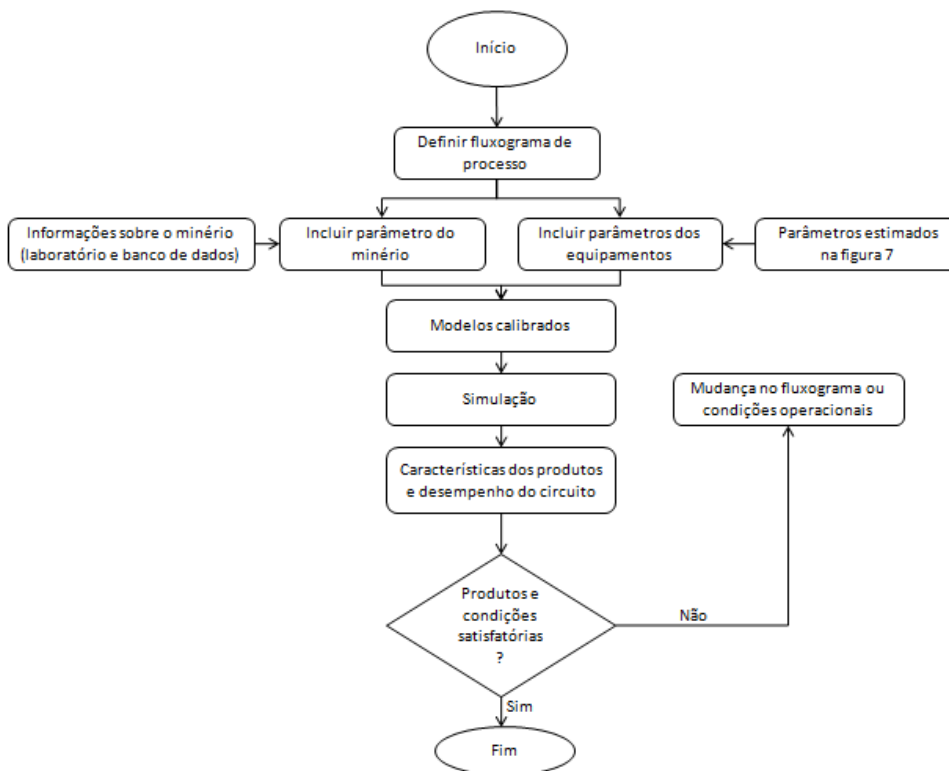
A Figura 17 e a Figura 18 apresentam as etapas típicas presentes da calibração de modelos matemáticos, modelagens e simulações de processos industriais, e que foram seguidas no presente trabalho. Ambas as figuras foram adaptadas de Napier-Munn *et al.* (1999).

Figura 17 – Estimativa de parâmetros dos modelos.



Fonte: Adaptado de Napier-Munn *et al.* (1999).

Figura 18 - Simulação para condições operacionais definidas.



Fonte: Adaptado de Napier-Munn *et al.* (1999).

A partir das rotinas de calibração de modelos foi gerado o modelo integrado do processo de beneficiamento de bauxita de Juruti. Este modelo foi empregado em exercícios de simulação com o objetivo de identificar oportunidades de melhoria do desempenho das etapas de cominuição, lavagem, desagregação e classificação do circuito industrial de Juruti.

As simulações visam estabelecer parâmetros para melhoria de desempenho do circuito. Além disto, as simulações servem para prever o desempenho do circuito, conforme as características dos minérios alimentados no processo.

3.6.1 Balanço de Massa

O balanço de massa é a aplicação do princípio da conservação da matéria, isto é, toda a massa que entra em um sistema deve sair em seus produtos, uma vez que, conforme postulado por Lavoisier, nada se cria e nada se perde, tudo se transforma, não havendo geração ou consumo de massa.

Nas operações de tratamento de minérios, os balanços de massa e metalúrgico são realizados a partir de dados experimentais obtidos a partir de amostragens de campo. No entanto, o processo de amostragem está sujeito à ocorrência de vários erros, sendo que alguns podem ser reduzidos e até eliminados, enquanto outros, como o erro fundamental da amostragem, não pode ser eliminado. Desta forma, os dados provenientes de amostragens em campo geralmente não satisfazem o princípio da conservação da massa. Desta forma, se faz necessário a realização de ajustes, utilizando métodos matemáticos, buscando obter-se dados consistentes e que satisfaçam a Lei de Lavoisier. Nunes (1992) *apud* Bergermam (2013) destaca que é necessário realizar uma análise crítica das respostas obtidas por meio do ajuste realizados com métodos matemáticos, pois os valores obtidos podem ser corretos e atenderem ao princípio matematicamente, no entanto, não fazerem sentido no que se refere ao beneficiamento mineral. Desta forma, o conhecimento técnico por parte de quem formula a solução para ajuste dos dados é de fundamental importância para a

obtenção do correto balanço de massa, que assim represente, de forma correta, as operações de tratamento em análise.

Desta forma, antes de realizar o balanço de massa é necessário fazer a avaliação inicial dos dados para verificar a consistência dos mesmos. Geralmente esta avaliação é realizada na etapa de classificação, aplicando-se a fórmula dos dois produtos, de forma a avaliar a consistência da partição global de massa do processo. Os resultados são então confrontados com o mesmo índice obtido a partir das concentrações de sólidos. Esta avaliação, conforme descrita por Napier-Munn *et al.* (1999) é reproduzida a seguir.

As variáveis consideradas são as seguintes:

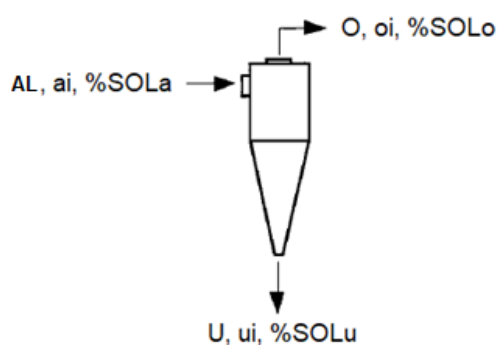
AL , O , U = vazão de sólidos na alimentação, *overflow* e *underflow* do ciclone, respectivamente,

a_i , o_i , u_i = percentual de massa em cada fração granulométrica da alimentação, *overflow* e *underflow*, respectivamente.

$\%SOLa$, $\%SOLo$, $\%SOLu$ = concentrações (%) de sólidos na alimentação, *overflow* e *underflow*, respectivamente.

A Figura 19 ilustra o ciclone e respectivas variáveis, para o qual é aplicado o método.

Figura 19 - Balanço de massa em um ciclone.



Fonte: Napier-Munn *et al.* (1999)

O balanço de massa para as vazões de sólidos do ciclone é fornecido pela Equação 13.

$$AL = O + U \quad (13)$$

A Equação 14 ilustra o balanço para cada fração granulométrica.

$$AL * a_i = O * o_i + U * u_i \quad (14)$$

A Equação 15 apresenta o balanço de massa para a água.

$$AL * \left(\frac{100}{\%SOL_a} - 1 \right) = O * \left(\frac{100}{\%SOL_o} - 1 \right) + U * \left(\frac{100}{\%SOL_u} - 1 \right) \quad (15)$$

Deste modo, é possível calcular a partição global de massa para o *underflow*, denominada β , tanto com base nas distribuições granulométricas, como com base nas concentrações de sólidos, conforme apresentadas nas Equações 16 e 17, respectivamente.

$$\beta = \frac{U}{AL} = \frac{a_i - o_i}{u_i - o_i} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{U}{AL} = \frac{\left(\frac{1}{\%SOL_a} \right) - \left(\frac{1}{\%SOL_o} \right)}{\left(\frac{1}{\%SOL_u} \right) - \left(\frac{1}{\%SOL_o} \right)} \quad (17)$$

Um exemplo de cálculo da partição de massa para o *underflow* com base na distribuição granulométrica da alimentação, *underflow* e *overflow* e nas concentrações

de sólidos dos fluxos de um ciclone é apresentado na Tabela 4, conforme Napier-Munn *et al.* (1999)

Tabela 4 - Balanço de massa de um ciclone.

Tamanho (μm)	a_i	o_i	u_i	Partição para <i>underflow</i>
212	10,1	1,8	21,7	0,42
150	12,4	4,5	19,1	0,54
106	15,5	11	16,8	0,78
75	16,2	11,2	11,9	7,14
53	7,8	3,9	4,8	4,33
38	4,9	7,9	3,7	0,71
-38	33,1	59,6	21,9	0,7
%SOL	49	44	67	0,3

Fonte: Napier-Munn *et al.* (1999).

Reforça-se que em todos os casos, o valor da granulometria e da concentração de sólidos da alimentação do ciclone devem estar entre o do *underflow* e do *overflow*. Diante do exposto, observa-se na Tabela 4 que os dados experimentais não estão totalmente coerentes. Há, portanto, necessidade de correção e ajuste dos dados. Por exemplo, as partições das frações 0,075 mm e 0,053 mm estão totalmente inconsistentes. Importante, antes de iniciar os ajustes, identificar quais os dados podem conter mais erros, diante de algum tipo de problema ocorrido na obtenção dos dados. Esta avaliação é de suma importância para se fazer as devidas correções, conforme reforça Bergerman (2013).

Após a avaliação dos dados, o balanço de massa de toda a amostragem pode ser iniciado buscando-se investigar, em maior nível de detalhe, as inconsistências nos dados obtidos durante a tomada das amostras em campo e tratamento das mesmas. Neste estágio empregam-se programas para realizar o balanço de massa, os quais buscam minimizar a diferença entre os valores medidos e os valores estimados, conforme o desvio atribuído a cada medida. As magnitudes dos desvios devem estar relacionadas à dificuldade de obtenção de amostras específicas, ou mesmo a problemas em sistemas de medição de dados no campo.

No presente trabalho utilizou-se o programa computacional JKSimMet. No módulo específico para a realização de balanços de massa, o usuário pode inserir até 30 componentes em um fluxo para, em seguida, serem realizados os balanços de massas em função de todas as informações inseridas. Erros podem ser atribuídos para qualquer granulometria ou vazão determinados experimentalmente, uma vez que, alguns dados extraídos da amostragem podem ser mais confiáveis do que outros, diante de dificuldade da tomada da amostra ou mesmo por problema sem sistema de medição instalados no campo. No procedimento, deve-se tomar como referência um fluxo, ou seja, considerar um fluxo com erro zero para se executar o balanço de massa.

De acordo com Napier-Munn *et al.* (1999) o programa busca a minimização da soma dos quadrados dos resíduos entre os valores medidos e os valores calculados, conforme mostra a Equação 18. Ressalta-se a importância fundamental da boa ponderação dos erros dos valores obtidos experimentalmente, que irá influenciar diretamente no resultado do fechamento do balanço, e está fortemente relacionada com a experiência do usuário. A minimização é realizada em função de x_{ij} e q_i , respeitando-se as restrições impostas pelo usuário.

$$SSQ = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^L \left(\frac{X_{ij} - x_{ij}}{s_{ij}} \right)^2 + \sum_{i=1}^L \left(\frac{Q_i - q_i}{s_i} \right)^2 \quad (18)$$

Onde:

n = número de medidas realizadas.

L = número de fluxos.

X = medida experimental.

x = valor ajustado de X .

Q_i = vazão medida para o fluxo i .

q_i = vazão ajustada para o fluxo i .

s_{ij} e s_i = desvios padrão para as medidas e vazões, respectivamente.

O ajuste de dados é obtido a partir da obtenção de dados experimentais de forma minuciosa e desenvolvimento do balanço de massa consistente. Essa etapa é de suma importância nos procedimentos que antecedem a simulação, uma vez que possui influência direta na qualidade e coerência das respostas por ela fornecidas.

3.7 AMOSTRAGEM INDUSTRIAL

Para diagnosticar e desenvolver simulações de um processo, se faz necessário a obtenção de um conjunto de informações que sejam capazes de representar os processos em estudo. A amostragem representa, então, a primeira etapa do processo de desenvolvimento de balanços de massa e calibração de modelos representativos das operações unitárias de uma usina. O processo de amostragem consiste na retirada de quantidades de material, incrementos, tomados em diferentes instantes, e em uma série de operações com o objetivo de compor uma amostra global que represente toda a população de interesse (CHIEREGATI, 2017)⁷. Chierigati (2017) destaca que de nada valerá um resultado analítico com várias casas decimais se a amostra analisada possui viés ou não é suficientemente representativa. O processo de amostragem se torna ainda mais complicado em processos com elevada vazão mássica de alimentação e elevado *top size*. Nappier-Munn *et al.* (1999) destaca cuidados importantes que devem ser tomados no processo de amostragem industrial para garantir a tomada de uma amostra representativa, conforme apresentado a seguir:

⁷ CHIEREGATI, A.C. Amostragem na indústria mineral. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017. Notas de Aula da Disciplina PMI – 5030: Amostragem na Indústria Mineral.

- Estabilidade da operação do processo: é importante que as amostras sejam retiradas do processo durante um período de operação estável, sendo este período de no mínimo de 1 a 2 horas;
- Tipo de amostradores: os amostradores utilizados para a retirada da amostra devem respeitar a regra de possuírem abertura de 10 mm para partículas menores que 3 mm, e abertura de 3 vezes o tamanho da maior partícula para partículas maiores que 3 mm. O formato do coletor também é de bastante importância, o mesmo deve permitir que todo o fluxo possa ser amostrado, ou tenha a probabilidade de ser. Para amostragem em transportador de correia, o indicado é utilizar um amostrador tipo corta fluxo, permitindo que seja possível retirar toda uma seção transversal ao fluxo do material que está no transportador. No entanto, não é comum as usinas possuírem este tipo de amostrador, principalmente pelo elevado custo de aquisição. Desta forma, o recomendável é retirar esta mesma seção transversal do fluxo por meio de amostragem manual;
- Processamento da amostra: utilizar o método de quarteamento mais adequado para a amostra coletada, o que depende da distribuição granulométrica do material. Atentar para precisão de balanças, abertura de peneiras, condição das telas das peneiras, tempo de peneiramento, atuação inadequada do operador durante o peneiramento, que podem inserir erros no processo de obtenção da informação a partir da amostra coletada.

Segundo a teoria de Pierre Gy (1982) *apud* Correia *et al.* (2010) o erro total de amostragem (E_a) é o somatório do erro de amostragem propriamente dita (E_{ap}) e do erro de preparação da amostra primária (E_p) para obtenção da amostra final, conforme apresentado na Equação 19.

$$E_a = E_{ap} + E_p \quad (19)$$

O erro de amostragem propriamente dito é o somatório de sete erros independentes, que são resultantes do processo de seleção da amostra primária e da variabilidade do material que está sendo amostrado, conforme apresentado na Equação 20. Estes erros podem ser definidos quantitativamente, segundo suas médias e variâncias estimadas a partir de resultados de experimentos variográficos.

$$E_{ap} = E_{a1} + E_{a2} + E_{a3} + E_{a4} + E_{a5} + E_{a6} + E_{a7} \quad (20)$$

Onde:

E_{a1} = refere-se ao erro de ponderação, sendo este proveniente da não uniformidade da densidade ou da vazão do material.

E_{a2} = refere-se ao erro de integração oriundo da heterogeneidade de distribuição do material.

E_{a3} = refere-se ao erro de periodicidade dependente das variações periódicas da característica de interesse no material.

E_{a4} = refere-se ao erro fundamental, resultante da heterogeneidade de constituição do material, que depende fortemente da massa da amostra.

E_{a5} = refere-se ao erro de segregação, oriundo da heterogeneidade de distribuição localizada do material.

E_{a6} = refere-se ao erro de delimitação, proveniente da possível configuração incorreta da delimitação da dimensão dos incrementos

E_{a7} = refere-se ao erro de extração, conseqüente da operação de tomada dos incrementos.

O erro de preparação é o somatório de cinco erros oriundos das operações de redução de granulometria, homogeneização e quarteamento a que a amostra primária

é submetida, conforme apresentado na Equação 21. Estes erros não podem ser estimados experimentalmente. No entanto, é possível minimizá-los e/ou eliminá-los, buscando evitar erros sistemáticos.

$$E_p = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3} + E_{p4} + E_{p5} \quad (21)$$

E_{p1} = refere-se à perda de partículas pertencentes à amostra.

E_{p2} = refere-se à contaminação da amostra por material indevido.

E_{p3} = refere-se à alteração não intencional das características de interesse que deveriam ser medidas na amostra final.

E_{p4} = refere-se aos erros intencionais do operador, como por exemplo, a mistura de subamostras provenientes de diferentes amostras.

E_{p5} = refere-se à alteração intencional da característica de interesse a ser medida na amostra final.

Durante o processo de amostragem é possível controlar, minimizar e até eliminar os erros que podem ser gerados pela falta de controle dos itens destacados acima. Um bom planejamento da amostragem, treinamento das equipes, cálculos das massas mínimas representativas para cada fluxo, entre outras ações podem contribuir significativamente com a redução e/ou eliminação dos erros de seleção e preparação. No entanto, é importante ressaltar que não é possível eliminar o erro fundamental da amostragem, sendo este uma propriedade intrínseca ao material a ser amostrado. Recomenda-se retirar amostras de tamanho suficiente para que se tenha um grau de confiança adequado diante do erro fundamental (Bergerman, 2013).

4 DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO

4.1 LOCALIZAÇÃO

A mina de bauxita de Juruti está localizada no município de Juruti, PA e é operada pela Alcoa. A cidade está situada à margem direita do Rio Amazonas no oeste do Pará, conforme destacado na Figura 20, a cerca de 200 km da cidade de Santarém, maior centro econômico da região. O município tem área aproximada de 8.304 km², população de 47.123 habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010) distribuídos 65% na zona rural (150 comunidades) e 35% na zona urbana. Em 2018 a população estimada era de aproximadamente 56.908 habitantes (IBGE, 2019). A estrada PA 257 é o principal acesso até a mina, que se encontra a cerca de 60 km do centro da cidade.

Figura 20 - Localização geográfica da cidade de Juruti.



Fonte: google imagens.

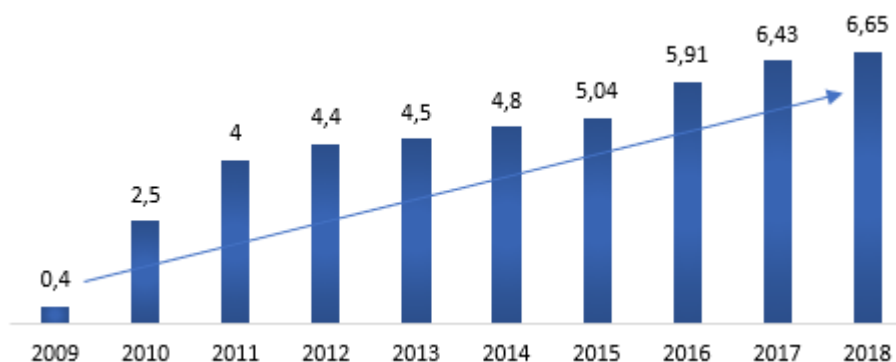
4.2 HISTÓRICO

Os primeiros estudos de pesquisa e prospecção na área da mina de Juruti começaram no início da década de 1970 pela empresa Reynolds Metals, nos platôs denominados Central e Capiiranga. Já no início da década de 1990 as áreas de pesquisas foram expandidas com o requerimento de pesquisa dos platôs Mauari e Central Sul. No ano de 2000 a Alcoa adquiriu os direitos de pesquisa na região da Reynolds Metals, iniciando assim pesquisas mais aprofundadas nos platôs Capiiranga, Mauari e Guaraná, localizados nos limites da cidade de Juruti.

A mina de bauxita de Juruti tem um dos maiores depósitos e de mais alta qualidade entre as reservas de bauxita do mundo, com um potencial total estimado em cerca de 700 milhões de toneladas métricas, suficientes para atender à crescente demanda do produto no mercado.

O projeto Juruti foi inaugurado no dia 15 de setembro de 2009, com capacidade inicial de produção de 2,6 MTPA de bauxita lavada. Atualmente, o empreendimento opera com produção aproximada de 6 MTPA de bauxita lavada por ano. A Figura 21 apresenta a evolução da produção de Juruti ao longo dos seus 10 anos de operação, sendo ela composta por bauxita lavada e não lavada.

Figura 21 - Evolução da produção da Mina de Bauxita de Juruti (MTPA).



Fonte: acervo do autor.

4.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS E RESERVAS

De acordo com Patterson (1984) a região onde está inserida a área das jazidas é constituída, predominantemente, por rochas sedimentares. Os depósitos enquadram-se como do tipo “*blanket*” formados “*in situ*” por processos de intemperismo sobre rochas sedimentares clásticas, em condições climáticas tropicais úmidas. Estes depósitos caracterizam-se por apresentar espessura de ordem métrica, alcançando e ultrapassando raramente 10 metros e por apresentarem acentuadas variações laterais nos teores de Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 . Na macro-área Juruti, os depósitos correspondentes aos platôs Capiroanga, Central, Mauari e Guaraná desenvolveram-se sobre a formação Alter do Chão, gerando um perfil geológico bastante persistente, com horizontes de bauxita relativamente bem definidos e contínuos. Estes platôs apresentam-se posicionados no topo da sequência, um perfil de laterização no qual podem ser identificadas três zonas distintas: argila belterra, zona de laterita concrecionária e zona saprolítica. A zona de laterita, por sua vez, pode ser subdividida em três sub-zonas: bauxita nodular, laterita e bauxita maciça. Segue-se a descrição destas zonas (PATTERSON, 1984).

Argila belterra: consiste numa cobertura de argila caulínica, amarelada, bem uniforme e permeável, cuja espessura varia de um a doze metros nos centros dos platôs.

Bauxita nodular: representada por um horizonte descontínuo, chegando a atingir seis metros de espessura, consiste em nódulos de gibbsita, finamente cristalina, de tamanhos variáveis, distribuídos em uma matriz caulínica. São comuns neste horizonte nódulos ferruginosos que conferem elevados teores nas análises de Fe_2O_3 .

Laterita: corresponde a um horizonte de baixa sílica, com espessura de zero a três metros e consideráveis variações na dureza, textura, cor, relação ferro-alumina e conteúdo de sílica. Em alguns locais, esse material pode ser classificado como bauxita ferruginosa, face ao seu alto teor em Al_2O_3 .

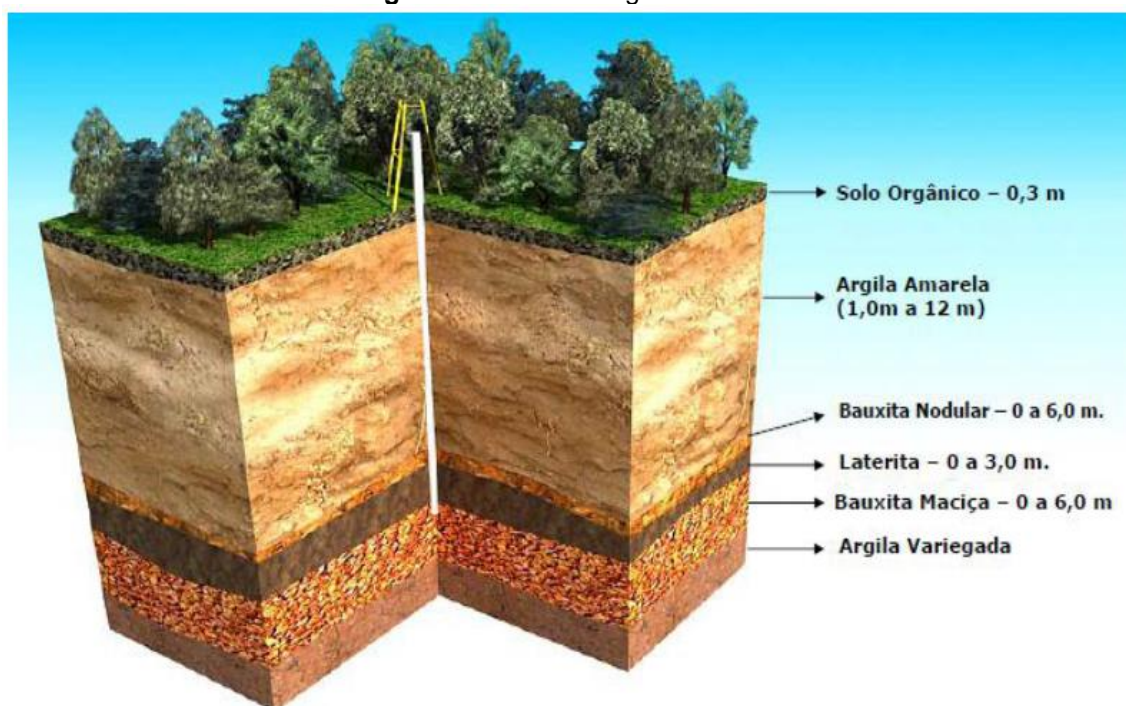
Bauxita maciça (bauxita): este horizonte, com espessura variando de 0 a 6 metros, é essencialmente constituído de gibbsita (45% a 85%), hematita (6% a 40%), caulinita

(6% a 32%) e, secundariamente, noselita ($3.Na_2Al_2Si_2O_8.Na_2SO_4$) do grupo da sodalita, quartzo e anatásio. Sempre apresenta uma gradação com o horizonte superior pela substituição gradativa do Fe_2O_3 por SiO_2 . A dureza, textura e coloração variam com o teor de ferro e conteúdo em argila.

Argila variegada: consiste num horizonte composto de argilas caulínicas de cores variegadas, em geral avermelhadas a rosadas, com trechos esbranquiçados e matizes arroxeados, contendo, eventualmente, alguma gibbsita. Localmente, apresenta concreções alongadas de bauxita colunar, compostas de gibbsita microcristalina em posição vertical neste horizonte argiloso.

Uma ilustração do perfil acima descrito é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Perfil litológico de Juruti.



Fonte: acervo do autor.

4.4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

4.4.1 Supressão vegetal e método de lavra

A supressão vegetal ou remoção do solo orgânico (*top soil*) é realizada por tratores. Esse material é preservado para usos futuros no programa de recuperação de área. Tanto a supressão quanto a remoção desse material somente são realizados em época de seca na região, compreendendo os meses de julho a dezembro, pois nos outros meses a operação se torna muito difícil devido às chuvas intensas. A Figura 23 apresenta o detalhamento da supressão vegetal.

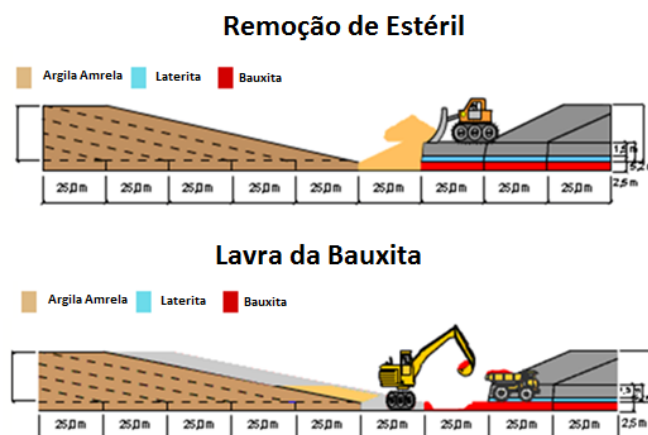
Figura 23 - Detalhamento da supressão vegetal.



Fonte: acervo do autor.

A mina é lavrada a céu aberto, pelo método de lavra em tiras. A remoção do estéril sobrejacente ao minério é realizada por tratores de esteiras e escavadeiras. A lavra é executada mediante desmonte, tipo escarificação, e, posteriormente, por escavadeiras no carregamento do minério, que segue por caminhões basculantes que transportam o minério às instalações da britagem primária. A Figura 24 ilustra a operação de lavra da bauxita em Juruti.

Figura 24 - Método de lavra da bauxita de Juruti.



Fonte: acervo do autor.

4.4.2 Beneficiamento

O beneficiamento da bauxita em Juruti é feito por etapas sucessivas de britagem, lavagem, peneiramento e ciclonação, com filtragem das frações mais finas, sendo o rejeito depositado nas bacias de espessamento e de disposição.

A primeira etapa do processo é a britagem do R.O.M., a qual consiste em dois britadores de rolos dentados consecutivos. O britador primário recebe R.O.M. com tamanho máximo de 1,2 m. O produto do britador primário alimenta o britador secundário, cujo produto apresenta *top size* de 76 mm (3"). O produto assim britado segue por transportadores de correia para a alimentação da usina.

A usina de beneficiamento da bauxita de Juruti é composta por duas linhas paralelas, linha 1 e linha 2. Cada uma das duas linhas é composta por um circuito de granulado (lavador, rebitador e peneiras) e circuito de finos (ciclones e filtros). Em cada linha, a primeira etapa do circuito de granulado é lavagem e desagregação do material em lavadores rotativos (*scrubber*), seguidos de peneiramento em peneira rotativa (*trommel*). O *oversize* do *trommel*, isto é, material retido na malha 3", segue para uma etapa de rebitagem. A rebitagem é realizada também por meio de um britador de rolos dentados com abertura de 3". A rebitagem é uma etapa comum para

ambas as linhas da usina, isto é, o *oversize* do *trommel* de cada uma das duas linhas segue para o mesmo rebitador. O produto do rebitador é encaminhado a uma peneira vibratória de dois *decks*. As telas do primeiro *deck* possuem abertura de 1" (25,4 mm) e o segundo *deck* de 1,2 mm.

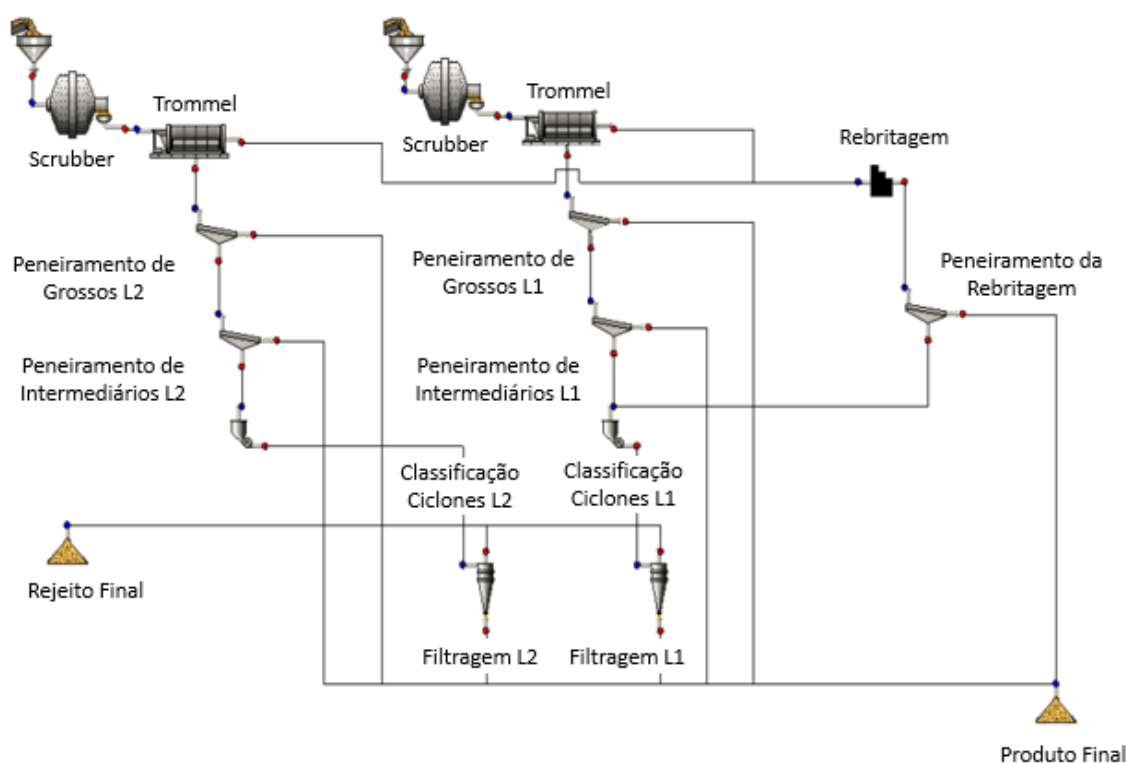
Ainda no circuito de granulado, o *undersize* do *trommel* segue para o primeiro estágio de peneiramento. A usina possui dois estágios de peneiramento, ambos com duas peneiras vibratórias de dois *decks*. No peneiramento primário as telas possuem abertura de 1" no primeiro *deck* e 8 mm no segundo *deck*. O *oversize* combinado do peneiramento primário é produto final e segue para o pátio de estocagem em transportadores de correia. O *undersize* do peneiramento primário segue para o segundo estágio de peneiramento, também composto por duas peneiras vibratórias de dois *decks*, onde o primeiro *deck* possui abertura de 4 mm e o segundo de 1,2 mm. O *oversize* combinado deste peneiramento junta-se ao *oversize* do peneiramento primário seguindo para o pátio de estocagem como produto granulado. O *undersize* deste peneiramento constitui a alimentação do circuito de finos.

Em cada linha, o circuito de finos é composto por cinco baterias de ciclones, quais sejam, bateria primária de finos (4 ciclones de 26"), bateria secundária de finos (2 ciclones de 26"), bateria primária de superfinos (18 ciclones de 10"), bateria secundária de superfinos (4 ciclones de 10") e bateria terciária de superfinos (4 ciclones de 6").

O produto fino é composto pelo *underflow* da bateria secundária de finos e *underflow* da bateria secundária de superfinos. Ambos os fluxos seguem para o filtro de correia, onde ocorre a redução do conteúdo de água. Após a filtragem o produto do filtro segue para o pátio de estocagem, juntando-se ao produto granulado, por transportadores de correias. O *overflow* das baterias de 10" e o filtrado seguem para a lagoa de espessamento e em seguida para as lagoas de disposição. Todo material com tamanho maior do que 0,037 mm (400# Tyler) é considerado produto. A presença de material passante em 0,037 mm no produto é considerada contaminante. Desta forma, o produto granulado de Juruti é compreendido entre 3" e 1,2 mm, enquanto que o produto fino apresenta granulometria nominal entre 1,2 mm e 0,037 mm.

A Figura 25 apresenta o fluxograma simplificado do circuito da usina industrial de beneficiamento da bauxita de Juruti.

Figura 25 - Fluxograma da usina.



Fonte: acervo do autor.

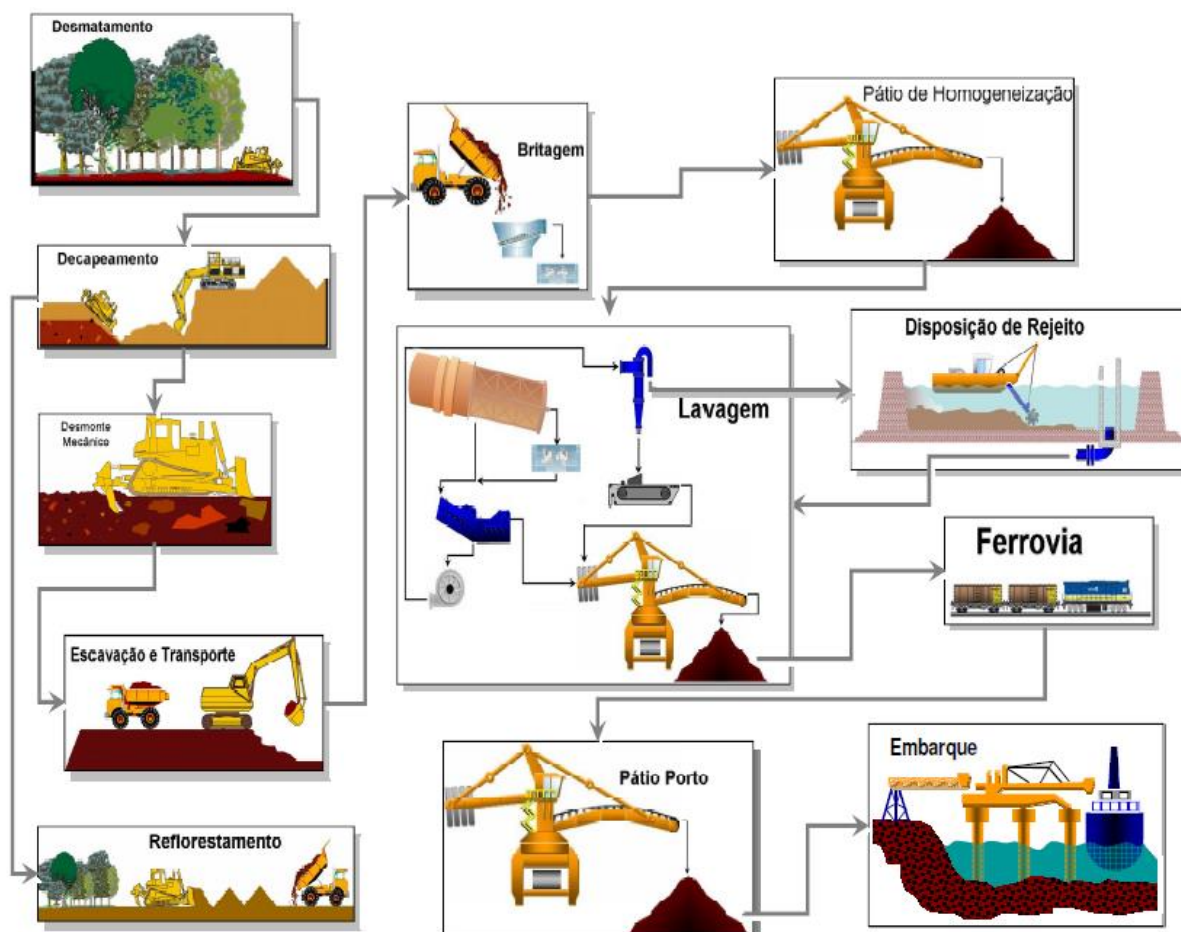
4.4.3 Estocagem, transporte e expedição

O produto da usina de beneficiamento é úmido, composto por material granulado e material fino. Depois de estocado nas pilhas de produto, o minério segue em vagões de composição ferroviária para as instalações do porto. A via férrea possui 55 quilômetros de extensão, operando uma composição com locomotiva e 40 vagões com capacidade para 80 toneladas cada. No porto, o produto é descarregado dos vagões da composição, estocado e expedido em navios.

O terminal portuário de Juruti tem capacidade para receber navios de até 55 mil toneladas, similares aos que navegam no Canal do Panamá. A estrutura do porto está localizada ao lado da cidade, às margens do Rio Amazonas, inserida no contexto da comunidade.

A Figura 26 ilustra o fluxograma de operação da mina de bauxita de Juruti, desde a liberação da área para lavra até o carregamento dos navios.

Figura 26 - Operação da mina de bauxita de Juruti.



Fonte: acervo do autor.

4.4.4 Controle de qualidade

No processo produtivo se faz necessário o monitoramento da qualidade do minério a ser lavrado, que norteia os planos de lavra, bem como do produto em processamento. Na mina de bauxita de Juruti são realizadas amostragens via sondagens em malha de 200 m x 200 m para adquirir dados que serão a base do modelo geológico de curto prazo. As amostragens presentes no processo produtivo estão listadas a seguir.

- i. Alimentação da usina;
- ii. Alimentação do circuito de finos, dentro da usina;
- iii. Produto granulado;
- iv. Produto fino;
- v. Rejeito gerado pela usina;
- vi. Produto embarcado.

Para cada uma das seis amostras listadas são determinados os teores de alumina aproveitável, sílica reativa, óxido de ferro, umidade e distribuição granulométrica. Apenas a amostragem da alimentação da usina ainda não apresenta o resultado de distribuição granulométrica, em função de adequações ainda necessárias na torre de amostragem que processa este material. Todas as análises são realizadas no laboratório físico e químico da mina de Juruti.

A qualidade da pilha formada no pátio de estocagem do beneficiamento é determinada por ponderação da massa produzida de granulado e finos pelos seus respectivos teores. Esta ponderação leva aos teores globais da pilha que são considerados para o planejamento dos embarques.

Amostragens expeditas são realizadas para o acompanhamento horário da operação. Os resultados da quantidade de fração passante em 0,037 mm presente no produto granulado e finos, bem como os resultados de teores, guiam a tomada de decisão na usina de beneficiamento.

5 MÉTODO

O método empregado no presente trabalho consistiu na construção de um modelo integrado do processo de beneficiamento da usina de Juruti, denominado caso base. O caso base representou, portanto, a referência de operação da usina industrial. A partir do modelo calibrado foram executadas simulações visando avaliar a influência de alterações de variáveis de processo, geometria dos equipamentos e mudanças nas variáveis operacionais no desempenho do processo industrial.

Para estabelecimento do caso base, foram planejadas e executadas amostragens na usina industrial especificamente para este fim, seguidas de balanço de massa, ajustes de modelos e análises de desempenho. O presente capítulo descreve essas etapas do trabalho.

5.1 AMOSTRAGEM INDUSTRIAL

Com o objetivo de gerar informações experimentais para estabelecimento do caso base foram realizadas duas campanhas de amostragem na usina de beneficiamento de bauxita de Juruti, uma em cada linha produtiva:

- i) A primeira foi realizada em 17/03/2017 somente na linha 2, na qual todos os fluxos foram amostrados durante o período entre 08:22 h e 10:10 h. Um segundo momento de amostragem nesta linha foi realizado, sendo destinado exclusivamente a obter amostras dos fluxos da bateria de ciclones terciária de superfinos (ciclones de 6") operante nesta linha, bem como os fluxos posteriores que são impactados pela operação da mesma. Tais fluxos foram amostrados durante o período entre 15:20 h e 16:00 h;
- ii) A segunda foi realizada em 17/03/2017 somente na linha 1, na qual todos os fluxos foram amostrados durante o período entre 14:20 h e 16:00 h;

Na amostragem i e ii foram amostrados 26 fluxos da usina. Reitera-se que na segunda amostragem realizada ainda na linha 2, mencionado no item i, foram amostrados apenas os fluxos relacionados à bateria terciária de superfinos, bem como

os fluxos impactados por ela. A seguir é apresentada a lista com a descrição dos fluxos amostrados nas amostragens i e ii.

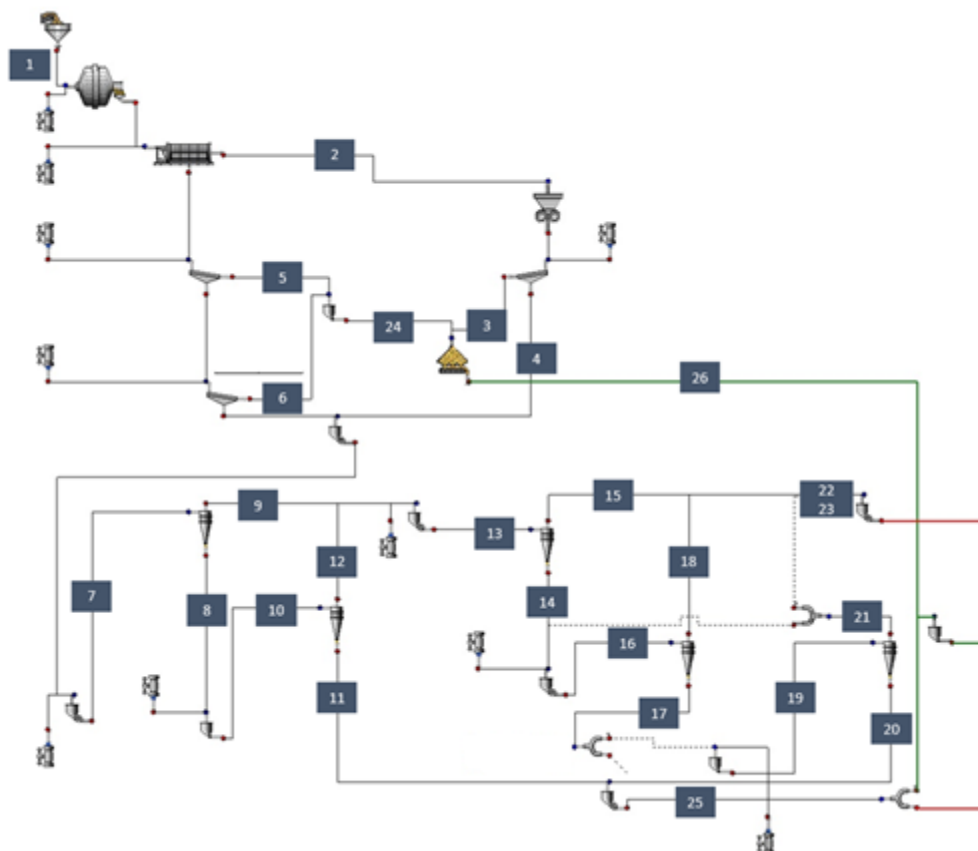
1. Alimentação da usina;
2. *Oversize* do *trommel*;
3. *Oversize* da peneira do rebitador;
4. *Undersize* da peneira do rebitador;
5. *Oversize* combinado dos dois *decks* da peneira primária;
6. *Oversize* combinado dos dois *decks* da peneira secundária;
7. Alimentação da bateria de ciclones – Primária de Finos;
8. *Underflow* da bateria de ciclones – Primária de Finos;
9. *Overflow* da bateria de ciclones – Primária de Finos;
10. Alimentação da bateria de ciclones – Secundária de Finos;
11. *Underflow* da bateria de ciclones – Secundária de Finos;
12. *Overflow* da bateria de ciclones – Secundária de Finos;
13. Alimentação da bateria de ciclones – Primária de Superfinos;
14. *Underflow* da bateria de ciclones – Primária de Superfinos;
15. *Overflow* da bateria de ciclones – Primária de Superfinos;
16. Alimentação da bateria de ciclones – Secundária de Superfinos;
17. *Underflow* da bateria de ciclones – Secundária de Superfinos;
18. *Overflow* da bateria de ciclones – Secundária de Superfinos;
19. Alimentação da bateria de ciclones – Terciária de Superfinos;
20. *Underflow* da bateria de ciclones – Terciária de Superfinos;
21. *Overflow* da bateria de ciclones – Terciária de Superfinos;
22. Rejeito global;
23. Rejeito de cada linha em amostragem;
24. Produto Granulado;
25. Produto Fino;
26. Produto Fino Combinado.

A Figura 27 ilustra o fluxograma da usina de beneficiamento de Juruti destacando os pontos amostrados.

As amostras dos pontos 1, 2, 3, 5, 6 e 26 (granulado e finos) foram obtidas em transportadores de correia, enquanto as amostras de 4, 6 a 21 (polpa) foram tomadas

nas tubulações de alimentação, *overflow* e *underflow*, por meio de válvulas instaladas nas mesmas. As amostras dos pontos 22 e 23 (rejeito) foram obtidas de forma manual, ou seja, utilizando-se de um amostrador manual, as amostras foram tomadas na calha que recebe o rejeito das linhas de produção. As amostras dos pontos 24 e 25 foram obtidas utilizando-se amostradores lineares operados de forma automática.

Figura 27 - Fluxograma da usina com destaque para os pontos amostrados.



Fonte: acervo do autor.

A tomada de amostras em cada ponto selecionado foi conduzida de forma incremental, durante um período estável de operação, com alimentação considerada típica. Foram definidos critérios para validação da estabilidade e alimentação típica.

As amostras foram obtidas seguindo os critérios de massa mínima estabelecidos pela teoria da amostragem de Pierry Gy (1992). Os amostradores utilizados para a retirada das amostras atendiam à regra de possuírem abertura no mínimo três vezes

o tamanho da maior partícula para material acima de 10 mm, e de no mínimo 10 mm para fluxos com partículas menores que 3 mm. Os fluxos de granulados foram amostrados nos transportadores de correia, delimitando-se um comprimento para retirada do material suficientemente grande, de tal forma a garantir a obtenção da massa mínima representativa para cada fluxo. Os fluxos de polpa foram tomados utilizando-se amostradores do tipo canecas. Para aumentar o grau de redundância da amostragem, durante o período de amostragem foram registrados os valores de todos os instrumentos instalados, em funcionamento e calibrados no circuito. Foram também registradas as características físicas da bauxita alimentada à usina durante as duas campanhas de amostragem.

Para a realização da amostragem foi necessária uma equipe de 25 pessoas, distribuídos em todos os pontos de amostragem, de modo a retirar as amostras no momento adequado. A equipe foi treinada quanto ao método de tomada da amostra, bem como quanto à importância de se seguir o procedimento correto de coleta para garantir que a amostra fosse representativa do referido fluxo. A Figura 28 ilustra a equipe responsável pela amostragem durante o treinamento teórico e prático.

Figura 28 - Treinamento do time da amostragem.



Fonte: acervo do autor.

As amostras foram tomadas de forma incremental nos períodos anteriormente referidos. No total foram geradas 174 amostras que foram processadas e analisadas no próprio laboratório da mina de bauxita de Juruti, gerando um total de 451 análises. Ressalta-se que todos os fluxos de polpa foram coletados em duplicata. As amostras

foram coletadas em sacos plásticos amarrados com abraçadeiras plásticas. Para cada incremento e amostra foram utilizados três sacos plásticos buscando evitar vazamento do material. Quando necessário, foram utilizados mais do que três sacos. A Figura 29 ilustra as amostras obtidas devidamente armazenadas no laboratório da mina de bauxita de Juruti.

Figura 29 - Amostras coletadas e armazenadas no laboratório físico.



Fonte: acervo do autor.

5.2 PROCESSAMENTO FÍSICO E QUÍMICO DAS AMOSTRAS

Parte das amostras coletadas estavam em estado de polpa e outras em estado granulado ou fino. A Tabela 5 apresenta as séries de peneiras utilizadas no tratamento das amostras de granulados, finos e polpa.

Tabela 5 - Série de peneiras utilizadas para processamento das amostras.

Malha de Abertura	Granulado Peneiras Quadradas (400 mm x 400 mm)	Finos e Polpa Peneiras Circulares (220 mm x 50 mm)
4"	SIM	NA
3"	SIM	NA
2"	SIM	NA
1"	SIM	NA
1/2"	SIM	NA
1/4"	SIM	SIM
8#	SIM	SIM
16#	SIM	SIM
30#	SIM	SIM
70#	SIM	SIM
100#	SIM	SIM
140#	SIM	SIM
200#	SIM	SIM
270#	SIM	SIM
400#	SIM	SIM
Total	15	10

Fonte: acervo do autor.

Foram definidas rotas de processamento das amostras de polpa e granulados de modo a obter todas as informações necessárias para calibração dos modelos. A seguir é apresentada a descrição das rotas de tratamento das amostras de polpa e granulado, separadamente.

Processamento das amostras de polpa

- i. Determinação da concentração de sólidos e química total.
 - a. Esta rota foi aplicada a todas as amostras de polpa que não eram duplicatas;
 - b. Cada incremento foi aberto e todo o seu conteúdo descarregado em bandejas e seco em estufas a 105° C. A massa seca de cada bandeja foi aferida em balanças. A soma das massas das bandejas com o minério constituiu o peso seco de cada incremento. A tara de

cada incremento inclui o peso dos sacos e abraçadeiras plásticas utilizados para armazenamento das amostras;

- c. Após seca, a massa foi moída em moinhos de rolos para desagregar o material e permitir quarteamento adequado para análise química;
- d. O material moído foi homogeneizado por pilha alongada, com o objetivo de reunir a massa de todos os incrementos da referida amostra, posteriormente quarteada em divisor tipo Jones, respeitando-se o critério da abertura de cada *riffle* ser maior do que 3 vezes o tamanho da maior partícula do fluxo;
- e. Ao final deste procedimento obteve-se alíquota com aproximadamente 80 g que foram pulverizados e em seguida destinadas a análise química, para determinação dos teores de alumina aproveitável ($Av-Al_2O_3$), sílica reativa ($Re-SiO_2$), e óxido de ferro (Fe_2O_3) via digestão da bauxita em meio alcalino, espectrometria de absorção atômica e titulometria, respectivamente.

ii. Determinação da distribuição granulométrica

- a. Este procedimento foi aplicado a todas as amostras de polpa que eram duplicatas;
- b. Para este processamento não houve necessidade de homogeneizar os incrementos, bem como de manter a porcentagem de sólidos original;
- c. Cada incremento foi descarregado no conjunto de peneiras vibratórias (malhas indicadas anteriormente na Tabela 5);
- d. O material passante em 0,037 mm não foi coletado neste procedimento;
- e. Todas as frações foram secas em estufa a 105° C;
- f. Após seco o material foi pesado e a massa de cada fração anotada. A massa do material passante em 0,037 mm foi obtida por dedução da umidade que foi determinada na rota anterior e diferença de massa seca calculada para a soma das massas da fração.

Processamento das amostras de granulados e finos

- i. Determinação da porcentagem de sólidos, química total e distribuição granulométrica.
 - a. Esta rota foi aplicada a todas as amostras de granulados e finos;
 - b. Cada incremento foi aberto e todo o seu conteúdo descarregado em bandejas e seco em estufas a 105° C. A massa seca de cada bandeja foi aferida em balanças. A soma das massas das bandejas com o minério constituiu o peso seco de cada incremento. A tara de cada incremento inclui o peso dos sacos e abraçadeiras plásticas utilizados para armazenamento da amostra. Deste procedimento obteve-se a porcentagem de sólidos e, por conseguinte, as umidades de cada amostra. Neste ponto cabe a observação de que as umidades dos fluxos granulados foram impactadas em alguns fluxos durante os períodos das amostragens devido a condições inerentes à operação da usina. Em alguns destes fluxos, notou-se que pontos de adição de água não puderam ser desligados, e a água adicionada (a exemplo da alimentação dos lavadores e nos *sprays* das peneiras) diluiu o percentual de sólidos apresentados aos pontos de coleta definidos nos transportadores de correia. Este aspecto foi considerado irrelevante e assim não invalidou tais amostras, porém os valores de umidade foram tratados com as respectivas considerações nos balanços de massas;
 - c. Após determinada a umidade, a massa seca foi homogeneizada por pilha alongada. Deste procedimento foram obtidas duas alíquotas de massa similar, uma utilizada para determinação química e outra para peneiramento, ou seja, metade da pilha para cada tratamento;
 - d. A porção destinada à análise química foi britada, moída em moinho de rolos, quarteada em quarteador Jones, pulverizada em pulverizador elétrico de panela e enviada para determinação de $Av-Al_2O_3$, $Re-SiO_2$, Fe_2O_3 ;
 - e. Com a porção restante do quarteamento inicial da pilha foi realizado o peneiramento a úmido. A massa seca inicial foi aferida, pois a massa na fração passante na malha 0,037 mm foi determinada por diferença entre a soma das massas das frações e a massa inicial. Tal estratégia foi utilizada devido à impraticabilidade de coletar e secar enormes volumes de polpa que foram gerados durante o peneiramento das amostras, visto que existem

limitações de uso de floculantes ou ácidos, que auxiliariam na sedimentação e desaguamento desta fração. O controle de perdas no manejo dos produtos foi bastante criterioso.

ii. Procedimentos especiais

Para algumas amostras fez-se necessário aplicar um procedimento específico de processamento, em função de algum dos seguintes fatores:

- Impossibilidade de quarteamento das amostras após secagem, devido à presença de fragmentos maiores do que 3" (alimentação da usina e *oversize* do *trommel*);
- Necessidade de analisar a recuperação da fração passante em 0,037 mm nos fluxos globais, quais sejam, alimentação da usina e finos para ambas as linhas, finos com a terciária em operação para a linha 2 e produto combinado para a linha 1;
- Necessidade de obter a umidade na alimentação das linhas, informação necessária para determinação da vazão de sólidos na alimentação da usina;
- Necessidade de avaliar a qualidade dos produtos obtidos durante a amostragem.

A seguir é apresentado o detalhamento para cada uma das amostras citadas.

a. Alimentação da usina e produto combinado (granulado + finos).

Inicialmente foi determinado o peso bruto, tara e peso seco. Em seguida a amostra foi peneirada com lavagem excessiva dos finos agregados às partículas grossas, coletando-se a fração passante em 0,037 mm. Todas as frações foram secas separadamente e o peso seco determinado. Após secas cada fração foi cominuída em britador de mandíbulas e moinho de rolos, sendo em seguida quarteadas, pulverizadas e enviadas para análise química. Cada fração foi analisada separadamente, inclusive a fração passante em 0,037 mm. Este procedimento permitiu o cálculo da química global do referido fluxo a partir das massas e teores obtidos de cada fração.

b. *Oversize do trommel.*

Inicialmente foi determinado o peso bruto, tara e peso seco. Em seguida a amostra foi peneirada à úmido com lavagem excessiva dos finos agregados às partículas grossas, coletando-se a fração passante em 0,037 mm. Todas as frações foram secas separadamente e o peso seco determinado. Em seguida todas as frações foram reagrupadas em uma única amostra. Esta amostra foi cominuída em britador de mandíbulas e moinho de rolos, sendo em seguida quarteada, pulverizada e enviada para análise química global. Este procedimento permitiu avaliar o impacto da operação de escrubagem na distribuição granulométrica do material, comparando este resultado à alimentação da usina.

c. Finos (linha 1 e 2) e finos com a terciária em operação (linha 2).

Inicialmente foi determinado o peso bruto, tara e peso seco. Em seguida a amostra tal qual retirada do campo foi quarteada em duas alíquotas (1 e 2). A alíquota 1 foi peneirada a úmido, com lavagem excessiva dos finos agregados às partículas grossas, a fração passante em 0,037 mm foi coletada e as frações foram secas separadamente. O peso seco foi determinado para cada fração e em seguida as frações foram cominuídas em britador de mandíbulas e moinho de rolos. Cada fração foi quarteada obtendo-se alíquotas de 80 g de cada fração, que foram pulverizadas e em seguida realizada análise química, inclusive da fração passante em 0,037 mm. Já a alíquota 2 foi diretamente cominuída em britador de mandíbulas e moinho de bolas, quarteada, pulverizada e realizada análise química global.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA PLANTA DURANTE A AMOSTRAGEM

Para que os balanços de massa possam ser elaborados adequadamente, bem como os modelos possam ser calibrados de modo a representar o processo produtivo em análise, é de suma importância que durante a amostragem a usina apresente um desempenho estável e típico de sua operação. Desta forma, antes de se iniciar a amostragem propriamente dita, os parâmetros operacionais foram avaliados buscando validar a estabilidade da operação, após validado pelo time da operação a amostragem foi conduzida. A seguir é apresentada a análise da estabilidade da operação da usina durante o período de tomada das amostras. Para tal foram analisadas as variações temporais dos parâmetros de operação dos equipamentos, por meio de informações extraídas do sistema de gerenciamento de dados da usina de beneficiamento de Juruti, o *Process Information Management System (PIMS)*. A análise destas informações é de suma importância para auxiliar nas análises de desempenho e balanços mássicos.

O PIMS permite o armazenamento de dados em intervalos de segundos e, no caso de algumas variáveis, por até frações de segundo. No total foram analisadas 28 variáveis referentes aos processos de alimentação da usina e operação da ciclonagem, conforme apresentado na Tabela 6. A indicação “TAG” refere-se à identificação do instrumento instalado no campo e que transmite as informações para o PIMS. A etapa de peneiramento não possui sistemas de medição *online*.

As informações extraídas do PIMS durante o período da amostragem foram discretizadas em intervalos de um minuto, possibilitando avaliar e comparar a estabilidade do processo nos períodos de amostragem com os demais períodos produtivos do dia. Na sequência são apresentados os gráficos com suas respectivas avaliações.

Tabela 6 - Variáveis registradas no PIMS referente ao dia da amostragem.

Etapa do Processo	Descrição da Medição	Identificação do Instrumento de Medição (TAG)
Alimentação linha 1	Vazão mássica (t/h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_WIT_631B_BL_0007
Alimentação linha 2	Vazão mássica (t/h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_WIT_631B_BL_0008
Lavador linha 1	Vazão de água (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_009_CV
Lavador linha 2	Vazão de água (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_010_CV
Ciclonagem 1ª 26" L1	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_001_CV
Ciclonagem 1ª 26" L2	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_002_CV
Ciclonagem 2ª 26" L1	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_003_CV
Ciclonagem 2ª 26" L2	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_004_CV
Ciclonagem 1ª 10" L1	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_005_CV
Ciclonagem 1ª 10" L2	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_006_CV
Ciclonagem 2ª 10" L1	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_007_CV
Ciclonagem 2ª 10" L2	Densidade (t/m ³)	JURUTI_UNIT\ANALOG_DIT_631B_008_CV
Ciclonagem 1ª 26" L1	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_031_CV
Ciclonagem 1ª 26" L2	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_032_CV
Ciclonagem 2ª 26" L1	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_037_CV
Ciclonagem 2ª 26" L2	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_038_CV
Ciclonagem 1ª 10" L1	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_043_CV
Ciclonagem 1ª 10" L2	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_044_CV
Ciclonagem 2ª 10" L1	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_049_CV
Ciclonagem 2ª 10" L2	Vazão de polpa (m ³ /h)	JURUTI_UNIT\ANALOG_FIT_631B_050_CV
Ciclonagem 1ª 26" L1	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_007_CV
Ciclonagem 1ª 26" L2	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_008_CV
Ciclonagem 2ª 26" L1	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_013_CV
Ciclonagem 2ª 26" L2	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_014_CV
Ciclonagem 1ª 10" L1	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_019_CV
Ciclonagem 1ª 10" L2	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_020_CV
Ciclonagem 2ª 10" L1	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_025_CV
Ciclonagem 2ª 10" L2	Pressão (kgf/cm ²)	JURUTI_UNIT\ANALOG_PIT_631B_026_CV

A estabilidade da operação da usina foi avaliada por meio da análise da vazão de alimentação da usina e da vazão de alimentação do circuito de finos, que recebe o *undersize* do circuito de grossos.

Para avaliação da alimentação da usina foram analisados os dados das balanças integradoras instaladas nos transportadores de correia que alimentam a linha 1 e linha 2 para o intervalo de 48 horas de operação, das 07:00 h do dia anterior ao dia da amostragem até às 07:00 h do dia posterior ao dia da amostragem, gráfico apresentado na Figura 30. Observa-se que no início da amostragem na linha 1, bem

como durante a amostragem da linha 2, houve o registro de leituras anômalas, que foram consideradas como *outlier* e excluídas da análise, por meio da avaliação do *box plot* apresentado na Figura 31 e 32, que representam a linha 1 e 2, respectivamente.

Figura 30 - Série temporal das leituras de vazão mássica da linha 1 e 2 durante 48 horas de operação.

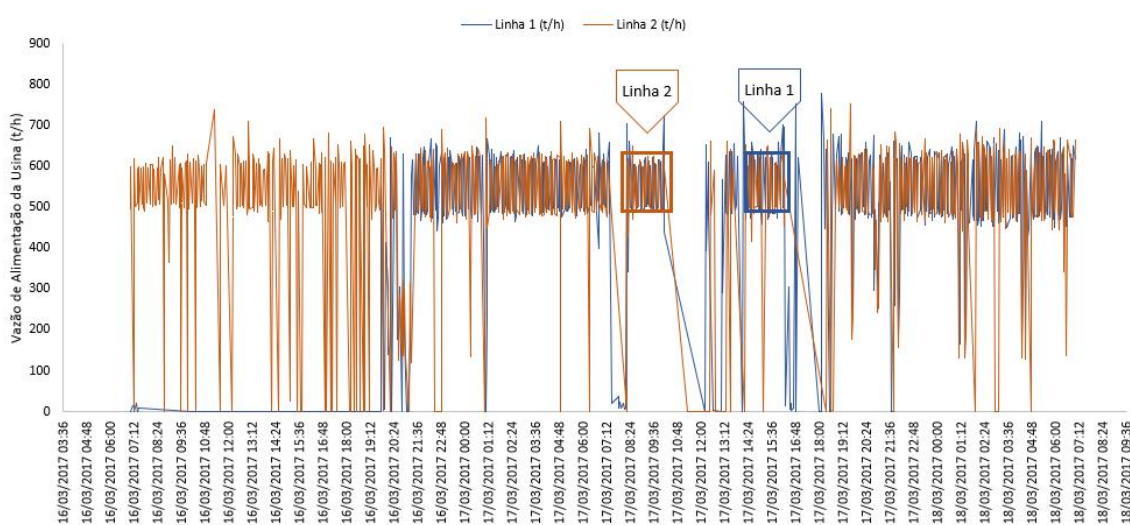
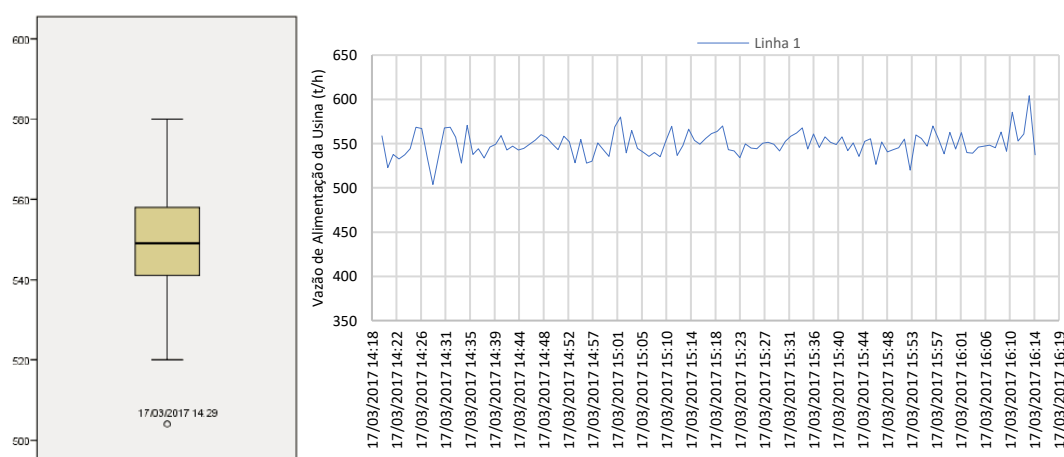


Figura 31 - Série temporal das leituras de vazão mássica da linha 1 durante o seu respectivo período de amostragem.

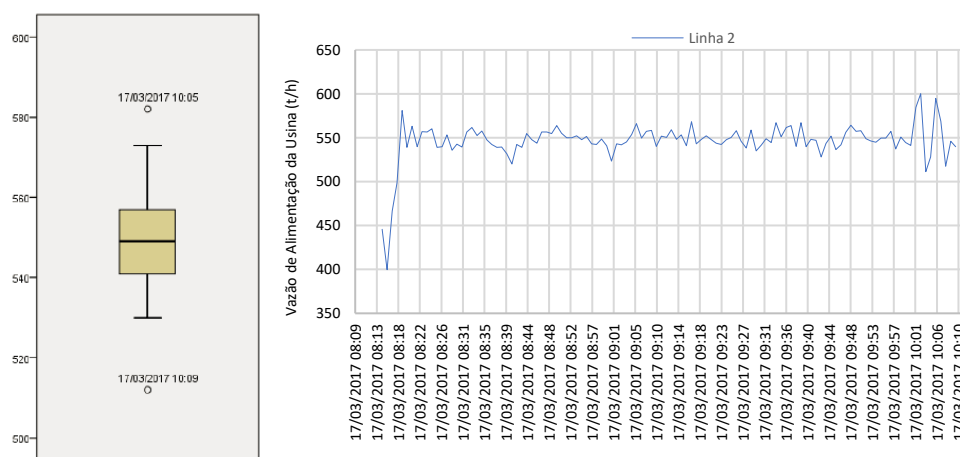


A partir dos dados apresentados na Figura 31, obteve-se uma vazão média de alimentação da linha 1, em base úmida, igual a 549 t/h, com desvio padrão de 13 t/h,

ou seja, coeficiente de variação de 2,4%, além de mínimo de 522 t/h e máximo de 585 t/h.

Para a linha 2 a média da vazão de alimentação foi igual a 549 t/h, com desvio padrão de 12 t/h, ou seja, coeficiente de variação de 2,2%, além de mínimo de 512 t/h e máximo de 582 t/h, conforme mostram os dados apresentados na Figura 32.

Figura 32 - Série temporal das leituras de vazão mássica da linha 2 durante o seu respectivo período de amostragem.



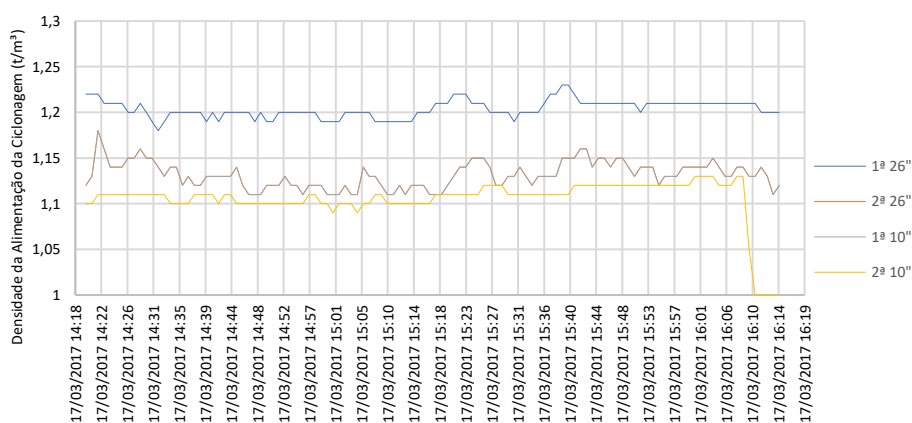
Com os dados apresentados nas Figuras 31 e 32 evidenciou-se a estabilidade da alimentação dos circuitos, sendo, então, a vazão de operação considerada constante durante todas as amostragens, com valor igual a 549 t/h base úmida.

Para a alimentação do circuito de finos, que contempla os processos de bombeamento de polpa, cicloneagem e filtragem, foram avaliadas as variáveis vazão e densidade da polpa alimentada ao circuito e pressão de operação da cicloneagem durante o período da amostragem.

A Figura 33 apresenta o gráfico da densidade de polpa para as quatro baterias de ciclones da linha 1. Variações de densidade foram observadas nas leituras dos densímetros das baterias primária de ciclones de 26" (1ª 26") e secundária de ciclones de 10" (2ª 10"), conforme operação normal da usina. A bateria secundária de ciclones de 26" (2ª 26") e primária de ciclones de 10" (1ª 10") apresentaram as maiores

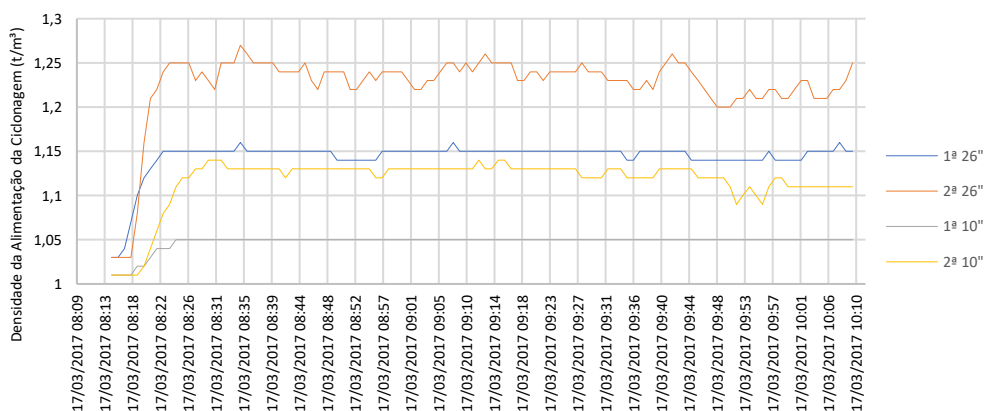
variações, no entanto, os valores transmitidos pelos instrumentos foram idênticos, o que remete à leitura inconsistente ou com possível erro, pois as duas referidas baterias de ciclones trabalham com diferentes pressões de operação.

Figura 33 - Série temporal das leituras de densidade da polpa alimentada à ciclonagem da linha 1 durante o seu período de amostragem.



A Figura 34 apresenta o gráfico da densidade de polpa para as quatro baterias de ciclones da linha 2. As maiores variações de densidade foram observadas nas leituras dos densímetros das baterias secundária de ciclones de 26" (2ª 26") e secundária de ciclones de 10" (2ª 10").

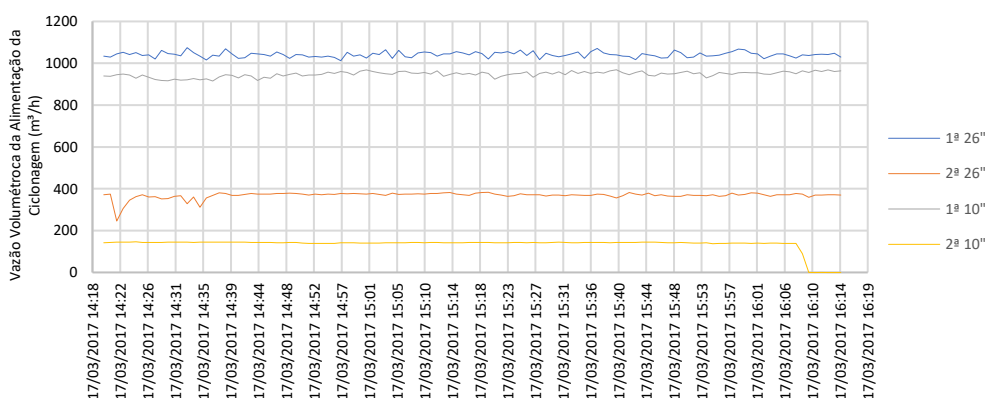
Figura 34 - Série temporal das leituras de densidade da polpa alimentada à ciclonagem da linha 2 durante o seu período de amostragem.



Ainda sobre a Figura 34, a bateria primária de ciclones de 10" (1ª 10") apresentou valores tão estáveis de densidade que sugere que tais dados não representam a realidade da operação. Deste modo, as informações desta bateria de ciclones não foram consideradas como suporte ao fechamento de balanços de massa.

A Figura 35 apresenta o gráfico da vazão volumétrica de polpa de alimentação das quatro baterias de ciclones da linha 1. Conforme mostra a mesma Figura 35, não foram observados distúrbios significativos nas vazões volumétricas, as quais se mantiveram dentro da faixa de operação considerada normal da usina.

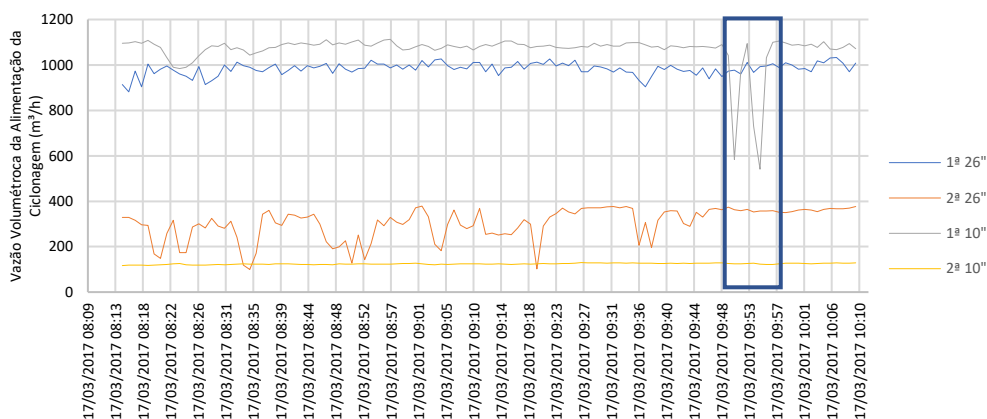
Figura 35 - Série temporal das leituras de vazão volumétrica de polpa alimentada à ciclonação da linha 1 durante o seu período de amostragem.



O comportamento da vazão volumétrica da bateria secundária de superfinos (2ª 10") se apresentou bastante estável, no entanto, como não foram realizados ajustes significativos nas velocidades das bombas ou abertura/fechamento de ciclones que justificariam alteração na vazão e a falha na leitura pelos instrumentos, os referidos dados de vazão volumétrica foram incluídos na análise e, portanto, utilizados para suporte aos balanços de massa.

A Figura 36 apresenta o gráfico da vazão volumétrica de polpa da alimentação das quatro baterias de ciclones da linha 2.

Figura 36 - Série temporal das leituras de vazão volumétrica de polpa alimentada à ciclonagem da linha 2 durante o seu período de amostragem.



Observou-se uma instabilidade na alimentação da bateria primária de superfinos (1ª 10") de 09:49 às 09:57, que gerou também um distúrbio na secundária de superfinos (2ª 10"), conforme área destacada no gráfico da Figura 36. Como diferentes sensores identificaram flutuação no circuito durante o período de 09:49 às 09:57, estes dados não foram excluídos pela análise de *outliers*.

As Figuras 37 e 38 apresentam o gráfico da variável pressão de operação para as quatro baterias de ciclones da linha 1 e 2, respectivamente. A variação ao longo do período da amostragem atestou condições normais de operação.

Figura 37 - Série temporal dos registros de pressão das baterias de ciclones da linha 1 durante o seu período de amostragem.

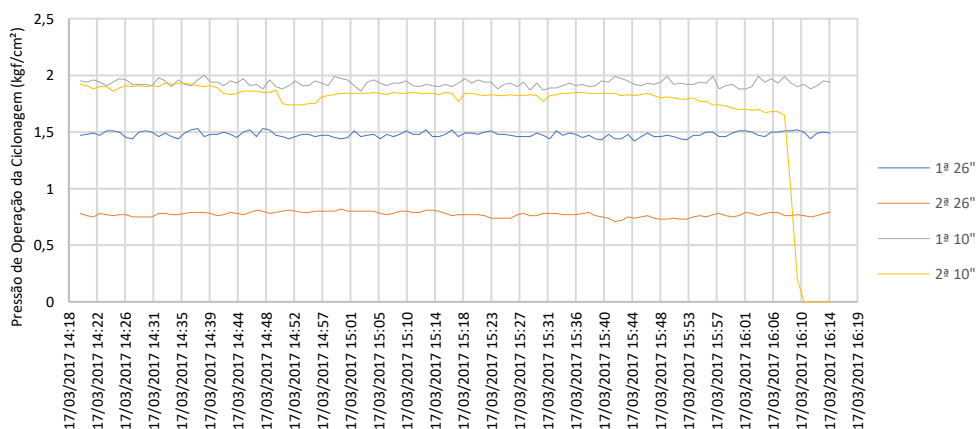
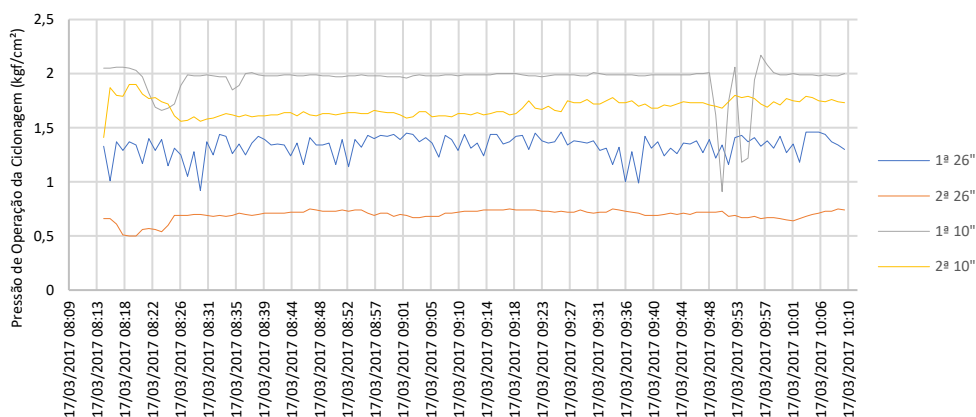


Figura 38 - Série temporal dos registros de pressão das baterias de ciclones da linha 2 durante o seu período de amostragem.



Foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson entre os pares de variáveis selecionados, conforme apresentados na Tabela 6 e Tabela 7 para a linha 1 e linha 2, respectivamente. Os valores em vermelho sinalizam correlações positivas, de fracas ($r > 0,5$) a fortes ($> 0,9$), enquanto os valores em amarelo apontam correlações negativas de mesma magnitude. Na Tabela 7 e 8 as indicações FIT, PIT e DIT referem-se, respectivamente, aos instrumentos instalados no campo para medição de vazão volumétrica, pressão de operação e densidade.

É esperado que valores de pressão, indicados como PIT na tabela, tenham correlação positiva com valores de vazão, indicados como FIT na tabela, para uma mesma bateria. Este comportamento pode ser observado entre as variáveis vazão volumétrica e pressão da bateria primária de 10". Importante ressaltar que, apesar da relação entre vazão e pressão ser quadrática ($P \propto Q^2$), houve uma alta linearidade entre ambas no domínio considerado. Boas correlações experimentais obtidas entre variáveis relacionadas teoricamente sugerem boa sensibilidade na aquisição de dados e maior credibilidade às leituras, apontando quais dados podem ser usados para auxiliar os fechamentos dos balanços de massa.

Tabela 7 - Correlação de Pearson para as variáveis da linha 1.

Etapa do Processo	Alimentação Linha 1 WIT	Lavador L1 FIT	Ciclonação 1° 26" L1 DIT	Ciclonação 2° 26" L1 DIT	Ciclonação 1° 10" L1 DIT	Ciclonação 2° 10" L1 DIT	Ciclonação 1° 26" L1 FIT	Ciclonação 2° 26" L1 FIT	Ciclonação 1° 10" L1 FIT	Ciclonação 2° 10" L1 FIT	Ciclonação 1° 26" L1 PIT	Ciclonação 2° 26" L1 PIT	Ciclonação 1° 10" L1 PIT	Ciclonação 2° 10" L1 PIT
Alimentação Linha 1 WIT	1,00	0,00	-0,16	-0,25	-0,25	-0,04	0,04	0,12	0,06	-0,08	0,01	0,15	0,02	-0,06
Lavador L1 FIT	0,00	1,00	0,00	-0,12	-0,12	-0,20	-0,07	0,11	-0,04	0,07	0,05	0,17	-0,14	0,14
Ciclonação 1° 26" L1 DIT	-0,16	0,00	1,00	0,48	0,48	0,45	0,13	-0,20	0,13	0,00	-0,11	-0,56	0,12	-0,11
Ciclonação 2° 26" L1 DIT	-0,25	-0,12	0,48	1,00	1,00	0,55	0,07	-0,52	-0,19	0,34	-0,21	-0,74	0,11	0,15
Ciclonação 1° 10" L1 DIT	-0,25	-0,12	0,48	1,00	1,00	0,55	0,07	-0,52	-0,19	0,34	-0,21	-0,74	0,11	0,15
Ciclonação 2° 10" L1 DIT	-0,04	-0,20	0,45	0,55	0,55	1,00	0,11	-0,08	0,08	0,04	-0,19	-0,71	0,07	-0,27
Ciclonação 1° 26" L1 FIT	0,04	-0,07	0,13	0,07	0,07	0,11	1,00	-0,12	-0,04	0,04	0,04	0,01	-0,07	-0,01
Ciclonação 2° 26" L1 FIT	0,12	0,11	-0,20	-0,52	-0,52	-0,08	-0,12	1,00	0,22	-0,32	-0,03	0,21	-0,11	-0,32
Ciclonação 1° 10" L1 FIT	0,06	-0,04	0,13	-0,19	-0,19	0,08	-0,04	0,22	1,00	-0,38	-0,20	0,03	-0,09	-0,48
Ciclonação 2° 10" L1 FIT	-0,08	0,07	0,00	0,34	0,34	0,04	0,04	-0,32	-0,38	1,00	0,18	-0,20	0,10	0,74
Ciclonação 1° 26" L1 PIT	0,01	0,05	-0,11	-0,21	-0,21	-0,19	0,04	-0,03	-0,20	0,18	1,00	0,12	-0,05	0,21
Ciclonação 2° 26" L1 PIT	0,15	0,17	-0,56	-0,74	0,11	-0,71	0,01	0,21	0,03	-0,20	0,12	1,00	-0,13	0,03
Ciclonação 1° 10" L1 PIT	0,02	-0,14	0,12	0,11	0,11	0,07	-0,07	-0,11	-0,09	0,10	-0,05	-0,13	1,00	0,19
Ciclonação 2° 10" L1 PIT	-0,06	0,14	-0,11	0,15	0,15	-0,27	-0,01	-0,32	-0,48	0,74	0,21	0,03	0,19	1,00

Tabela 8 - Correlação de Pearson para as variáveis da linha 2.

Etapa do Processo	Alimentação Linha 2 WIT	Lavador L2 FIT	Ciclonação 1° 26" L2 DIT	Ciclonação 2° 26" L2 DIT	Ciclonação 1° 10" L2 DIT	Ciclonação 2° 10" L2 DIT	Ciclonação 1° 26" L2 FIT	Ciclonação 2° 26" L2 FIT	Ciclonação 1° 10" L2 FIT	Ciclonação 2° 10" L2 FIT	Ciclonação 1° 26" L2 PIT	Ciclonação 2° 26" L2 PIT	Ciclonação 1° 10" L2 PIT	Ciclonação 2° 10" L2 PIT
Alimentação Linha 2 WIT	1,00	-0,18	-0,11	-0,22	0,01	0,01	0,05	0,06	-0,02	0,04	0,01	-0,08	-0,04	0,05
Lavador L2 FIT	-0,18	1,00	0,14	0,03	0,00	-0,02	0,16	0,06	-0,16	0,00	0,12	-0,20	-0,11	0,00
Ciclonação 1° 26" L2 DIT	-0,11	0,14	1,00	0,55	-0,29	0,38	0,14	-0,11	0,25	-0,18	0,08	0,09	0,26	-0,31
Ciclonação 2° 26" L2 DIT	-0,22	0,03	0,55	1,00	0,01	0,57	-0,04	-0,34	0,25	-0,28	-0,04	0,11	0,25	-0,48
Ciclonação 1° 10" L2 DIT	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ciclonação 2° 10" L2 DIT	0,01	-0,02	0,38	0,57	-0,04	1,00	-0,02	-0,37	0,38	-0,30	-0,03	0,36	0,34	-0,69
Ciclonação 1° 26" L2 FIT	0,05	0,16	0,14	-0,04	-0,01	-0,02	1,00	0,03	0,08	0,02	0,58	0,06	0,14	0,02
Ciclonação 2° 26" L2 FIT	0,06	0,06	-0,11	-0,34	0,00	-0,37	0,03	1,00	-0,10	0,42	0,19	-0,07	-0,04	0,43
Ciclonação 1° 10" L2 FIT	-0,02	-0,16	0,25	0,25	0,00	0,38	0,08	-0,10	1,00	0,03	-0,01	0,20	0,94	-0,20
Ciclonação 2° 10" L2 FIT	0,04	0,00	-0,18	-0,28	0,01	-0,30	0,02	0,42	0,03	1,00	0,08	0,17	0,05	0,71
Ciclonação 1° 26" L2 PIT	0,01	0,12	0,08	-0,04	0,00	-0,03	0,58	0,19	-0,01	0,08	1,00	0,06	0,03	0,04
Ciclonação 2° 26" L2 PIT	-0,08	-0,20	0,09	0,11	0,00	0,36	0,06	-0,07	0,20	0,17	0,06	1,00	0,15	-0,11
Ciclonação 1° 10" L2 PIT	-0,04	-0,11	0,26	0,25	0,00	0,34	0,14	-0,04	0,94	0,05	0,03	0,15	1,00	-0,15
Ciclonação 2° 10" L2 PIT	0,05	0,00	-0,31	-0,48	-0,01	-0,69	0,02	0,43	-0,20	0,71	0,04	-0,11	-0,15	1,00

6.2 BALANÇOS DE MASSA E FLUXOGRAMAS

A partir das informações obtidas na campanha de amostragem, dados obtidos a partir da amostragem de campo e informações provenientes do processamento físico e químicos das amostras, foi possível elaborar os balanços de massa e metalúrgicos para as duas linhas de produção da usina de beneficiamento de bauxita de Juruti, quais sejam, linha 1 e linha 2. A seguir são apresentados os parâmetros de operação dos equipamentos durante as amostragens, bem como os referidos balanços.

Com estas informações foram realizadas calibrações de modelos matemáticos de cada equipamento e a integração dos mesmos para configurar os circuitos industriais de lavagem e classificação, formando assim o caso base representativo da operação típica da usina de Juruti, para o minério processado durante as campanhas de amostragem.

6.2.1 Linha 1

A amostragem da linha 1 foi conduzida com vazão de alimentação nova de 549 t/h, base úmida. Os dados de laboratório indicaram uma umidade de 17,5% no fluxo de alimentação, resultando em uma vazão de 453 t/h base seca. As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam parâmetros de geometria dos equipamentos e de operação durante a amostragem, respectivamente para os lavadores, peneiras e ciclones.

Tabela 9 - Parâmetros geométricos e operacionais dos lavadores e britador durante a amostragem (linha 1).

Variável	Unidade	Lavadores com <i>Trommel</i>
Número de Unidades em Operação	-	1
Diâmetro Nominal	m	3,0
Comprimento Nominal da Câmara de Desagregação	m	8,0
Comprimento Nominal do <i>Trommel</i>	m	4,0
Abertura da Malha do <i>Trommel</i>	mm	76,2
Inclinação	°	4,75
Potência dos Motores (Placa)	HP	250
Fabricante	-	FFE Minerals
Rotação	rpm	8 a 17
Vazão de Projeto (Base Seca)	tph	474
Tempo de Residência Médio	min	1,60
Variável	Unidade	Britador
Número de Unidades em Operação	-	1
Tipo	-	Rolos Dentados
Diâmetro dos Rolos	mm	684
Rotação	rpm	18
Potência dos Motores (Placa)	kW	600
Fabricante	-	FFE Minerals / Abon
Modelo	-	13/300 CCTD
Rotação	rpm	18

Tabela 10 - Parâmetros geométricos e de operação das peneiras durante a amostragem (linha 1).

Variável	Unidade	Primária Grossos (2 decks)	Secundária Intermediários (2 decks)	Rebritagem (2 decks)
Número de unidades por linha	-	2	2	1
Tipo	-	Vibratória	Vibratória	Vibratória
Movimento	-	Linear	Linear	Circular
Inclinação	°	18	0	18
Largura Nominal	mm	3.185	3.795	2.251
Comprimento Nominal	mm	6.922	8.217	4.716
Área Ativa	m ²	13,8	21,0	5,8
Abertura Telas (Primeiro Deck)	mm	25,4	2,8	25,4
Abertura Telas (Segundo Deck)	mm	8,0	1,2	1,2
Potência dos Motores (Placa)	HP	4 x 20	4 x 30	20
Fabricante	-	Metso	Metso	Metso
Modelo	-	MSH 8' x 20' DD	MSH 10' x 24' DD	SH 5' x 14' DD

Tabela 11 - Parâmetros geométricos e de operação dos ciclones durante a amostragem (linha 1).

Variável	Unidade	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
Número de Unidades Instaladas - Total	-	4	2	18	4	4
Diâmetro Nominal	mm	660	660	250	250	0
Diâmetro Equivalente de Entrada - Inlet	mm	211	211	73	73	-
Diâmetro do Vortex	mm	200	200	80	80	-
Diâmetro do Apex	mm	80	100	25	25	-
Pressão de Operação	kPa	130	69	190	164	150
Fabricante	-	Weir Minerals				
Modelo	-	CAVEX 650CVX	CAVEX 650CVX	CAVEX 250CVX6	CAVEX 250CVX7	CAVEX 150CVX6

A Figura 39 apresenta o fluxograma e sumário do balanço de massa obtido para o caso base da linha 1, contendo vazões de sólidos, vazões volumétricas de polpa, recuperações mássicas, porcentagens de sólidos, diâmetros cuja porcentagem passante é 80% (P_{80}) e porcentagem passante em 400# (0,037 mm), este último índice considerado contaminante no processo de beneficiamento da bauxita de Juruti. Ressalta-se que as vazões de alimentação do rebitador e da peneira da rebitagem se referem somente ao material proveniente da linha 1, pois estes dois últimos equipamentos recebem o material das duas linhas de produção.

As Tabelas 12 apresenta o detalhamento dos resultados de vazões de sólidos, água e polpa, porcentagem de sólidos, densidade de sólidos e polpa, além de distribuições granulométricas completas das etapas de lavagem, rebitagem e peneiramento da linha 1, conforme resultantes dos exercícios de balanços de massas.

Analogamente, a Tabela 13 apresenta o detalhamento dos resultados de vazões de sólidos, água e polpa, porcentagem de sólidos, densidade de sólidos e polpa, além de distribuições granulométricas completas das etapas de classificação da linha 1, conforme resultantes dos exercícios de balanços de massas.

Figura 39 - Fluxograma para o caso base da linha 1.

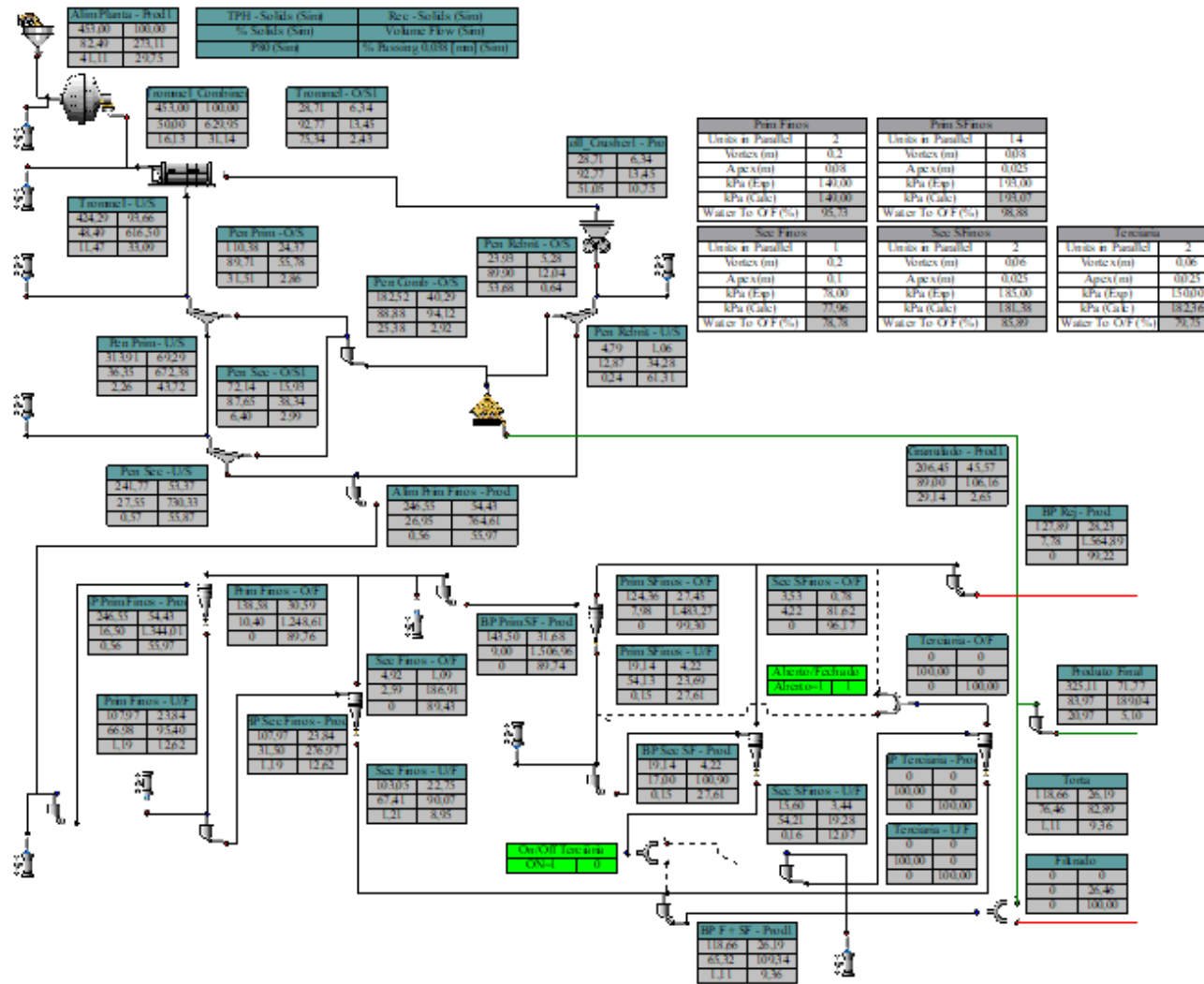


Tabela 12 - Balanço de massa para o caso base da linha 1: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebitador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	453,0	453,0	28,7	424,3	424,3	110,4	313,9	28,7	28,7	28,7	23,9	4,8	313,9	72,1	241,8	206,4
Densidade Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	96,2	453,0	2,2	451	562	12,7	550	2,2	2,2	35,1	2,7	32,4	646	10,2	636	25,5
Porcentagem Sólidos (%)	82,5	50,0	92,8	48,5	43,0	89,7	36,3	92,8	92,8	45,0	89,9	12,9	32,7	87,7	27,5	89,0
Densidade da Polpa (t/m ³)	2,01	1,44	2,30	1,42	1,36	2,21	1,28	2,30	2,30	1,38	2,21	1,09	1,25	2,15	1,20	2,19
Vazão de Polpa (m ³ /h)	273	630	13,5	616	728	55,8	672	13,5	13,5	46,3	12,0	34,3	769	38,3	730	106
P ₈₀ (mm)	41,1	16,1	75,3	11,5	11,5	31,5	2,26	75,3	51,0	51,0	53,7	0,24	2,26	6,4	0,571	29,1
Malha (mm)		% Passante														
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	98,9	99,6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
76,2	95,0	98,3	82,4	100	100	100	100	82,4	97,4	97,4	97,6	100	100	100	100	100
50,8	83,6	93,7	11,0	99,3	99,3	97,5	100	11,0	79,7	79,7	75,6	100	100	100	100	95,8
25,40	71,0	86,0	6,7	91,4	91,4	67,0	100	6,7	42,5	42,5	31,0	100	100	100	100	74,3
12,70	60,2	76,5	6,0	81,2	81,2	27,9	100	6,0	27,7	27,7	13,2	100	100	100	100	51,4
8,00	54,3	70,2	5,5	74,6	74,6	12,2	96,5	5,5	23,8	23,8	8,6	100	96,5	84,7	100	37,1
6,350	52,2	68,0	5,3	72,2	72,2	6,7	95,3	5,3	22,5	22,5	7,0	100	95,3	79,4	100	32,1
2,380	44,0	57,5	4,5	61,1	61,1	5,3	80,7	4,5	19,3	19,3	3,2	99,9	80,7	17,2	99,5	9,2
1,190	40,0	50,9	4,0	54,1	54,1	4,7	71,5	4,0	17,4	17,4	0,7	98,3	71,5	5,7	91,1	4,6
0,590	36,7	44,8	3,5	47,6	47,6	4,1	62,9	3,5	15,6	15,6	0,6	90,7	62,9	4,4	80,3	3,8
0,212	33,5	38,2	3,0	40,5	40,5	3,5	53,6	3,0	13,5	13,5	0,6	77,9	53,6	3,7	68,4	3,2
0,150	32,5	36,3	2,8	38,6	38,6	3,3	50,9	2,8	12,9	12,9	0,6	74,1	50,9	3,5	65,1	3,1
0,105	31,7	34,6	2,7	36,8	36,8	3,2	48,6	2,7	12,3	12,3	0,6	70,4	48,6	3,3	62,1	2,9
0,074	30,8	33,1	2,6	35,2	35,2	3,0	46,5	2,6	11,7	11,7	0,6	67,0	46,5	3,2	59,4	2,8
0,053	30,2	32,0	2,5	34,0	34,0	2,9	44,9	2,5	11,2	11,2	0,6	64,0	44,9	3,1	57,3	2,7
0,037	29,7	31,1	2,4	33,1	33,1	2,9	43,7	2,4	10,7	10,7	0,6	61,3	43,7	3,0	55,9	2,7

Tabela 13 - Balanço de massa para o caso base da linha 1: ciclonagem primária e secundária de finos (ciclones de 26") e superfinos (ciclones de 10").

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Rejeito	PT Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	246,6	108,0	138,6	108,0	103,1	4,9	143,5	19,1	124,4	19,1	15,6	3,5	127,9	118,7
Densidade Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	1247,7	53,2	1194	234,8	50	185,0	1450,9	16,2	1434,7	93,4	13,2	80,2	1514,9	63
Porcentagem Sólidos (%)	16,5	67,0	10,4	31,5	67,4	2,6	9,0	54,1	8,0	17,0	54,2	4,2	7,8	65,3
Densidade da Polpa (t/m³)	1,11	1,69	1,07	1,24	1,70	1,02	1,06	1,49	1,05	1,12	1,49	1,03	1,05	1,66
Vazão de Polpa (m³/h)	1344	95,4	1249	277,0	90	186,9	1507,0	23,7	1483,3	100,9	19,3	81,6	1564,9	109
P80 (mm)	0,56	1,19	<0,010	1,19	1,21	0,00	0,000	0,145	<0,010	0,145	0,163	<0,010	<0,010	1,115
Malha (mm)	Passante (%)													
6,350	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	99,5	99,0	100	99,0	98,9	100	100	100	100	100	100	100	100	99,0
1,190	91,3	80,1	100	80,1	79,1	100	100	100	100	100	100	100	100	81,9
0,590	80,5	55,6	100	55,6	53,5	100	100	99,9	100	99,9	99,9	100	100	59,6
0,212	68,6	29,9	98,8	29,9	26,6	99,9	98,8	91,1	100	91,1	89,1	100	100	34,8
0,150	65,3	24,0	97,4	24,0	20,4	99,3	97,5	81,1	100	81,1	76,8	100	100	27,9
0,105	62,3	19,6	95,6	19,6	15,8	97,7	95,7	67,5	100	67,5	60,2	100	100	21,7
0,074	59,5	16,1	93,4	16,1	12,3	94,9	93,4	50,8	99,95	50,8	39,7	100	100	15,9
0,053	57,5	14,0	91,4	14,0	10,2	92,0	91,4	37,2	99,75	37,2	23,1	99,5	99,7	11,9
0,037	56,0	12,6	89,8	12,6	9,0	89,4	89,7	27,6	99,30	27,6	12,1	96,2	99,2	9,4

Após a calibração do caso base e com os teores de alumina aproveitável (Al_2O_3), sílica reativa (SiO_2) e óxido de ferro (FeO_2) obtidos por análises químicas, as recuperações metalúrgicas foram calculadas para cada fluxo da usina. As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados consolidados para o circuito de granulado (lavagem, rebitagem e peneiramento) e finos (ciclonagem

primária e secundária de finos e superfinos), respectivamente para a linha 1. O balanço metalúrgico é de suma importância para a compreensão da performance da usina em termos de teor, o que, entende-se que é consequência da remoção de material considerado contaminante (fração passante em 0,037 mm).

Tabela 14 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 1: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebritador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			PT Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	453,0	453,0	28,7	424,3	424,3	110,4	313,9	28,7	28,7	28,7	23,9	4,8	313,9	72,1	241,8	206,4
Analito	Teores (%)															
Al₂O₃ Aproveitável	34,1	34,1	48,1	33,2	33,2	45,1	29,0	48,1	48,1	48,1	51,3	32,4	29,0	42,4	25,0	44,9
SiO₂ Reativa	9,7	9,7	4,4	10,1	10,1	6,3	11,4	4,4	4,4	4,4	3,7	8,0	11,4	4,8	13,4	5,5
Fe₂O₃	19,4	19,4	12,6	19,9	19,9	14,1	22,0	12,6	12,6	12,6	10,5	23,4	22,0	18,6	23,0	15,3
Analito	Recuperações (%)															
Al₂O₃ Aproveitável	100	100	8,9	91,1	91,1	32,2	59,8	8,9	8,9	8,9	7,9	1,0	58,8	19,8	39,0	59,9
SiO₂ Reativa	100	100	2,9	97,1	97,1	15,7	81,5	2,9	2,9	2,9	2,0	0,1	81,4	7,9	73,5	35,6
Fe₂O₃	100	100	4,1	95,9	95,0	17,7	78,2	4,1	4,1	4,1	2,8	1,3	78,2	15,3	63,0	35,8

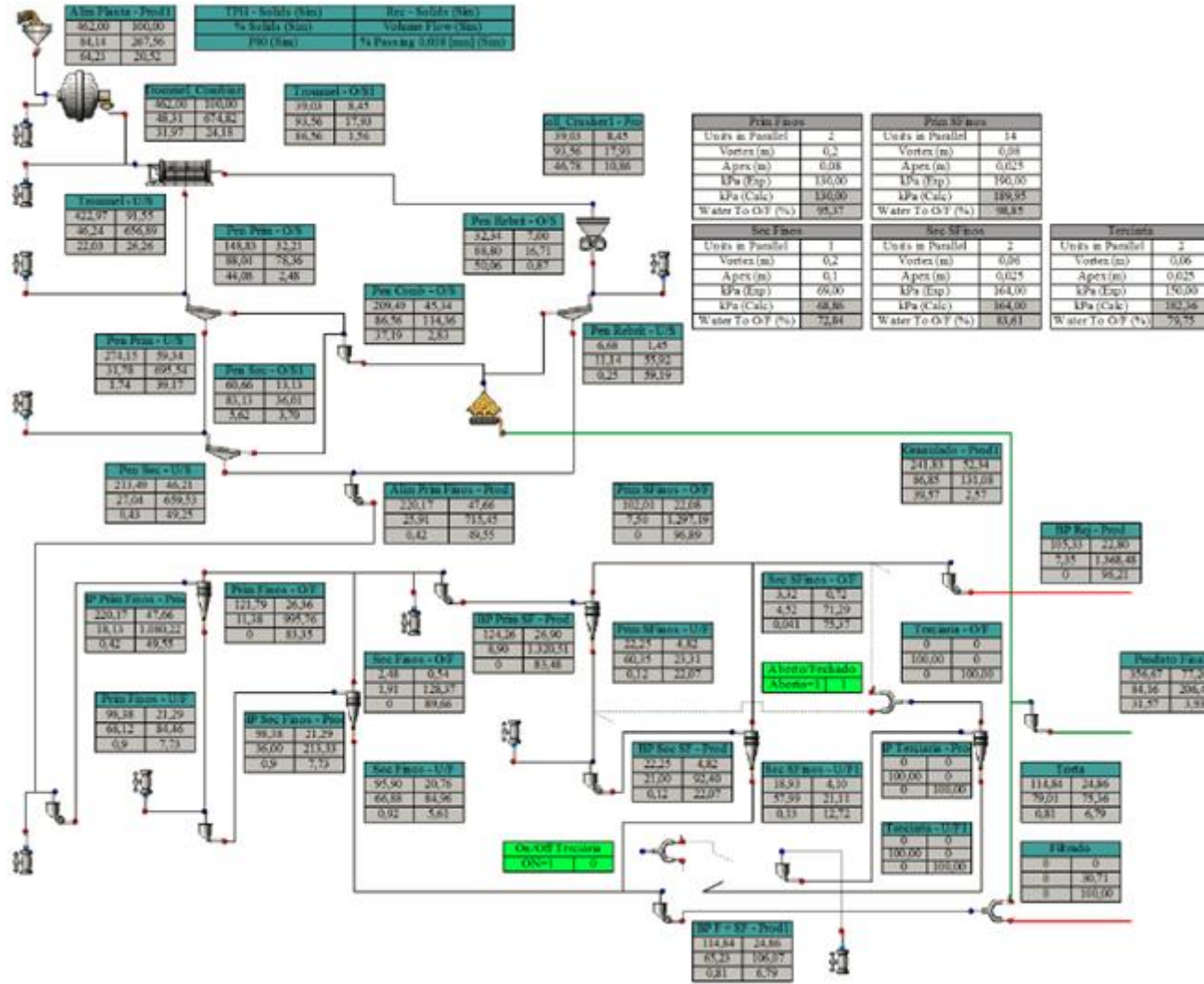
Tabela 15 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 1: ciclonagem primária e secundária de finos (ciclones de 26"), e primária e secundária de superfinos (ciclones de 10").

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Rejeito
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	
Vazão de Sólidos (t/h)	246,6	108,0	138,6	108,0	103,1	4,9	143,5	19,1	124,4	19,1	15,6	3,5	127,9
Analito	Teores (%)												
Al₂O₃ Aproveitável	25,1	42,7	11,5	42,7	44,0	14,2	11,6	38,5	7,4	38,5	43,8	14,7	7,6
SiO₂ Reativa	13,3	3,9	20,6	3,9	3,2	17,4	20,5	6,7	22,6	6,7	4,5	16,5	22,5
Fe₂O₃	23,0	21,7	24,0	21,7	21,2	31,4	24,3	22,6	24,5	22,6	21,9	25,3	24,5
Analito	Recuperação (%)												
Al₂O₃ Aproveitável	40,0	29,8	10,3	29,8	29,3	0,5	10,7	4,8	6,0	4,8	4,4	0,3	6,3
SiO₂ Reativa	74,4	9,5	64,9	9,5	7,5	1,9	66,9	2,9	63,9	2,9	1,6	1,3	65,3
Fe₂O₃	64,3	26,5	37,7	26,5	24,8	1,8	39,5	4,9	34,6	4,9	3,9	1,0	35,6

6.2.2 Linha 2

A amostragem da linha 2 foi conduzida sob vazão de alimentação nova de 549 t/h, base úmida. Os dados de laboratório indicaram uma umidade de 15,9% no fluxo de alimentação, resultando em uma vazão de 462 t/h base seca. Os parâmetros de geometria dos equipamentos e de operação durante a amostragem da linha 2 são os mesmos já apresentados para a linha 1 nas Tabelas 09, 10 e 11, uma vez que, conforme já mencionado neste texto, as linhas apresentam os mesmos equipamentos, tanto em termos de fornecedor e modelo. A Figura 40 apresenta o fluxograma e sumário do balanço de massa obtido para o caso base da linha 2.

Figura 40 - Fluxograma para o caso base da linha 2.



Ressalta-se que as vazões de alimentação dos rebitador e da peneira de rebitagem se referem somente ao material proveniente da linha 2, pois conforme já mencionado, estes dois últimos equipamentos recebem o material das duas linhas de produção.

A Tabela 16 apresentam o detalhamento dos resultados de vazão de sólidos, água e polpa, porcentagem de sólidos, densidade de sólidos e polpa, além de distribuições granulométricas completas das etapas de lavagem, rebitagem e peneiramento da linha 2, conforme resultantes dos exercícios de balanços de massas.

Analogamente, a Tabela 17 apresenta o detalhamento dos resultados de vazão de sólidos, água e polpa, porcentagem de sólidos, densidade de sólidos e polpa, além de distribuições granulométricas completas das etapas de classificação da linha 2, conforme resultantes dos exercícios de balanços de massas.

Tabela 16 - Balanço de massa para o caso base da linha 2: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebitador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	462,0	462,0	39,0	423,0	423	148	274,1	39,0	39,0	39,0	32,3	6,7	274,1	60,7	213,5	241,8
Densidade Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	87,09	494,4	2,7	492	609	20,2	588	3	2,7	57,4	4,1	53,3	588	12,3	576	36,6
Porcentagem Sólidos (%)	84,14	48,3	93,6	46,2	41	88,0	31,8	93,6	93,6	40,5	88,8	11,1	31,8	83,1	27,0	86,9
Densidade da Polpa (t/m³)	2,05	1,42	2,33	1,39	1,33	2,16	1,24	2,33	2,33	1,33	2,18	1,07	1,24	2,03	1,20	2,12
Vazão de Polpa (m³/h)	268	675	17,9	657	774	78,4	696	18	17,9	72,6	16,7	55,9	696	36,0	660	131
P80 (mm)	64,2	32,0	86,6	22,0	22	44,1	1,74	86,6	46,8	46,8	50,1	0,25	1,74	5,6	0,432	39,6
Malha (mm)	% Passante															
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	92,5	99,5	94,0	100	100	100	100	94,0	100	100	100	100	100	100	100	100
76,2	86,5	97,0	65,0	100	100	100	100	65,0	99,0	99,0	99,1	100	100	100	100	100
50,8	69,7	88,0	8,8	95,3	95,3	86,8	100	8,8	84,2	84,2	81,0	100	100	100	100	89,3
25,40	59,1	75,4	5,2	81,9	81,9	48,5	100	5,2	44,1	44,1	32,5	100	100	100	100	59,3
12,70	50,3	66,4	4,4	72,1	72,1	20,8	99,9	4,4	28,3	28,3	13,5	100	100	100	100	39,7
8,00	45,3	61,6	4,0	66,9	66,9	10,0	97,8	4,0	24,4	24,2	8,8	100	97,8	90,2	100	29,9
6,350	43,5	59,9	3,9	65,1	65,1	6,1	97,1	3,9	23,1	23,1	7,2	100	97,1	86,8	100	26,5
2,380	35,9	51,7	3,3	56,2	56,2	5,3	83,8	3,3	20,0	20,0	3,5	99,9	83,8	27,3	100	10,5
1,190	31,8	46,3	3,0	50,3	50,3	4,7	75,0	3,0	18,0	18,0	1,00	98,3	75,0	6,9	94,5	4,8
0,590	28,9	41,3	2,7	44,9	44,9	4,2	66,9	2,7	16,3	16,3	0,90	90,9	66,9	6,3	84,2	4,3
0,212	25,2	34,0	2,2	37,0	37,0	3,5	55,2	2,2	14,0	14,0	0,89	77,5	55,2	5,2	69,4	3,6
0,150	23,8	31,4	2,0	34,1	34,1	3,2	50,9	2,0	13,3	13,3	0,89	73,3	50,9	4,8	64,0	3,3
0,105	22,6	29,1	1,9	31,6	31,6	3,0	47,2	1,9	12,6	12,6	0,89	69,2	47,2	4,5	59,3	3,1
0,074	21,9	27,3	1,8	29,6	29,6	2,8	44,2	1,8	12,0	12,0	0,89	65,5	44,2	4,2	55,5	2,9
0,053	21,4	25,9	1,7	28,1	28,1	2,7	41,9	1,7	11,4	11,4	0,89	62,3	41,9	4,0	52,7	2,7
0,037	20,5	24,2	1,6	26,3	26,3	2,5	39,2	1,6	10,9	10,9	0,87	59,2	39,2	3,7	49,3	2,6

Tabela 17 - Balanço de massa para o caso base da linha 2: ciclone primária e secundária de finos (ciclones de 26"), e primária e secundária de superfino finos (ciclones de 10").

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Rejeito	Produto Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	220,2	98,4	121,8	98,4	95,9	2,5	124,3	22,3	102,0	22,3	18,9	3,3	105,0	114,8
Densidade dos Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	994,0	46,0	948	174,9	48	127,4	1272,0	14,6	1257,3	83,7	13,7	70,0	1327,3	61
Porcentagem de Sólidos	18,1	68,1	11,4	36,0	66,9	1,9	8,9	60,3	7,5	21,0	58,0	4,5	7,4	65,2
Densidade da Polpa (t/m³)	1,12	1,71	1,07	1,28	1,69	1,01	1,06	1,58	1,05	1,15	1,55	1,03	1,05	1,66
Vazão de Polpa (m³/h)	1080	84,0	996	213,0	85	128,0	1320,5	23,3	1297,2	92,4	21,1	71,3	1368,5	106
P80 (mm)	0,425	0,904	<0,010	0,904	0,920	<0,010	<0,010	0,118	<0,010	0,118	0,126	0,041	<0,010	0,813
Malha (mm)	Passante (%)													
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	100	100	100	100	100	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100
76,2	100	100	100	100	100	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100
50,8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
25,40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
12,70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
6,350	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,190	94,7	88,0	100,0	88,0	87,7	100	100	100	100	100	100	100	100	89,7
0,590	84,4	65,0	100,0	65,0	64,1	100	100	100	100	100	100	100	100	70,0
0,212	69,6	32,5	99,6	32,5	30,8	99,9	99,6	97,8	100	97,8	97,4	100	100	41,7
0,150	64,3	22,4	98,2	22,4	20,4	99,4	98,2	89,9	100	89,9	88,2	100	100	31,6
0,105	59,6	15,4	95,3	15,4	13,3	97,8	95,3	74,1	100	74,1	69,6	100	100	22,6
0,074	55,8	11,5	91,6	11,5	9,4	95,3	91,7	53,9	99,93	53,9	46,1	98,0	100	15,4
0,053	53,0	9,5	88,1	9,5	7,3	92,8	88,2	37,1	99,36	37,1	27,5	91,7	99,1	10,6
0,037	49,6	7,7	83,4	7,7	5,6	89,7	83,5	22,1	96,89	22,1	12,7	75,4	96,2	6,8

Após a calibração do caso base e com os teores de alumina aproveitável (Av-Al₂O₃), sílica reativa (SiO₂) e óxido de ferro (FeO₂) obtidos por análises químicas, as recuperações metalúrgicas foram calculadas para cada fluxo da usina. As Tabelas 18 e 19 apresentam os resultados consolidados para o circuito de granulado (lavagem, rebitagem e peneiramento) e finos (ciclonação primária e secundária de finos e superfinos), respectivamente para a linha 2.

Tabela 18 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 2: lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário.

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebitador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	462,0	462,0	39,0	423,0	423,0	148,8	274,1	39,0	39,0	39,0	32,3	6,7	274,1	60,7	213,5	241,8
Analito	Teores (%)															
Al₂O₃ Aproveitável	37,7	37,7	48,5	36,7	36,7	46,1	31,5	48,5	48,5	48,5	51,5	34,0	31,5	45,6	27,5	46,7
SiO₂ Reativa	7,67	7,67	3,90	8,02	7,02	3,40	10,53	3,90	3,90	3,90	3,01	8,16	10,53	3,40	12,55	3,35
Fe₂O₃	20,18	20,18	13,84	20,77	20,77	18,27	22,12	13,84	13,84	13,84	11,76	23,92	22,12	18,67	23,11	17,50
Analito	Recuperações (%)															
Al₂O₃ Aproveitável	100	100	10,9	89,1	89,1	39,4	49,7	10,9	10,9	10,9	9,6	1,3	49,7	15,9	33,8	64,9
SiO₂ Reativa	100	100	4,3	95,7	95,7	14,3	81,4	4,3	4,3	4,3	2,8	1,5	81,4	5,8	75,6	22,8
Fe₂O₃	100	100	5,8	94,2	94,2	29,2	65,0	5,8	5,8	5,8	4,1	1,7	65,0	12,1	52,9	45,4

Tabela 19 - Balanço metalúrgico para o caso base da linha 2: ciclonagem primária e secundária de finos (ciclones de 26"), e ciclonagem primária e secundária de superfinos (ciclones de 10").

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Rejeito	Torta
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	220,2	98,4	121,8	98,4	95,9	2,5	124,3	22,3	102,0	22,3	18,9	3,3	105,3	114,8
Analito	Teores (%)													
Al₂O₃ Aproveitável	27,7	44,0	14,6	44,0	44,7	14,9	14,6	43,1	8,4	43,1	45,9	26,9	9,0	44,9
SiO₂ Reativa	12,42	3,53	19,60	3,53	3,15	17,96	19,57	4,90	22,77	4,90	3,51	12,79	22,46	3,21
Fe₂O₃	23,13	20,71	25,08	20,71	20,50	29,06	25,16	20,92	26,09	20,92	20,30	24,51	26,06	20,47
Analito	Recuperação (%)													
Al₂O₃ Aproveitável	35,1	24,9	10,2	24,9	24,7	0,2	10,4	5,5	4,9	5,5	5,0	0,5	5,4	29,7
SiO₂ Reativa	77,2	9,8	67,4	9,8	8,5	1,3	68,6	3,1	65,6	3,1	1,9	1,2	66,8	10,4
Fe₂O₃	54,6	21,9	32,8	21,9	21,1	0,8	33,5	5,0	28,5	5,0	4,1	0,9	29,4	25,2

6.3 DIAGNÓSTICO DE DESEMPENHO

6.3.1 Linha 1

A Tabela 20 apresenta os índices selecionados de eficiência para cada etapa de peneiramento e classificação, conforme calculadas a partir da amostragem conduzida na linha 1. Neste caso, a eficiência foi considerada como a razão percentual entre vazão de finos no *undersize* e a vazão de finos na alimentação da etapa considerada, onde para cada etapa há uma malha considerada fina, conforme apresentado na Tabela 20.

Observa-se que, no circuito de granulado, as eficiências de peneiramento calculadas foram consideradas altas, variando de 94,4% para o peneiramento da rebritagem até 98,1% para o peneiramento secundário. As etapas de classificação primária de finos e primária de superfinos apresentaram eficiências na malha 0,037 mm consideradas excelentes, com valores de 90,1% e 95,9%, respectivamente. Para as baterias secundárias de finos e secundária de superfinos os valores de eficiência foram baixos, iguais a 32,3% e 64,3%, denotando assim baixa remoção da fração passante em 0,037 mm.

Tabela 20 - Índices de eficiência para o caso base da linha 1.

Variáveis	Fluxo	Trommel	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneira da Rebritagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	50,0	43,0	32,7	45,0	16,5	31,5	9,0	17,0
	Grossos	92,8	89,7	87,7	89,9	67,0	67,4	54,1	54,2
	Finos	48,5	36,3	27,5	12,9	10,4	2,6	8,0	4,2
	Polpa (vol)	2,1	7,7	5,0	26,0	7,1	32,5	1,6	19,1
	Sólidos	6,3	26,0	23,0	83,3	43,8	95,4	13,3	81,5
Partição para os Grossos (%)	Água	0,5	2,3	1,6	7,7	4,3	21,2	1,1	14,1
<i>d</i> _{50C} (mm)		54,45	8,66	2,09	1,10	0,081	<0,010	0,029	0,027
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de - 400# para os grossos)	76,2 mm	95,2%	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	95,7%	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	98,1%	94,4%	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	90,1%	32,3%	95,9%	64,3%

A Tabela 21 apresenta a análise das frações menores que 0,037 mm em todos os fluxos da usina. No gráfico apresentado ao lado da mesma tabela estão lançadas as contribuições neste quesito de cada fluxo que compõe o produto beneficiado da usina. Observa-se que a maior contribuição neste quesito no produto final vem do *underflow* da bateria secundária de finos (55,6%), seguida do *oversize* do peneiramento de grossos (19,1%), *oversize* do peneiramento de finos (13,0%), *underflow* da bateria secundária de superfinos (11,4%) e por último, com contribuição mínima, o *oversize* do peneiramento da rebritagem (0,9%).

Tabela 21 - Análise da fração passante na malha 0,037 mm (linha 1).

Fluxos	Análise da fração 0,037 mm	
	Vazão (tph)	Porcentagem
Alimentação	134,8	93,9
Produto Lavado	141,1	98,3
Overflow do <i>Trommel</i>	0,7	0,5
Produto do Rebritador	3,1	2,2
Overflow do Peneiramento de Grossos	3,2	2,2
Overflow do Peneiramento de Intermediários	2,2	1,5
Overflow do Peneiramento da Rebritagem	0,2	0,1
Underflow Primária de Finos	13,6	9,5
Underflow Secundária de Finos	9,2	6,4
Underflow Primária de Superfinos	5,3	3,7
Underflow Secundária de Superfinos	1,9	1,3
Produto Granulado	5,5	3,8
Produto Fino	11,1	7,7
Produto Final	16,6	11,6
Rejeito	126,9	88,4
-0,037 mm Total (alimentado + gerado)	143,5	100
-0,037 mm Gerado	8,7	6,1
Participação no Produto Final		
Underflow Secundária de Finos	9,2	55,6
Overflow do Peneiramento de Grossos	3,2	19,1
Overflow do Peneiramento de Intermediários	2,2	13
Underflow Secundária de Superfinos	1,9	11,4
Overflow do Peneiramento da Rebritagem	0,2	0,9
0,037 mm no Produto	16,6	100

6.3.2 Linha 2

A Tabela 22 apresenta os índices selecionados de eficiência para cada etapa de peneiramento e classificação, conforme calculados a partir da amostragem conduzida na linha 2. Neste caso, a eficiência foi considerada como a razão percentual entre vazão de finos no *undersize* e a vazão de finos na alimentação da etapa considerada.

Tabela 22 - Índices de eficiência para o caso base da linha 2.

Variáveis	Fluxo	<i>Trommel</i>	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneira da Rebritagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	48,3	41,0	31,8	40,5	18,1	36,0	8,9	21,0
	Grossos	93,6	88,0	83,1	88,8	68,1	66,9	60,3	58,0
Partição para os Grossos (%)	Finos	46,2	31,8	27,0	11,1	11,4	1,9	7,5	4,5
	Polpa (vol)	2,7	10,1	5,2	23,0	7,8	39,8	1,8	22,8
	Sólidos	8,4	35,2	22,1	82,9	44,7	97,5	17,9	85,1
	Água	0,5	3,3	2,1	7,1	4,6	27,2	1,1	16,4
<i>d_{50C} (mm)</i>		61,93	7,74	1,89	0,97	0,100	<0,010	0,043	0,025
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de - 400# para os grossos)	76,2 mm	94,4%	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	94,7%	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	98,1%	93,4%	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	93,0%	29,2%	95,3%	50,9%

Observa-se que, no circuito de granulado, as eficiências de peneiramento calculadas foram consideradas altas variando de 93,4% para o peneiramento da rebritagem até 98,1% para o peneiramento secundário. As etapas de classificação primária de finos e primária de superfinos também apresentaram altas eficiências na malha 0,037 mm, com valores de 90,1% e 95,9%, respectivamente. Para as baterias secundárias de finos e secundária de superfinos os valores de eficiência foram baixos, iguais a 29,2% e 50,9%, denotando assim baixa remoção da fração passante em 0,037 mm.

A Tabela 23 apresenta a análise das frações passantes em 0,037 mm em todos os fluxos da usina. No gráfico apresentado ao lado da mesma tabela estão lançadas as contribuições neste quesito de cada fluxo que compõe o produto beneficiamento da usina. Observa-se que a maior contribuição neste quesito no produto final vem do *underflow* da bateria secundária de finos (38,4%), seguida do *oversize* do peneiramento de grossos (26,3%), *oversize* do peneiramento de finos (17,2%), *underflow* da bateria secundária de superfinos (16,0%) e por último, com contribuição mínima, o *oversize* do peneiramento da rebitagem (2,0%).

Tabela 23 - Análise da fração passante na malha 0,037 mm (linha 2).

Fluxos	Análise da fração 0,037 mm	
	Vazão (tph)	Porcentagem
Alimentação	94,8	82,2
Produto Lavado	111,7	96,8
Oversize do <i>Trommel</i>	0,6	0,5
Produto do Rebitador	4,2	2,7
Oversize do Peneiramento de Grossos	3,7	3,2
Oversize do Peneiramento de Intermediários	2,2	1,9
Oversize do Peneiramento da Rebitagem	0,3	0,2
Underflow Primária de Finos	7,6	6,6
Underflow Secundária de Finos	5,4	4,7
Underflow Primária de Superfinos	4,9	4,3
Underflow Secundária de Superfinos	2,4	2,1
Produto Granulado	6,2	5,4
Produto Fino	7,8	6,8
Produto Final	14	12,1
Rejeito	101,3	87,9
-0,037 mm Total (alimentado + gerado)	115,4	100
-0,037 mm Gerado	20,5	17,8
Participação no Produto Final		
Underflow Secundária de Finos	5,4	38,6
Oversize do Peneiramento de Grossos	3,7	26,4
Oversize do Peneiramento de Intermediários	2,2	15,7
Underflow Secundária de Superfinos	2,4	17,1
Oversize do Peneiramento da Rebitagem	0,3	2,1
0,037 mm no Produto	14	100

6.3.3 Comparativo da eficiência das duas linhas

A Tabela 24 apresenta o comparativo entre as eficiências apresentadas por peneiramentos e classificações das linhas 1 e 2.

Tabela 24 - Comparativo entre as eficiências da linha 1 e linha 2.

Operação Unitária	Malha de Referência (mm)	Eficiência Linha 1 (%)	Eficiência Linha 2 (%)	Diferença Absoluta
<i>Trommel</i>	76,2	95,2	94,4	0,8
Peneiramento de Grossos	8,0	95,7	94,7	1,0
Peneiramento de Intermediários	1,2	98,1	98,1	0,0
Peneira da Rebritagem	1,2	94,4	93,4	1,0
Primária de Finos	0,037	90,1	93,0	-2,9
Secundária de Finos	0,037	32,3	29,2	3,1
Primária de Superfinos	0,037	95,9	95,3	0,6
Secundária de Superfinos	0,037	64,3	50,9	13,4

Com base nos dados apresentados na Tabela 24, observa-se que apenas a eficiência da ciclonação secundária de superfinos apresentou diferença significativa entre as linhas 1 e 2. Após a análise detalhada dos balanços e modelos gerados para a linha 1 e linha 2, constatou-se que, no geral, foram observados desempenhos muito similares entre as duas linhas. Desta forma, definiu-se como caso base principal e referência para as simulações apresentadas nos tópicos a seguir os modelos gerados para a Linha 1.

Importante ressaltar que as diferenças ainda observadas podem estar relacionadas a condições operacionais dos equipamentos, tais como: condição das barras elevatórias dos lavadores com desgastes diferentes de uma linha para outra, condição operacional dos *sprays* do peneiramento, incluindo o primeiro e segundo *decks*, direcionamento do fluxo da rebritagem apenas para a linha 1. Estes fatores podem ter impacto no momento da amostragem, da qual

foram extraídas as informações base para geração e calibração dos modelos representativos do processo de beneficiamento de Juruti.

7 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS E SIMULAÇÕES

7.1 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Na calibração do modelo representativo das operações de beneficiamento de bauxita da usina de Juruti, foram utilizados os modelos de curva de eficiência para a operação de peneiramento e Nageswararao para a operação de classificação em ciclones. As Tabelas 25 e 26 apresentam as constantes e os parâmetros obtidos para o modelo calibrado, considerado o caso base para o presente estudo.

Tabela 25 - Parâmetros do modelo de curva de eficiência aplicado ao peneiramento.

Parâmetros da Curva de Eficiência	<i>Trommel</i>	Peneiramento Primário	Peneiramento da Rebritagem	Peneiramento Secundário
Curva de eficiência - Alpha	13,82	9,72	80,51	6,92
Curva de eficiência - Beta	0,00	0,00	23,38	0,00
Partição de água – Prodt. Fino	99,51	97,70	92,34	98,43
D _{50 c} corrigido - d _{50c} (mm)	54,45	8,66	1,10	2,09
Beta calculado	1,00	1,00	1,10	1,00

Tabela 26 - Parâmetros dos modelos Nageswararao aplicado à ciclonação.

Parâmetros do Modelo	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
K _{D0} (D ₅₀ - total)	0,00022	0	0,00015	0,00013	0,00013
K _{Q0} (capacidade)	686,01	412,41	599,03	361,51	361,51
K _{V1} (partição em volume)	4,61	11,11	2,23	19,87	19,87
K _{W1} (partição de água)	15,59	26,45	13,84	109,86	109,86
Curva de Eficiência - Alpha	0,01	0	1,81	3,74	3,74
Curva de Eficiência - Beta	0,84	0,23	0	0	0

Para avaliar a qualidade da calibração foram lançadas em gráficos as distribuições granulométricas do produto granulado, produto fino e produto combinando obtidas do processo de amostragem juntamente com as distribuições obtidas no caso base calibrado. A Figura 41, 42 e 43 apresentam as referidas distribuições granulométricas.

Figura 41 - Distribuição granulométrica do produto granulado experimental e simulado para o caso base.

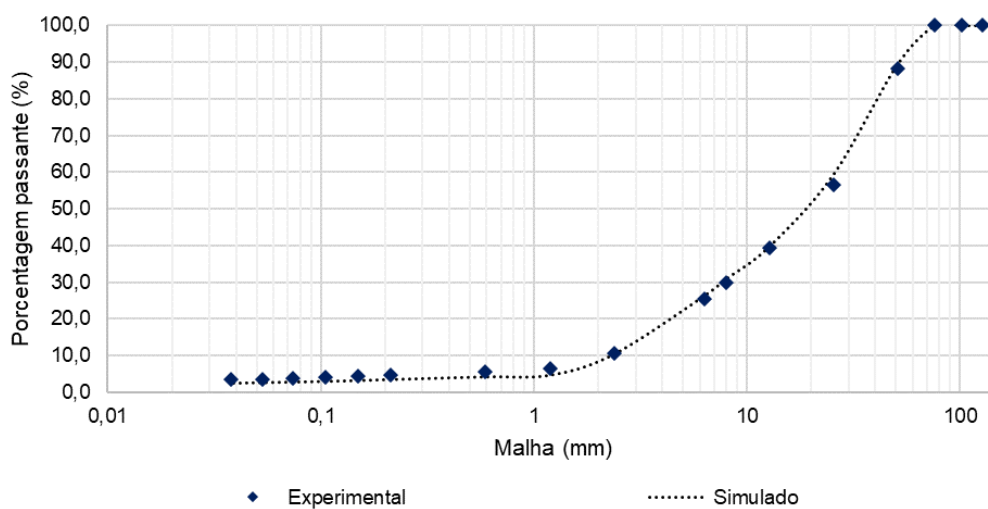


Figura 42 - Distribuição granulométrica do produto fino experimental e simulado para o caso base.

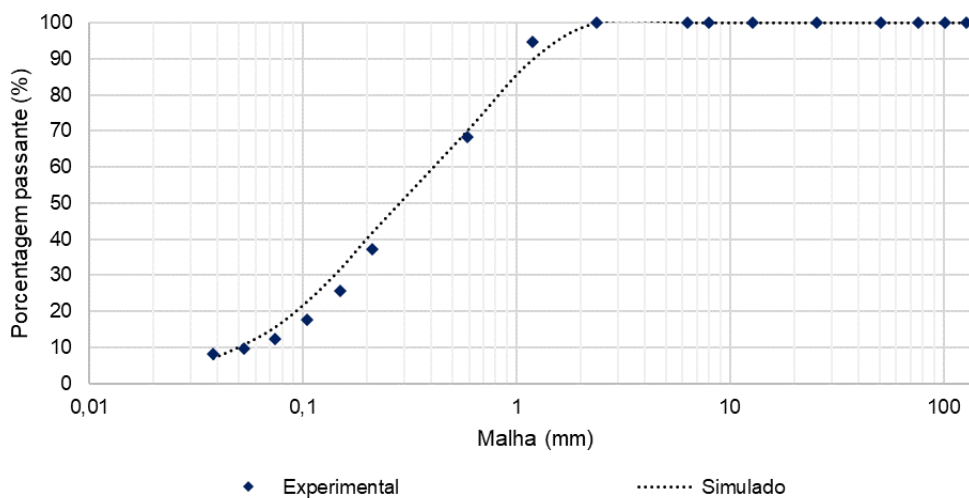
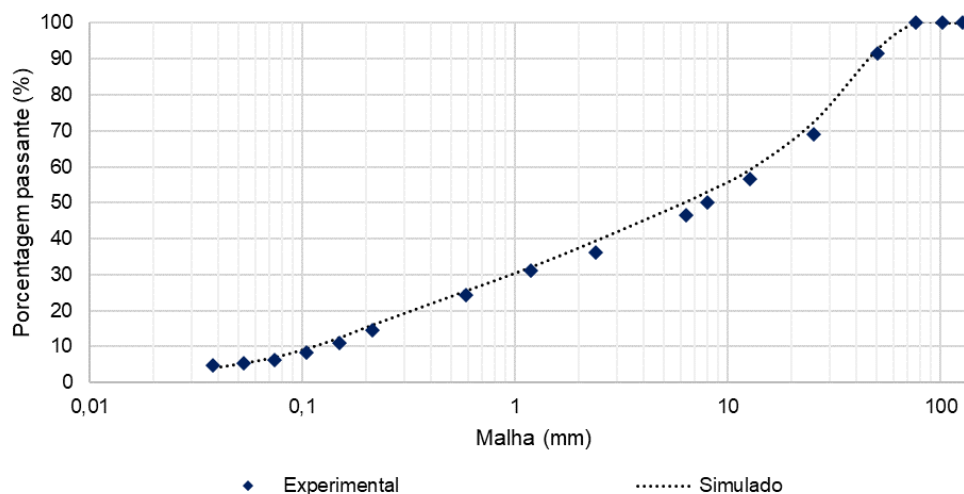


Figura 43 - Distribuição granulométrica do produto combinado (granulado + finos) experimental e simulado para o caso base.



Observa-se boa concordância das curvas experimentais e simuladas, indicando que o modelo é representativo das operações que compõem o processo de beneficiamento da bauxita na usina de Juruti.

7.2 IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS OPERACIONAIS PARA AUMENTO DE CAPACIDADE

Com o objetivo de avaliar cenários de aumento potencial de produção da usina de beneficiamento de Juruti, foram realizadas simulações de operação de equipamentos de processo e analisados os respectivos resultados no circuito integrado.

Para tal foi utilizado o modelo calibrado proveniente da amostragem realizada no circuito industrial de beneficiamento de bauxita para as operações unitárias lavagem, rebitagem, peneiramento e classificação, utilizando-se o simulador JKSimMet.

7.2.1 Premissas das simulações

As características físicas da bauxita alimentada à usina de Juruti são determinantes do desempenho do processo. Neste contexto, variações de características físicas na alimentação da usina resultam, necessariamente, em variações de desempenho, tais como recuperação mássica global e remoção de contaminantes (fração passante em 0,037 mm).

Uma das formas de se atenuar tais variações seria, por exemplo, a homogeneização em pilhas de alimentação da usina. Como a usina de Juruti é alimentada com minério diretamente da mina, o desempenho da usina varia significativamente dentro de um mesmo dia. É comum, portanto a alimentação variar entre *blends* de diferentes tipos de bauxitas encontrados na mina de Juruti, tais como bauxitas maciças, friável, com maior ou menor tenacidade, argilosa, sacaroilal, nodular. Cada um destes tipos de bauxita tem tenacidade própria, gerando assim distribuições granulométricas diferentes ao passarem pelas etapas de britagem primária e secundária. A quantidade de água utilizada para fluidizar cada um destes tipos entre a britagem primária e alimentação da usina é também diferente, gerando umidades distintas na alimentação da usina.

Diante dos aspectos indicados acima, se faz necessário realizar algumas considerações e definir premissas para os cenários de simulações. Tais premissas se referem a tópicos como recuperação mássica, distribuição granulométrica e umidade da alimentação da usina.

Um ponto adicional abordado foi a eficiência de peneiramento. A seguir são apresentadas tais discussões e premissas.

7.2.1.1 Recuperação

A recuperação mássica da bauxita lavada em Juruti está diretamente relacionada às características granulométricas da alimentação da usina. Como o rejeito consiste em um fluxo único gerado no processamento em ciclones, de maneira geral, quanto mais grossa a distribuição granulométrica de alimentação da usina, menor a participação em massa para as etapas de classificação em ciclones e, portanto, menor a vazão de rejeito, o que por sua vez resulta em maior recuperação mássica global.

A recuperação mássica é calculada a partir das indicações de balanças integradoras instaladas nos transportadores de correia da alimentação da usina, uma por linha, e nas correias de produto final, quais sejam, uma no transportador de correia de produto granulado, outra no de produto fino e outra no de produto combinado (granulados + finos). Esta última, permite redundância no cálculo da recuperação mássica. Para avaliar a variação dos resultados, foram analisados resultados de recuperação mássica de 388 dias de operação anteriores à amostragem, bem como as partições de produto granulado e fino. As Figuras 44 e 45 apresentam os referidos dados em série temporal da recuperação mássica e partição, respectivamente.

Figura 44 - Série temporal dos resultados de recuperação mássica (resultado diário).

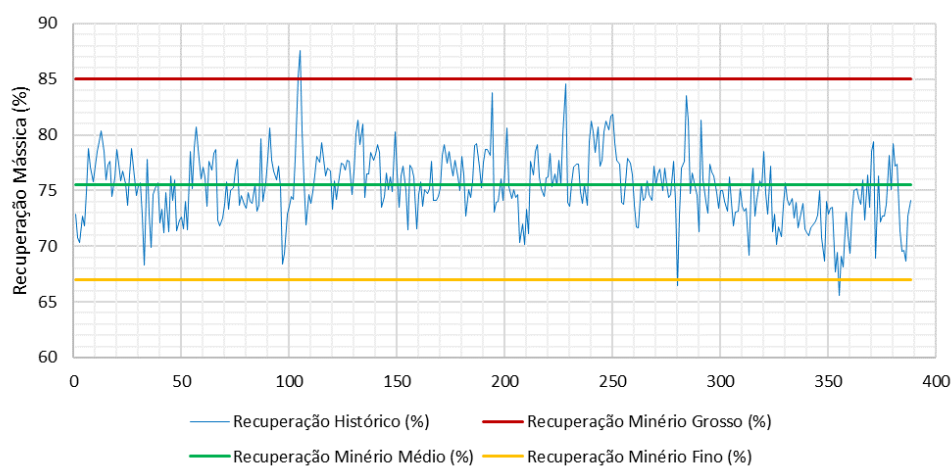
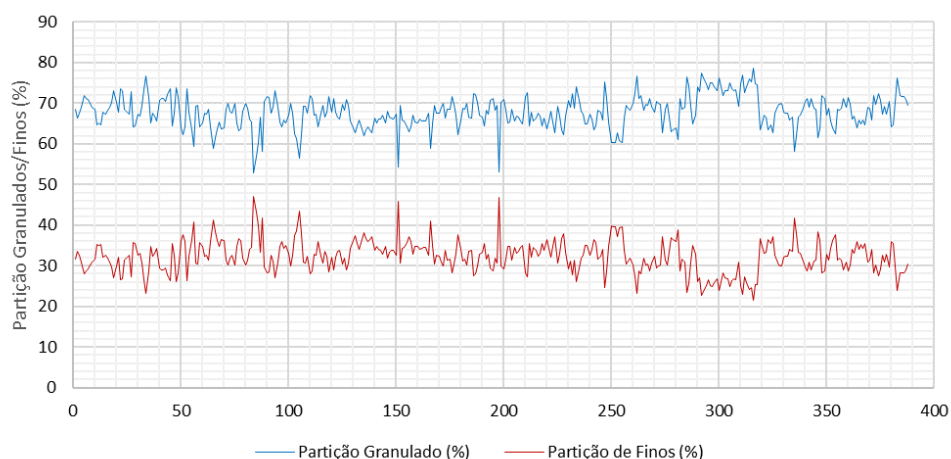


Figura 45 - Série temporal dos resultados de partição do produto final (resultado diário).

A Tabela 27 apresenta estatísticas descritivas para as três variáveis mencionadas.

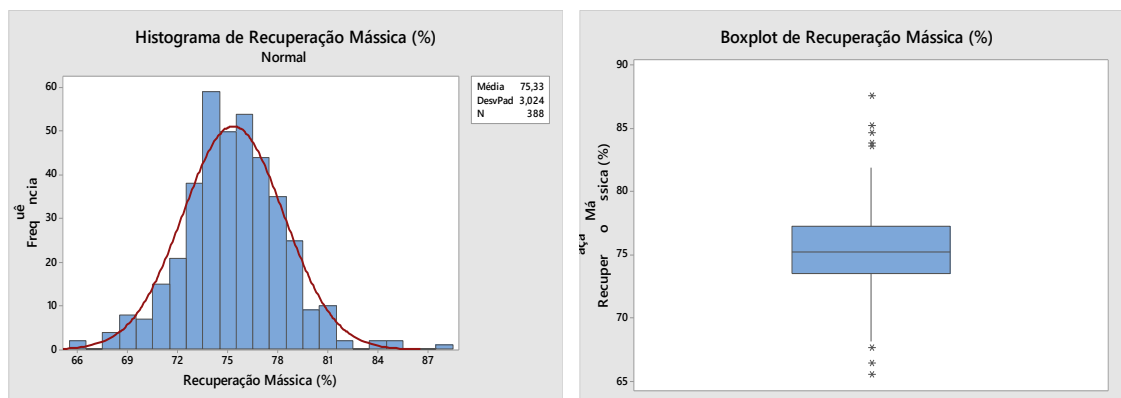
Tabela 27 - Estatística descritiva para os dados históricos de recuperação mássica da usina e partição do produto final entre granulados e finos.

Estatística Descritiva	Recuperação Mássica (%)	Partição de Granulados (%)	Partição de Finos (%)
Média	75,33	67,8	32,2
Mediana	75,21	67,75	32,25
Variância	9,14	15,71	15,71
Desvio padrão	3,02	3,96	3,96
Mínimo	65,57	52,87	21,46
Máximo	87,56	78,54	47,13
Amplitude	21,99	25,67	25,67
Amplitude interquartil	75,33	67,8	32,2
Assimetria	0,14	-0,27	0,27
Curtose	0,97	0,92	0,92

A média global obtida para a recuperação mássica foi igual a 75,3%, quase idêntica à mediana, esta última igual a 75,2%. O desvio padrão foi igual a 3,02. A Figura 46 apresenta o histograma de frequência e o *box plot* obtidos. Nota-se

uma distribuição próxima à normal com leve concentração de dados na região interquartilica.

Figura 46 - Histograma e *box plot* para os dados históricos da recuperação da usina.



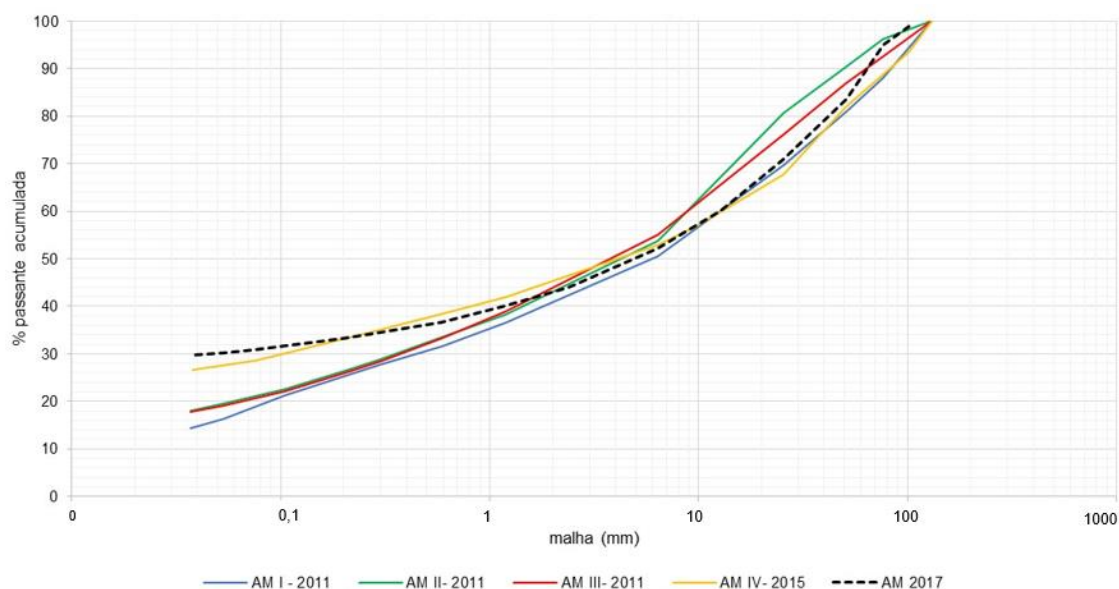
Ainda, a média de partição do granulado no produto final foi igual a 67,8%, com desvio padrão de 3,96.

De acordo com o projeto original da usina, a recuperação média nominal seria de 75,0%. No entanto, conforme observado este valor pode variar de um mínimo de 65,6% a um máximo de 87,6%. Por acarretar variações significativas de recuperação mássica na usina e, portanto, de variações de vazão nas diversas etapas do processo, é de suma importância que as simulações estabeleçam relações entre as características do minério alimentado e as condições de operação, ou mesmo limitações de capacidade dos equipamentos de processo em cenários de aumento de capacidade de processamento da usina.

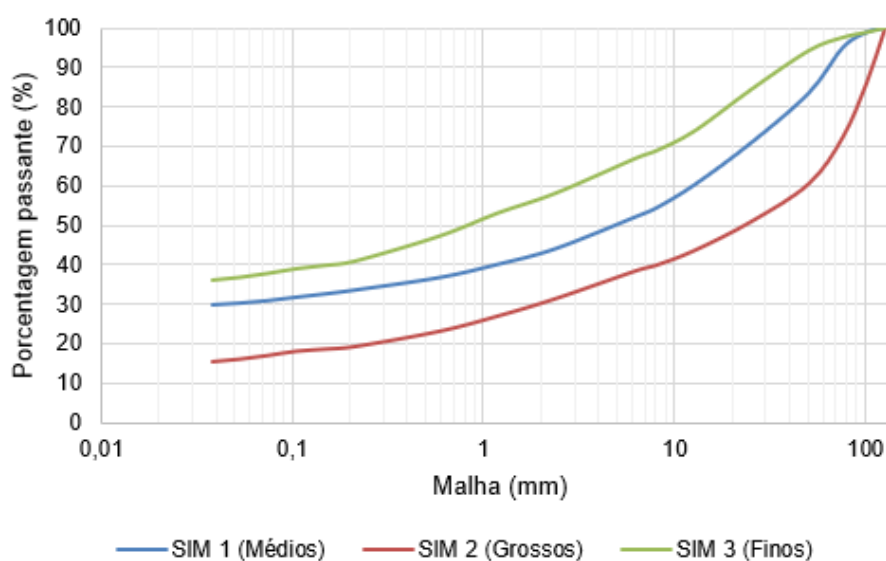
Por ser determinante no desempenho e nível de produção da usina, a distribuição granulométrica de alimentação foi avaliada em maior detalhe. Para tanto, foram analisados os dados de campanhas de amostragem já realizadas no fluxo de alimentação da usina, conforme apresentado na Figura 47. Importante reforçar que até maio de 2019 não existia um sistema de amostragem no fluxo de alimentação da usina que permitisse amostragem de forma rotineira. Devido a este motivo, o histórico é composto apenas por campanhas de

amostragens especiais realizadas por meio da coleta de material no transportador de correia que alimenta a usina de beneficiamento.

Figura 47 - Histórico de distribuição granulométrica da alimentação da usina.



A partir do comparativo dos dados históricos foi definida uma faixa de variação de granulometria, conforme definida por curvas que representam as distribuições mais finas e a mais grossas encontradas na alimentação da operação industrial de Juruti, além da curva que representa uma distribuição média. A alimentação analisada no dia da amostragem que fundamentou a calibração do modelo matemático apresentado no presente trabalho foi rotulada por “médios”, enquanto os termos “grossos” e “finos” foram atribuídos às curvas que definiram a envoltória granulométrica considerada, sendo considerados os extremos de granulometria mais grossa e mais fina, respectivamente. A Figura 48 e a Tabela 28 apresentam as distribuições granulométricas que compõem cada uma destas curvas, adotadas nas simulações.

Figura 48 - Distribuição granulométrica para o minério fino, médio e grosso.**Tabela 28** - Distribuição granulométrica para o minério fino, médio e grosso.

Malha (mm)	Minério Médio	Minério Grosso	Minério Fino
127,0	100	100	100
101,6	98,9	86,1	98,9
76,2	95,0	72,3	97,6
50,8	83,6	60,6	94,3
25,4	71,0	51,0	84,5
12,7	60,2	43,6	73,8
8,0	54,3	39,8	68,8
6,35	52,2	38,5	67,0
2,38	44,0	31,4	58,0
1,19	40,0	27,0	53,0
0,59	36,7	23,2	47,2
0,212	33,5	19,3	40,8
0,15	32,5	18,6	39,7
0,105	31,7	18,1	38,9
0,074	30,8	17,0	37,6
0,053	30,2	16,1	36,7
0,037	29,7	15,4	36,0

7.2.1.2 Eficiências de peneiramento

Todas as eficiências de peneiramento observadas nos respectivos casos base foram consideradas bastante elevadas. Assim, no caso base da linha 1, a eficiência foi de 95,7% para o peneiramento primário e 98,2% para o secundário, enquanto no caso base da linha 2 a eficiência foi de 94,7% no peneiramento primário e 98,1% no secundário. Com aumentos de produção é provável que os valores de eficiência sejam menores.

O principal critério para estimar valores de eficiência em cenários de elevação de vazões de alimentação em peneiras foi o cálculo das respectivas áreas necessárias de peneiramento, tendo por base o manual do fabricante (Metso). Reduções das eficiências de peneiramento resultariam em diminuição da vazão de sólidos para as etapas de classificação em ciclones. Já eficiências maiores resultariam em vazões de alimentação maiores, o que demandaria número maior de ciclones em operação. Desta forma, para cada distribuição granulométrica de alimentação da usina (seção 7.2.1.1), duas condições foram analisadas:

- i. Simulações com alta eficiência de peneiramento, observada na amostragem;
- ii. Simulações com eficiência reduzida de peneiramento.

7.2.1.3 Cenários simulados

Diante das considerações apresentadas nas sessões anteriores, definiu-se o conjunto de simulações para analisar a capacidade dos equipamentos instalados na usina de Juruti para cenários de aumentos de produção.

A Tabela 29 sumariza as seis condições adotadas nas simulações. A vazão de alimentação de sólidos simulada foi estipulada em 488 t/h, ou seja, um acréscimo de 7,7% em relação ao caso base, cuja vazão de alimentação foi 453 t/h.

Importante reforçar que nas seis simulações indicadas na Tabela 29 considerou-se a operação da ciclonagem terciária de superfinos.

Tabela 29 - Cenários selecionados para simulação.

Cenário	Vazão de Alimentação (tph B.S.)	Distribuição Granulométrica	Eficiência de Peneiramento
SIM 1A	488	Médios	Reduzida
SIM 1B	488	Médios	Amostragem
SIM 2A	488	Grossos	Reduzida
SIM 2B	488	Grossos	Amostragem
SIM 3A	488	Finos	Reduzida
SIM 3B	488	Finos	Amostragem

As simulações foram realizadas considerando o caso base da linha 1 como referência. Para cada uma das seis simulações realizadas é apresentado o fluxograma obtido contendo o sumário do respectivo balanço de massa, em termos de vazões de sólidos, vazões volumétricas de polpa, recuperações mássicas, porcentagens de sólidos, P_{80} , e porcentagens passante em 0,037 mm, incluindo a vazão de rebitagem especificamente da linha 1, conforme apresentado na Figura 49 para o cenário SIM 1A (granulometria média e eficiência de peneiramento reduzida).

O detalhamento dos resultados do balanço de massa das simulações também foram obtidos e são apresentados, conforme a Tabela 30 que reporta os resultados do cenário SIM 1 A para as etapas de lavagem, rebitagem, peneiramento da rebitagem, primário e secundário.

Figura 49 - Fluxograma SIM 1A.

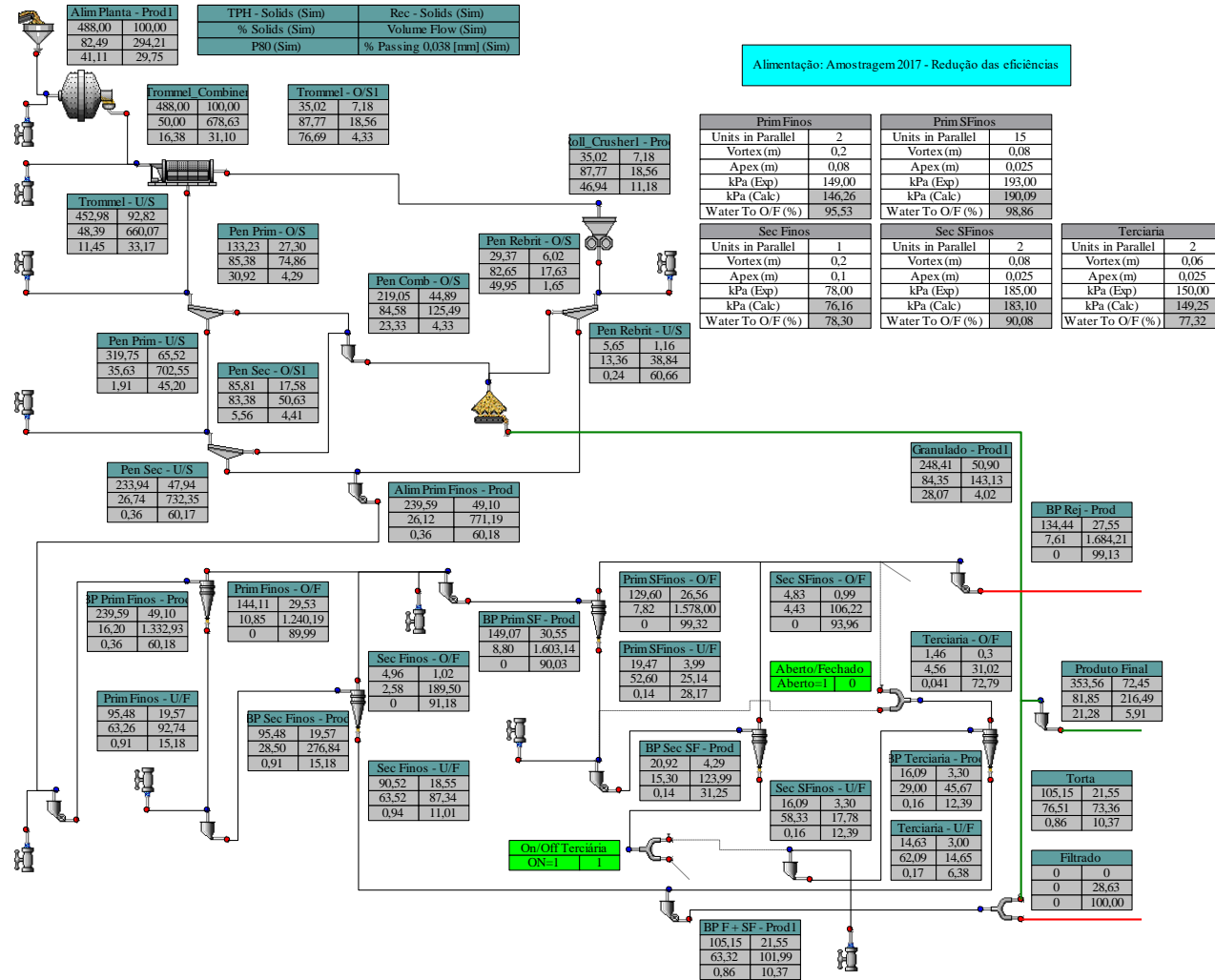


Tabela 30 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento da rebitagem, primário e secundário (SIM 1A).

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebitador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	488,0	488,0	35,0	453,0	453,0	133,2	319,7	35,0	35,0	35,0	29,4	5,6	319,7	85,8	233,9	248,4
Densidade dos Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	103,6	488,0	4,9	483	600	22,8	578	4,9	4,9	42,8	6,2	36,6	658	17,1	641	46,1
Porcentagem de Sólidos	82,5	50,0	87,8	48,4	43,0	85,4	35,6	87,8	87,8	45,0	82,7	13,4	32,7	83,4	26,7	84,3
Densidade da Polpa (t/m³)	2,01	1,44	2,15	1,42	1,36	2,08	1,28	2,15	2,15	1,38	2,01	1,09	1,25	2,03	1,19	2,06
Vazão de Polpa (m³/h)	294	679	18,6	660	777	74,9	703	18,6	18,6	56,5	17,6	38,8	783	50,6	732	143
P ₈₀ (mm)	41,1	16,4	76,7	11,5	11,5	30,9	1,91	76,7	46,9	46,9	50,0	0,24	1,91	5,6	0,360	28,1
Malha (mm)		% Passante														
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	98,870	99,6	99,5	100	100	100	100	99,5	100	100	100	100	100	100	100	100
76,2	95,021	98,3	79,1	100	100,0	100,0	100	79,1	99,4	99,4	99,6	100	100	100	100	100
50,8	83,587	93,7	28,2	98,7	98,7	95,6	100	28,2	84,2	84,2	81,1	100	100	100	100	95,4
25,40	70,966	85,9	13,6	91,5	91,5	70,9	100,0	13,6	42,8	42,8	31,9	100	100	100	100	76,4
12,70	60,154	76,2	11,0	81,3	81,3	36,5	99,9	11,0	28,8	28,8	15,1	100,0	99,9	99,7	100	55,8
8,00	54,255	69,9	9,9	74,5	74,5	20,2	97,2	9,9	25,0	25,0	10,6	100,0	97,2	89,5	100	43,0
6,350	52,184	67,7	9,6	72,2	72,2	14,5	96,2	9,6	23,7	23,7	9,0	100,0	96,2	85,9	100	38,5
2,380	43,965	57,1	8,0	60,9	60,9	8,6	82,8	8,0	20,2	20,2	4,9	100,0	82,8	36,5	99,7	17,8
1,190	40,022	50,6	7,1	54,0	54,0	7,2	73,5	7,1	18,1	18,1	2,34	99,8	73,5	14,6	95,1	9,2
0,590	36,675	44,6	6,2	47,5	47,5	6,2	64,8	6,2	16,2	16,2	1,65	91,8	64,8	8,2	85,5	6,4
0,212	33,487	38,0	5,3	40,5	40,5	5,3	55,2	5,3	14,0	14,0	1,65	78,0	55,2	5,7	73,4	5,0
0,150	32,540	36,2	5,0	38,6	38,6	5,0	52,6	5,0	13,3	13,3	1,65	73,9	52,6	5,3	69,9	4,7
0,105	31,684	34,5	4,8	36,8	36,8	4,8	50,2	4,8	12,7	12,7	1,65	70,0	50,2	5,0	66,8	4,5
0,074	30,791	33,0	4,6	35,2	35,2	4,6	48,0	4,6	12,1	12,1	1,65	66,4	48,0	4,7	63,9	4,3
0,053	30,169	31,9	4,4	34,0	34,0	4,4	46,4	4,4	11,6	11,6	1,65	63,3	46,4	4,5	61,7	4,1
0,037	29,750	31,1	4,3	33,2	33,2	4,3	45,2	4,3	11,2	11,2	1,65	60,7	45,2	4,4	60,2	4,0

Analogamente, a Tabela 31 apresenta o detalhamento dos resultados do balanço de massa da simulação SIM 1 A, conforme obtidos para as etapas de classificação em ciclones.

Tabela 31 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e primária e secundária de superfinos (SIM 1A).

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Terciária de Superfinos			Rejeito	Produto Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	239,6	95,5	144,1	95,5	90,5	5,0	149,1	19,5	129,6	20,9	16,1	4,8	16,1	14,6	1,5	134,4	105,1
Densidade dos Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	1239	55,4	1184	239	52	187,6	1544	17,5	1527	115	11,5	104,3	39,4	8,9	30,5	1631,7	61
Porcentagem de Sólidos	16,2	63,3	10,9	28,5	63,5	2,6	8,8	52,6	7,8	15,3	58,3	4,4	29,0	62,1	4,6	7,6	63,3
Densidade da Polpa (t/m ³)	1,11	1,63	1,07	1,21	1,63	1,02	1,06	1,47	1,05	1,10	1,55	1,03	1,21	1,61	1,03	1,05	1,63
Vazão de Polpa (m ³ /h)	1333	92,7	1240	276,8	87	189,5	1603,1	25,1	1578,0	124,0	17,8	106,2	45,7	14,7	31,0	1684,2	102
P ₈₀ (mm)	0,35	0,91	<0,01	0,914	0,945	<0,010	0,000	0,144	<0,010	0,138	0,159	<0,010	0,159	0,167	0,041	<0,010	0,858
Malha (mm)	% Passante																
6,350	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	99,7	99,4	100	99,4	99,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,4
1,190	95,2	88,0	100	88,0	87,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89,1
0,590	85,7	64,0	100	64,0	62,1	100	100	99,9	100	99,9	99,9	100	99,9	99,9	100	100	67,3
0,212	73,5	35,3	98,8	35,3	31,8	99,9	98,9	91,4	100	92,0	89,6	100	89,6	88,5	100	100	39,7
0,150	70,0	28,5	97,5	28,5	24,6	99,6	97,6	81,5	100	82,8	77,6	100	77,6	75,4	100	100	31,7
0,105	66,9	23,3	95,7	23,3	19,2	98,4	95,8	68,1	100	70,3	61,4	100	61,4	57,6	100	100	24,5
0,074	63,9	19,2	93,5	19,2	15,0	96,1	93,6	51,5	99,95	54,8	41,2	100	41,2	35,4	99,6	100	17,9
0,053	61,8	16,7	91,6	16,7	12,5	93,5	91,7	37,8	99,76	41,8	24,5	99,2	24,5	17,6	94,7	99,7	13,2
0,037	60,2	15,2	90,0	15,2	11,0	91,2	90,0	28,2	99,32	31,3	12,4	94,0	12,4	6,4	72,8	99,1	10,4

Os índices de eficiência foram calculados para cada cenário simulado. A Tabela 32 apresenta os resultados para o cenário SIM 1A, granulometria média e eficiência do peneiramento reduzida.

abela 32 - Índices de eficiência para a simulação SIM 1A.

Variáveis	Fluxo	<i>Trommel</i>	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneiramento da Rebritagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	50,0	43,0	32,7	45,0	16,2	28,5	8,8	15,3	29,0
	Grossos	87,8	85,4	83,4	82,7	63,3	63,5	52,6	58,3	62,1
Partição para os Grossos (%)	Finos	48,4	35,6	26,7	13,4	10,9	2,6	7,8	4,4	4,6
	Polpa (vol)	2,7	9,6	6,5	31,2	7,0	31,5	1,6	14,3	32,1
	Sólidos	7,2	29,4	26,8	83,9	39,9	94,8	13,1	76,9	91,0
	Água	1,0	3,8	2,6	14,4	4,5	21,7	1,1	9,9	22,7
<i>d</i> _{50C} (mm)		54,00	7,60	1,50	1,00	0,081	<0,010	0,029	0,030	0,034
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de -400# para os grossos)	76,2 mm	94,4%	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	92,0%	-	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	94,7%	89,1%	-	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	89,9%	31,2%	95,9%	69,5%	46,8%

Os fluxogramas e as tabelas com o detalhamento dos balanços de massa e metalúrgicos, e os índices de eficiência para as demais cinco simulações dos cenários indicados estão apresentadas no Apêndice A.

7.2.2 Resultados das simulações dos cenários propostos

Com o conjunto de simulações proposto foi possível avaliar o impacto da característica do material alimentado à planta, em termos de distribuição granulométrica, e da eficiência do peneiramento nas eficiências dos processos que compõem a rota de beneficiamento da bauxita na usina de Juruti.

A Figura 50 e 51 apresentam as distribuições granulométricas do produto granulado, para as simulações com eficiência de peneiramento reduzida e com eficiência da amostragem, respectivamente.

Figura 50 - Distribuição granulométrica do produto granulado para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento reduzida.

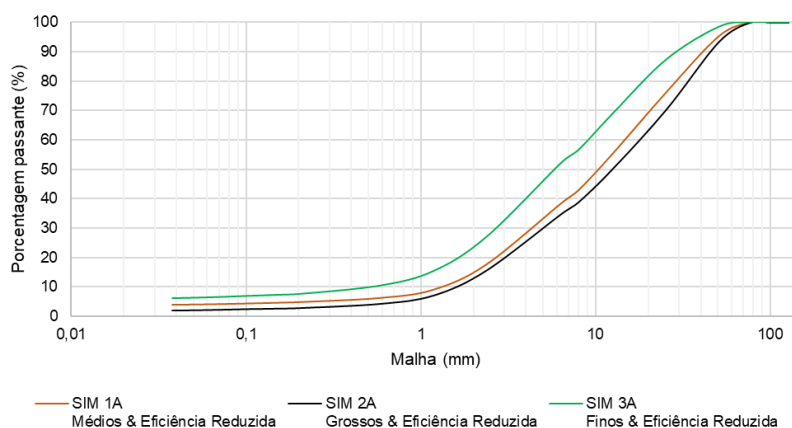
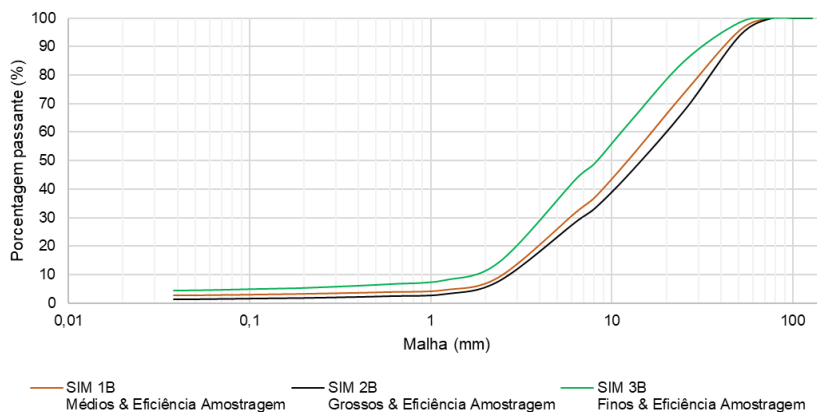


Figura 51 - Distribuição granulométrica do produto granulado para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento da amostragem.



Observa-se que nas simulações com eficiência reduzida há maior presença de contaminantes no produto granulado se comparado às simulações com eficiência tal qual a obtida na amostragem, isto é, material passante em 0,037 mm, conforme apresentado na Tabela 33. Também é possível observar o impacto da característica do material no percentual de contaminantes, neste caso os maiores valores foram obtidos para o minério com granulometria caracterizada como fina.

Tabela 33 - Distribuição granulométrica do produto granulado para os cenários simulados.

Malha (mm)	SIM 1A Médios & Eficiência Reduzida	SIM 1B Médios & Eficiência Amostragem	SIM 2A Grossos & Eficiência Reduzida	SIM 2B Grossos & Eficiência Amostragem	SIM 3A Finos & Eficiência Reduzida	SIM 3B Finos & Eficiência Amostragem
127	100	100	100	100	100	100
101,6	100	100	100	100	100	100
76,2	99,98	100	99,94	100	99,99	99,95
50,8	95,43	95,81	93,43	93,99	98,47	98,51
25,40	76,36	74,24	70,37	68,08	87,37	85,28
12,70	55,82	51,28	50,54	46,04	69,32	63,96
8,00	43,01	37,03	38,89	33,18	56,63	49,00
6,350	38,52	32,03	34,80	28,66	52,17	43,74
2,380	17,78	9,18	15,68	7,78	27,08	14,44
1,190	9,21	4,60	7,19	3,17	15,51	8,07
0,590	6,37	3,85	4,34	2,43	10,53	6,67
0,212	5,00	3,27	2,93	1,83	7,75	5,41
0,150	4,71	3,11	2,71	1,71	7,33	5,16
0,105	4,48	2,97	2,53	1,61	7,00	4,95
0,074	4,27	2,84	2,32	1,48	6,65	4,73
0,053	4,12	2,75	2,16	1,38	6,39	4,55
0,037	4,02	2,68	2,04	1,30	6,19	4,41

A Figura 52 e 53 apresentam as distribuições granulométricas do produto fino, para as simulações com eficiência de peneiramento reduzida e com eficiência da amostragem, respectivamente. A eficiência do peneiramento impacta diretamente no circuito de finos, uma vez que a alimentação deste circuito é proveniente do *undersize* do peneiramento de intermediários.

Figura 52 - Distribuição granulométrica do produto fino para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento reduzida.

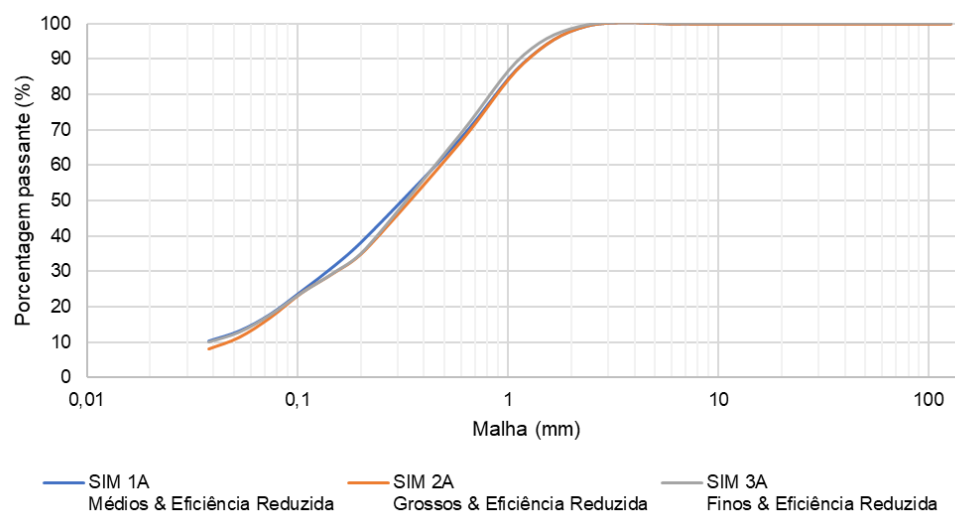
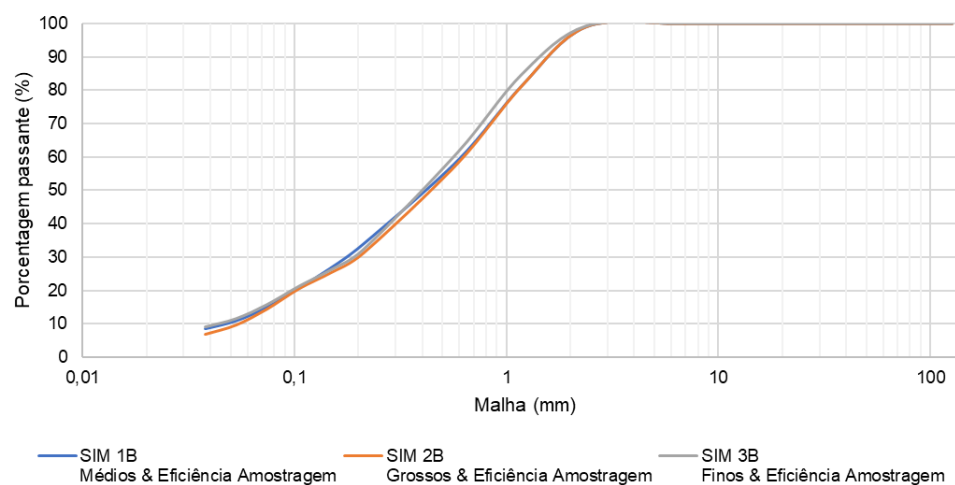


Figura 53 - Distribuição granulométrica do produto fino para minério grosso, médio e fino com eficiência de peneiramento da amostragem.



Observa-se que nas simulações com eficiência reduzida há maior presença de contaminantes no produto fino se comparado às simulações com eficiência tal qual a obtida na amostragem, isto é, material passante em 0,037 mm, conforme apresentado na Tabela 34. O percentual de contaminantes no produto fino também aumenta com a característica do material, ou seja, quanto mais fino maior a presença de contaminantes. Importante ressaltar que, para o minério com granulometria média e eficiência reduzida, o percentual de

contaminantes se apresenta em um patamar similar ao do minério fino, demonstrando o significativo impacto da eficiência do peneiramento da operação do circuito de ciclonação.

Tabela 34 - Distribuição granulométrica do produto fino para os cenários simulados.

Malha (mm)	SIM 1A Médios & Eficiência Reduzida	SIM 1B Médios & Eficiência Amostragem	SIM 2A Grossos & Eficiência Reduzida	SIM 2B Grossos & Eficiência Amostragem	SIM 3A Finos & Eficiência Reduzida	SIM 3B Finos & Eficiência Amostragem
127	100	100	100	100	100	100
101,6	100	100	100	100	100	100
76,2	100	100	100	100	100	100
50,8	100	100	100	100	100	100
25,40	100	100	100	100	100	100
12,70	100	100	100	100	100	100
8,00	100	100	100	100	100	100
6,350	100	100	100	100	100	100
2,380	99,41	99,02	99,43	99,07	99,56	99,27
1,190	89,06	81,53	88,97	81,53	91,07	84,95
0,590	67,32	58,91	66,36	58,12	68,42	61,41
0,212	39,66	33,89	36,39	31,18	36,44	32,33
0,150	31,66	26,85	29,79	25,40	29,65	26,33
0,105	24,52	20,60	24,10	20,46	23,89	21,27
0,074	17,86	14,80	16,97	14,27	17,56	15,73
0,053	13,22	10,79	11,50	9,55	12,76	11,56
0,037	10,37	8,41	8,22	6,77	9,96	9,10

A Tabela 35 apresenta as eficiências de cada etapa do processo para os seis diferentes cenários simulados. Observa-se que as eficiências de cada etapa, calculadas com base na malha de referência de cada referida etapa, variam de acordo com a característica do material alimentado à planta, bem como com a eficiência do peneiramento, corroborando com as variações nos percentuais de contaminantes no produto granulado e finos apresentadas nos gráficos e tabelas apresentados acima. A ciclonação secundária de finos (ciclones de 26") e a terciária de superfinos (ciclones de 6") apresentaram as

menores eficiências em todos os cenários, ressalta-se que no caso base estas também apresentaram baixa eficiência, indicando necessidade de otimização.

Tabela 35 - Eficiência das etapas do processo de beneficiamento.

Etapa do Processo	Malha de Referência (mm)	Caso Base	SIM 1A Médios & Eficiência Reduzida	SIM 1B Médios & Eficiência Amostragem	SIM 2A Grossos & Eficiência Reduzida	SIM 2B Grossos & Eficiência Amostragem	SIM 3A Finos & Eficiência Reduzida	SIM 3B Finos & Eficiência Amostragem
<i>Trommel</i>	76,2	95,23%	94,40%	95,16%	91,83%	92,41%	97,63%	98,39%
Peneiramento de Grossos	8,00	95,73%	92,02%	95,66%	91,11%	95,26%	93,19%	96,37%
Peneiramento de Intermediários	1,20	98,14%	94,66%	98,11%	93,27%	97,97%	94,41%	98,10%
Peneiramento da Rebritagem	1,20	94,39%	89,06%	94,37%	89,64%	94,65%	88,87%	94,18%
Primária de Finos	0,037	90,13%	89,95%	90,31%	85,91%	86,37%	88,96%	89,27%
Secundária de Finos	0,037	32,29%	31,23%	32,97%	24,12%	25,63%	32,52%	27,72%
Primária de Superfinos	0,037	95,90%	95,91%	95,92%	91,55%	91,46%	95,33%	95,27%
Secundária de Superfinos	0,037	64,29%	69,45%	71,77%	68,28%	69,73%	72,79%	75,45%
Terciária de Superfinos	0,037	-	46,80%	44,64%	41,75%	41,49%	40,37%	55,42%

Com base nestes resultados foi possível avaliar quais seriam as intervenções requeridas em cada etapa do processo para garantir o atingimento do desempenho de processo estipulado em termos de remoção de contaminantes no produto granulado e fino, o que impacta diretamente nos resultados de qualidade do produto. A seguir são apresentadas as intervenções sugeridas, fundamentadas pelos resultados aqui apresentados.

7.2.3 Análise de necessidade de intervenção nos equipamentos para aumento de produção

Após a realização do conjunto de simulações variando a distribuição granulométrica da alimentação da planta e a eficiência do peneiramento, foi possível avaliar o impacto destas variáveis no desempenho do processo. Com os resultados das simulações foi possível avaliar a necessidade de intervenção nos equipamentos para atender às respectivas condições de operação simuladas, conforme apresentado a seguir.

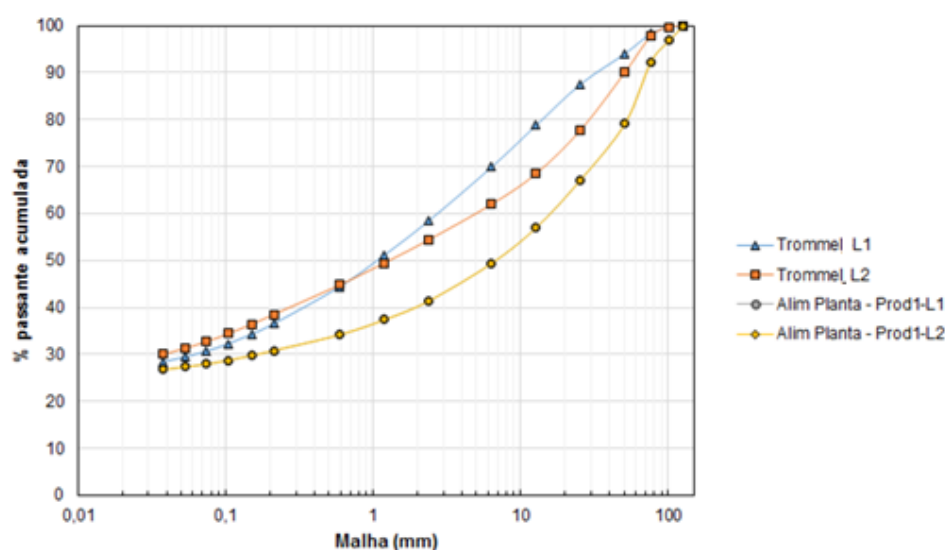
7.2.3.1 Lavadores rotativos com *trommel*

Conforme já mencionado neste documento, cada uma das duas linhas de processo da usina de Juruti possui um único lavador rotativo com *trommel*.

A avaliação da degradação do material alimentado aos lavadores foi realizada a partir de adaptações dos modelos de transporte de polpa e balanço populacional para moinhos autógenos. Contudo, o modelo não considerou reduções nas eficiências de lavagem devidas à redução do tempo de residência relacionada ao aumento de vazão de sólidos na alimentação. Assim, este é considerado um ponto de atenção significativo para definição de aumentos de produção mantendo-se apenas os atuais equipamentos em operação.

Conforme observado nos balanços de massa da linha 1 e linha 2, as granulometrias de alimentação nos períodos das amostragens foram significativamente diferentes para as duas linhas. Consequentemente, os resultados de recuperação mássica divergiram, de 71,7% no período de amostragem da linha 1 para 77,2% no período da amostragem da linha 2. Apesar dos índices de eficiência das peneiras e ciclones poderem ser utilizadas para comparar ambas as linhas, os níveis de degradação dos lavadores necessitam ser observados para uma curva granulométrica padrão de alimentação. Para as simulações foi calculada uma distribuição granulométrica média de alimentação dos lavadores, a partir dos resultados obtidos para as amostragens nas duas linhas. A Figura 54 apresenta os resultados obtidos.

Figura 54 - Comparação da degradação entre o lavador da linha 1 e linha 2.



Observa-se na Figura 54 que o lavador da linha 2 produziu mais material passante em 0,037 mm se comparado à linha 1 (1,4% na linha 1 e 3,7% na linha 2), porém as partículas grossas foram menos fragmentadas (retido em 25,4 mm na linha 1 igual a 12%% e 22% na linha 2), os valores podem melhor serem observados na Tabela 36.

Tabela 36 - Comparação da degradação entre o lavador da linha 1 e linha 2.

Malha (mm)	Linha 1				Linha 2			
	Alimentação L1		Produto do <i>trommel</i>		Alimentação L2		Produto do <i>trommel</i>	
	ALM	Retido Acm.	<i>Trommel</i>	Retido Acm.	ALM	Retido Acm.	<i>Trommel</i>	Retido Acm.
127	100	-	100	-	100	-	100	-
101,6	99	1	100	0	93	8	100	1
76,2	95,02	5	98	2	87	14	97	3
50,8	83,59	16	94	6	69,7	30	88	12
25,4	70,97	29	86	12	59,1	41	75	22
12,7	60,15	40	76	17	50,3	50	66	22
8	54,25	46	70	16	45,3	55	62	14
6,35	52,18	48	68	8	43,5	57	60	7
2,38	43,96	56	57,47	13	35,9	64	51,7	10
1,19	40,02	60	50,93	17	31,8	68	46,3	14
0,59	36,67	63	44,81	13	28,9	71	41,3	10
0,212	33,49	67	38,16	13	25,2	75	34	12
0,15	32,54	67	36,3	9	23,8	76	31,4	10
0,105	31,68	68	34,64	4	22,6	77	29,1	5
0,074	30,79	69	33,1	3	21,9	78	27,3	4
0,053	30,17	70	31,97	3	21,4	79	25,9	3
0,037	29,75	70	31,14	2	20,5	80	24,2	3

No período da campanha de amostragem, a condição dos revestimentos do lavador da linha 2 era melhor do que da linha 1, conforme apresentado na Figura 55 e 56. Estas diferenças foram aqui associadas às respectivas combinações entre as condições operacionais dos equipamentos e características do minério alimentado à cada linha durante o período de amostragem.

Figura 55 - Revestimento interno do lavador da linha 1.



Fonte: acervo do autor.

Figura 56 - Revestimento interno do lavador da linha 2.



Fonte: acervo do autor.

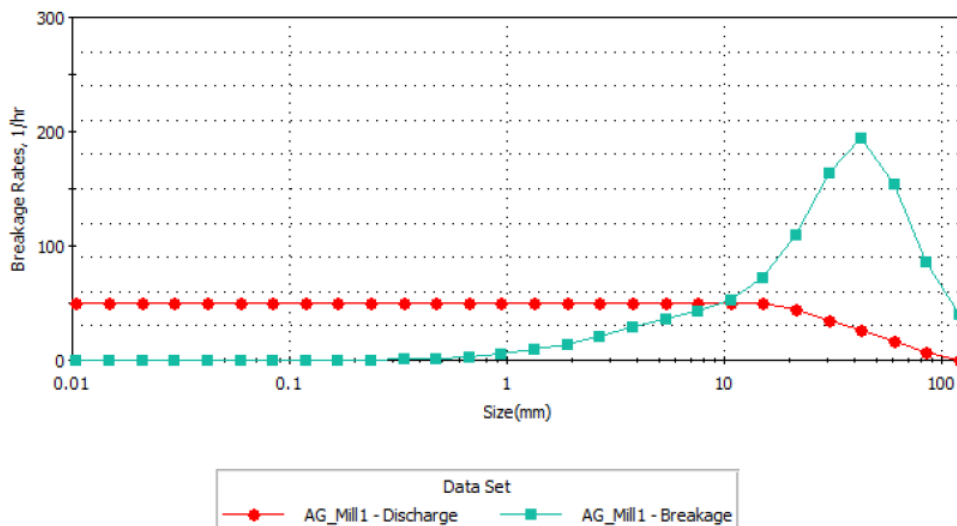
Parâmetros de fragmentação por impacto e abrasão de bauxitas foram extraídos do banco de dados da HDA Serviços S/S Ltda (informação pessoal)⁸ e utilizados na modelagem e nas simulações dos lavadores. A Figura 57 apresenta as funções de descarga e taxa de quebra calibradas para o lavador da linha 1.

Observa-se que partículas maiores que 4" (102 mm) têm fragmentação reduzida, tendendo a ficarem retidas no lavador, podendo resultar em graus

⁸ Comunicação pessoal recebida pelo e-mail monica.paiva@alcoa.com em 14/12/2017.

elevados de enchimentos dos equipamentos e, conseqüentemente, em aumentos de potência necessária para operação.

Figura 57 - Função descarga e taxas de quebra para o lavador da linha 1.



As distribuições granulométricas de alimentação e produto do lavador da linha 1 estão apresentadas na Figura 58 e Tabela 37.

Figura 58 - Curvas granulométricas da alimentação e produto do lavador para as simulações realizadas.

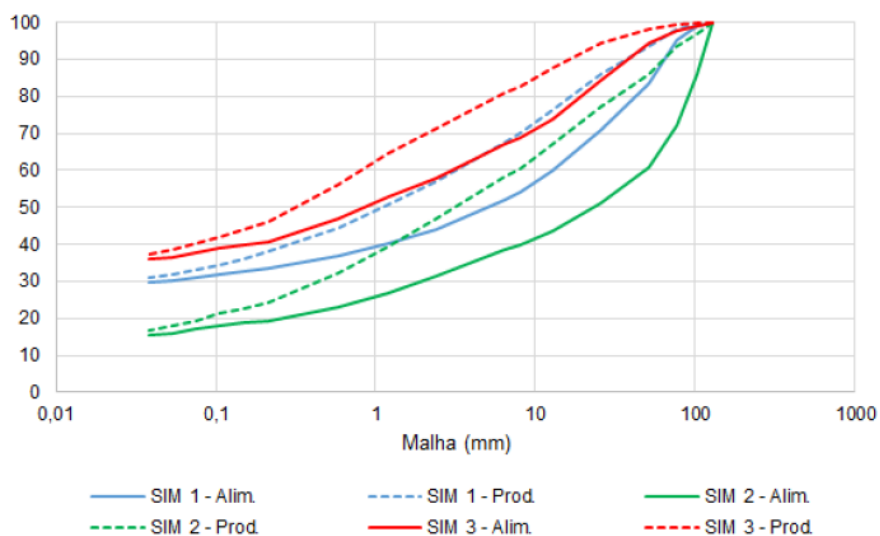


Tabela 37 - Distribuição granulométrica dos lavadores para as simulações realizadas.

Malha (mm)	SIM 1 - Médio		SIM 2 - Grossos		SIM 3 - Finos	
	Alimentação Scrubber	Produto Scrubber	Alimentação Scrubber	Produto Scrubber	Alimentação Scrubber	Produto Scrubber
127	100	100	100	100	100	100
101,6	98,9	99,6	86,1	97	98,9	99,8
76,2	95	98,3	72,3	93,4	97,6	99,5
50,8	83,6	93,7	60,6	86,1	94,3	98,3
25,4	71	85,9	51	77	84,5	94,5
12,7	60,2	76,2	43,6	67	73,8	87,7
8	54,3	69,9	39,8	60,4	68,8	82,8
6,4	52,2	67,7	38,5	58,1	67	81,1
2,4	44	57,1	31,4	46,8	58	71,3
1,19	40	50,6	27	39,4	53	64,4
0,59	36,7	44,6	23,2	32,3	47,2	56
0,212	33,5	38	19,3	24,3	40,8	45,9
0,15	32,5	36,2	18,6	22,6	39,7	43,8
0,105	31,7	34,5	18,1	21,2	38,9	42,1
0,074	30,8	33	17	19,4	37,6	40,2
0,053	30,2	31,9	16,1	17,9	26,7	38,6
0,037	29,7	31,1	15,4	16,9	36	37,5
-0,037 mm Gerado		1,3		1,4		1,5

Observa-se que a degradação foi maior para frações mais grossas. Embora não comprovado, tal fato foi atribuído a uma maior presença de corpos moedores autógenos dentro dos lavadores. As porcentagens retidas acumuladas em 3" (76 mm) nas cargas internas do lavador da linha 1 foram estimadas em 10%, 19% e 57% respectivamente para os minérios finos, médios e grossos. A geração de material menor do que 0,037 mm variou de 1,3 a 1,5 pontos percentuais, considerada baixa. Foram realizados cálculos de área necessária versus área instalada no *trommel* e os resultados estão apresentados na Tabela 38.

Observa-se que para minérios com granulometria mais grossa, a vazão de alimentação superaria a vazão de projeto original, que é 120 t/h em base úmida. Desta forma, aumentos de produção com minérios mais grossos sendo processados na usina indicam a necessidade de repotenciamento deste equipamento.

7.2.3.3 Peneira da Rebritagem

A peneira da rebritagem recebe fluxos de ambas as linhas. A Tabela 40 apresenta os cálculos de área necessárias e espessura da camada no primeiro *deck*, de abertura igual 25,4 mm, da peneira da rebritagem. As vazões obtidas no caso base e nas simulações foram dobradas, de modo a considerar as duas linhas da usina.

De acordo com a Tabela 40, a área existente do primeiro *deck* é maior do que a necessária para todas as simulações realizadas. Analogamente, as espessuras das camadas na descarga foram menores do que o máximo recomendados.

A Tabela 41 apresenta os cálculos análogos efetuados para o segundo *deck* da mesma peneira de rebritagem, neste caso com abertura de 1,2 mm.

Tabela 40 - Parâmetros da peneira da rebitagem para o primeiro *deck*.

Variável	Un	Caso Base	SIM 1A	SIM 1B	SIM 2A	SIM 2B	SIM 3A	SIM 3B
Vazão de sólidos	t/h	57,4	70,0	62,8	138,0	133,2	27,9	20,6
Densidade aparente	t/m ³	1,60	1,60	1,60	1,6	1,6	1,6	1,6
Vazão volumétrica de sólidos	m ³ /h	35,9	43,8	39,3	86,2	83,3	17,4	12,9
Abertura nominal	mm	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4
Tamanho de separação	mm	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4
Fator C (capacidade)	m ³ /h/m ²	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Porcentagem de O/S na alimentação	%	57,48	57,2	57,5	57,0	56,6	44,0	48,2
Fator M (% de grossos)	-	1,270	1,266	1,271	1,263	1,259	1,113	1,156
Porcentagem menor do que 1/2 abertura nominal	%	27,7	28,8	27,7	27,8	27,6	43,7	38,7
Fator K (% de finos)	-	0,76	0,78	0,76	0,76	0,76	1,07	0,97
Fator Q ₁ (Posição do deck)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₂ (Forma da partícula)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₃ (Via úmida vs malha)	-	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Fator Q ₄ (Via seco vs umidade)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₅ (Área aberta vs Tipo de tela)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>borracha-quad</i>	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fator Q ₆ (Tipo de peneira)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>convencional circular</i>	-	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Área útil necessária	m ²	0,9	1,1	1,0	2,2	2,1	0,4	0,3
Área ativa	m ²	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Porcentagem da área utilizada	%	15,6	18,6	17,1	37,5	36,6	6,1	4,8
Velocidade de transporte	m/min	34	34	34	34	34	34	34
Espessura da camada na alimentação	mm	8	10	9	20	20	4	3
Espessura da camada na alimentação (máximo)	mm	59	59	59	59	59	59	59
Espessura da camada na alimentação (mínimo)	mm	23	23	23	23	23	23	23

Tabela 41 - Parâmetros da peneira da rebitagem para o segundo *deck*.

Variável	Un	Caso Base	SIM 1A	SIM 1B	SIM 2A	SIM 2B	SIM 3A	SIM 3B
Vazão de sólidos	t/h	24,4	30,0	26,7	59,4	57,8	15,6	10,7
Densidade aparente	t/m ³	1,60	1,60	1,60	1,6	1,6	1,6	1,6
Vazão volumétrica de sólidos	m ³ /h	15,3	18,8	16,7	37,1	36,1	9,7	6,7
Abertura nominal	mm	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tamanho de separação	mm	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Fator C (capacidade)	m ³ /h/m ²	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Porcentagem de O/S na alimentação	%	59,19	57,8	58,5	60,0	61,0	46,2	46,9
Fator M (% de grossos)	-	1,295	1,275	1,285	1,307	1,322	1,135	1,142
Porcentagem menor do que 1/2 abertura nominal	%	36,8	37,8	37,3	35,7	35,2	47,3	47,1
Fator K (% de finos)	-	0,93	0,95	0,94	0,91	0,90	1,14	1,14
Fator Q ₁ (Posição do deck)	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fator Q ₂ (Forma da partícula)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₃ (Via úmida vs malha)	-	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Fator Q ₄ (Via seco vs umidade)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₅ (Área aberta vs Tipo de tela)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>borracha-retangular</i>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₆ (Tipo de peneira)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>convencional circular</i>	-	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Área útil necessária	m ²	2,1	2,6	2,3	5,2	5,1	1,3	0,9
Área ativa	m ²	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Porcentagem da área utilizada	%	36,7	44,8	39,9	90,4	87,9	21,8	14,8
Velocidade de transporte	m/min	34	34	34	34	34	34	34
Espessura da camada na alimentação	mm	2	3	2	5	5	1	1
Espessura da camada na alimentação (máximo)	mm	5	5	5	5	5	5	5
Espessura da camada na alimentação (mínimo)	mm	1	1	1	1	1	1	1

Conforme observado nos valores apresentados na Tabela 41, os critérios de área mínima necessária e espessura máxima da camada de descarga foram atendidos em todas as simulações do segundo *deck* da peneira de rebitagem.

Não são esperados impactos relevantes nesta etapa diante do aumento de produção aqui avaliado. Em função da elevada área disponível, uma redução da abertura do *deck* superior (25,4 mm) contribuiria para a redução de vazões reportadas ao segundo *deck*. Recomenda-se investigar uma possível limitação na resistência mecânica do *deck* em função da redução da malha de peneiramento do mesmo.

7.2.3.4 Peneiramento primário ou peneiramento de grossos

Conforme já apresentado neste trabalho, cada linha da usina possui uma peneira de duplo *deck* dedicada ao peneiramento de grossos, cuja alimentação é proveniente do *undersize* do *trommel*. A Tabela 42 apresenta os cálculos de área necessária e espessura de camada no primeiro *deck*, de abertura igual a 25,4 mm, das peneiras de grossos.

O primeiro *deck* se mostrou adequado para todas as simulações realizadas, muito embora as simulações SIM 1 e SIM 3 apresentassem vazões de alimentação superiores às do projeto original, este último igual a 440 t/h.

A Tabela 43 apresenta os cálculos para o segundo *deck* das peneiras de grossos, com abertura de 8 mm.

Tabela 42- Parâmetros das peneiras de grossos para o primeiro *deck*.

Variável	Un	Caso Base	SIM 1A	SIM 1B	SIM 2A	SIM 2B	SIM 3A	SIM 3B
Vazão de sólidos	t/h	424,3	453,0	456,6	419,0	421,4	474,1	477,7
Densidade aparente	t/m ³	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Vazão volumétrica de sólidos	m ³ /h	273,7	292,2	294,6	270,3	271,9	305,9	308,2
Abertura nominal	mm	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4
Tamanho de separação	mm	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4
Fator C (capacidade)	m ³ /h/m ²	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Porcentagem de O/S na alimentação	%	8,6	8,5	8,7	11,4	11,3	3,8	3,9
Fator M (% de grossos)	-	0,927	0,927	0,928	0,942	0,942	0,912	0,912
Porcentagem menor do que 1/2 abertura nominal	%	81,2	81,3	81,1	77,2	77,2	89,4	89,2
Fator K (% de finos)	-	1,82	1,83	1,82	1,74	1,74	1,99	1,98
Fator Q ₁ (Posição do deck)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₂ (Forma da partícula)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₃ (Via úmida vs malha)	-	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Fator Q ₄ (Via seco vs umidade)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₅ (Área aberta vs Tipo de tela)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>poliuretano-quad</i>	-	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Fator Q ₆ (Tipo de peneira)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>convencional circular</i>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Área útil necessária	m ²	4,9	5,2	5,2	4,9	5,0	5,1	5,1
Área ativa	m ²	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
Porcentagem da área utilizada	%	35,2	37,6	38,0	35,8	36,0	36,7	37,1
Velocidade de transporte	m/min	33	33	33	33	33	33	33
Espessura da camada na alimentação	mm	46	49	50	46	46	52	52
Espessura da camada na alimentação (máximo)	mm	59	59	59	59	59	59	59
Espessura da camada na alimentação (mínimo)	mm	23	23	23	23	23	23	23

Tabela 43 - Parâmetros das peneiras de grossos para o segundo *deck*.

Variável	Un	Caso Base	SIM 1A	SIM 1B	SIM 2A	SIM 2B	SIM 3A	SIM 3B
Vazão de sólidos	t/h	387,8	414,3	416,9	371,2	373,7	456,2	458,9
Densidade aparente	t/m ³	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Vazão volumétrica de sólidos	m ³ /h	250,2	267,3	269,0	239,5	241,1	294,3	296,1
Abertura nominal	mm	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Tamanho de separação	mm	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Fator C (capacidade)	m ³ /h/m ²	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3
Porcentagem de O/S na alimentação	%	18,4	18,4	18,4	21,4	21,4	12,3	12,3
Fator M (% de grossos)	-	0,978	0,978	0,978	0,990	0,990	0,947	0,947
Porcentagem menor do que 1/2 abertura nominal	%	63,0	63,0	63,0	55,0	55,0	80,0	80,0
Fator K (% de finos)	-	1,46	1,46	1,46	1,30	1,30	1,80	1,80
Fator Q ₁ (Posição do deck)	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fator Q ₂ (Forma da partícula)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₃ (Via úmida vs malha)	-	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Fator Q ₄ (Via seco vs umidade)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₅ (Área aberta vs Tipo de tela)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>poliuretano-ret</i>	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fator Q ₆ (Tipo de peneira)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>convencional linear</i>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Área útil necessária	m ²	9,6	10,3	10,3	10,2	10,3	9,5	9,5
Área ativa	m ²	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
Porcentagem da área utilizada	%	69,7	74,5	75,0	74,1	74,6	68,8	69,2
Velocidade de transporte	m/min	33	33	33	33	33	33	33
Espessura da camada na alimentação	mm	42	45	45	40	41	50	50
Espessura da camada na alimentação (máximo)	mm	23	23	23	23	23	23	23
Espessura da camada na alimentação (mínimo)	mm	8	8	8	8	8	8	8

Conforme mostra a Tabela 43, o critério de área necessária foi atendido para todas as simulações. Já para as espessuras das camadas na alimentação, todos os cenários apresentaram valores mais altos do que os máximos recomendados. Entretanto o próprio caso base também ultrapassou este cenário para uma eficiência considerada elevada (95,7%).

O primeiro *deck* apresentou condição mais amena do que o segundo, considerando a razão entre área necessária e área disponível. Caso quedas de desempenho sejam notadas diante do aumento de produção, o desbalanceamento observado entre os dois *decks* poderá ser mitigado reduzindo-se a abertura do *deck* superior, bem como aliviando-se as telas de 8,0 mm do *deck* inferior. Nestes casos, a resistência mecânica das telas deverá ser verificada.

Ainda, o segundo *deck* transporta partículas menores e, portanto, com maior área superficial para uma mesma massa. Como as lamas ricas em sílica aderem à superfície das partículas, é importante que os *sprays* do segundo *deck* acessem todas as camadas de minério. Nesta alternativa, o fechamento da malha de separação do primeiro *deck* contribuiria para a redução de massa alimentada ao segundo e, conseqüentemente, elevaria a exposição da superfície das partículas aos *sprays* da lavagem. Desta forma, diante da possibilidade de alterações das telas do peneiramento para absorver aumentos de produção mantendo a eficiência de lavagem, as simulações indicam que não há necessidade de intervenção no peneiramento primário ou de grossos.

7.2.3.5 Peneiramento secundário ou peneiramento de intermediários

Cada linha de processo possui uma peneira de duplo *deck* dedicada ao peneiramento de frações intermediárias, conforme descrito na seção 4.4.2 deste trabalho. A Tabela 44 apresenta os cálculos de área necessária e espessura de camada no primeiro *deck*, com abertura de 2,4 mm, das peneiras de intermediários.

Tabela 44 - Área necessária e espessura da camada para cada cenário simulado para o peneiramento de intermediário, primeiro *deck*.

Variável	Un	Caso Base	SIM 1A	SIM 1B	SIM 2A	SIM 2B	SIM 3A	SIM 3B
Vazão de sólidos	t/h	313,9	319,7	336,7	275,3	292,0	379,9	397,1
Densidade aparente	t/m ³	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Vazão volumétrica de sólidos	m ³ /h	196,2	199,8	210,4	172,0	182,5	237,5	248,2
Abertura nominal	mm	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Tamanho de separação	mm	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Fator C (capacidade)	m ³ /h/m ²	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Porcentagem de O/S na alimentação	%	19,3	17,2	19,5	21,3	23,9	9,5	11,0
Fator M (% de grossos)	-	0,982	0,973	0,983	0,990	0,999	0,932	0,940
Porcentagem menor do que 1/2 abertura nominal	%	71,5	73,5	71,3	66,3	64,0	78,9	76,9
Fator K (% de finos)	-	1,63	1,67	1,63	1,53	1,48	1,78	1,74
Fator Q ₁ (Posição do deck)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₂ (Forma da partícula)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₃ (Via úmida vs malha)	-	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Fator Q ₄ (Via seco vs umidade)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₅ (Área aberta vs Tipo de tela)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>poliuretano-ret</i>	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fator Q ₆ (Tipo de peneira)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>convencional linear</i>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Área útil necessária	m ²	13,9	14,0	15,0	12,9	14,0	16,3	17,3
Área ativa	m ²	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
Porcentagem da área utilizada	%	66,4	66,6	71,2	61,6	66,8	77,7	82,3
Velocidade de transporte	m/min	28	28	28	28	28	28	28
Espessura da camada na alimentação	mm	33	33	35	29	30	39	41
Espessura da camada na alimentação (máximo)	mm	8	8	8	8	8	8	8
Espessura da camada na alimentação (mínimo)	mm	2	2	2	2	2	2	2

Quanto a área disponível, o primeiro *deck* se demonstrou adequado para todas as simulações realizadas, apesar das simulações SIM 1 e SIM 3 apresentarem vazões de alimentação superiores às do projeto original, esta última de 307 t/h. Já para as espessuras das camadas na alimentação, todos os cenários apresentaram valores mais altos do que os considerados máximos. Entretanto, o próprio caso base também ultrapassou este critério e, como já apresentado, a eficiência do estágio aferida foi de 98%, considerada muito alta. As possíveis quedas de eficiência com o aumento de produção foram exploradas e estão claras nos resultados de cada simulações do tipo “A”.

A Tabela 45 apresenta os cálculos para o segundo *deck*, de abertura igual a 1,2 mm. O critério de área necessária não foi atendido para as simulações de minério fino, indicando um aumento necessário de 14% na área de peneiramento. Este peneiramento fino (1,2 mm) pode impactar também a qualidade do produto granulado, pois apresenta vazões de *oversize* significativas e muita área superficial. Observa-se também que a razão de utilização da área no caso base foi de 84% e a do cenário SIM 3B de 114%, valores estes bem distantes, sinalizando um ponto necessário de intervenção. Na linha 2 a utilização da área para esse cenário foi igual a 101%. Para as espessuras das camadas na alimentação, todos os cenários apresentaram valores mais altos do que os considerados máximos. Entretanto, o próprio caso base também ultrapassou este critério e, como já apresentado, a eficiência aferida foi de 98%, considerada muito alta. As possíveis quedas de eficiência em função do aumento de produção aqui mencionado foram exploradas nos cenários simulados (simulações tipo “A”).

Tabela 45 - Parâmetros das peneiras de intermediários para o segundo *deck*.

Variável	Un	Caso Base	SIM 1A	SIM 1B	SIM 2A	SIM 2B	SIM 3A	SIM 3B
Vazão de sólidos	t/h	253,2	264,6	271,1	216,5	222,1	343,8	353,4
Densidade aparente	t/m ³	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Vazão volumétrica de sólidos	m ³ /h	158,2	165,4	169,4	135,3	138,8	214,9	220,9
Abertura nominal	mm	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tamanho de separação	mm	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Fator C (capacidade)	m ³ /h/m ²	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Porcentagem de O/S na alimentação	%	11,4	11,2	11,2	15,7	16,3	12,3	12,3
Fator M (% de grossos)	-	0,942	0,941	0,941	0,965	0,968	0,947	0,947
Porcentagem menor do que 1/2 abertura nominal	%	78,0	78,2	78,2	69,2	67,0	80,0	80,0
Fator K (% de finos)	-	1,76	1,77	1,77	1,59	1,54	1,80	1,80
Fator Q ₁ (Posição do deck)	-	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fator Q ₂ (Forma da partícula)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₃ (Via úmida vs malha)	-	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Fator Q ₄ (Via seco vs umidade)	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₅ (Área aberta vs Tipo de tela)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>borracha-ret</i>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fator Q ₆ (Tipo de peneira)	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>convencional linear</i>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Área útil necessária	m ²	17,6	18,4	18,9	16,3	17,2	23,3	23,9
Área ativa	m ²	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
Porcentagem da área utilizada	%	84,0	87,6	89,8	77,8	81,8	110,9	114,0
Velocidade de transporte	m/min	28	28	28	28	28	28	28
Espessura da camada na alimentação	mm	26	28	28	23	23	36	37
Espessura da camada na alimentação (máximo)	mm	5	5	5	5	5	5	5
Espessura da camada na alimentação (mínimo)	mm	1	1	1	1	1	1	1

De modo geral, caso as peneiras de grossos se mostrem saturadas e ineficientes, a abertura da malha do *deck* inferior de grossos (8,0 mm) poderia ser considerada a fim de restaurar bons índices de eficiência na separação de grossos. Neste caso, a existência de maiores áreas de peneiramento no estágio intermediários poderia assimilar vazões maiores do que as previstas nas simulações.

Há, portanto, justificativa para intervenções nestes equipamentos, sendo recomendada a inclusão de mais um módulo de peneiramento intermediário em cada linha para absorver o aumento de capacidade simulado, de forma a manter os níveis de eficiência do caso base.

7.2.3.6 Ciclonagem

As baterias de ciclones existentes nas linhas 1 e 2 da usina de Juruti são idênticas, conforme já apresentado neste trabalho. Durante o período da amostragem, a única diferença existente encontrava-se na alimentação da bateria primária de 26" da linha 1 que recebia, também, toda a polpa proveniente da peneira da rebitagem, que é um equipamento comum às duas linhas, isto é, é alimentado por material proveniente tanto da linha 1 quanto da linha 2. A Tabela 46 descreve as análises de capacidade quanto ao número de ciclones requeridos em cada uma das simulações realizadas no presente trabalho.

Tabela 46 - Análise de capacidade das baterias de ciclones.

Equipamento	Variável	Un	Caso Base	SIM 1A	SIM 1B	SIM 2A	SIM 2B	SIM 3A	SIM 3B
Primária de finos	Vazão de polpa	m ³ /h	1344,01	1332,93	1347,51	1268,2	1335,3	1947,8	1979,4
	Porcentagem de sólidos	%	16,5	16,2	17,5	14,0	15,0	14,0	15,0
	Pressão de operação	kPa	149,0	146,3	150,8	130,5	145,6	136,8	142,2
	Número de Ciclones requeridos por linha	-	2	2	2	2	2	3	3
	Número de Ciclones disponíveis por linha	-	4	4	4	4	4	4	4
Secundária de Finos	Vazão de polpa	m ³ /h	276,97	276,84	277,15	274,4	271,4	287,8	536,8
	Porcentagem de sólidos	%	31,5	28,5	33,0	31,5	37,0	35,0	24,0
	Pressão de operação	kPa	78,0	76,2	79,0	76,5	78,1	86,4	69,3
	Número de Ciclones requeridos por linha	-	1	1	1	1	1	1	2
	Número de Ciclones disponíveis por linha	-	2	2	2	2	2	2	2
Primária de Superfinos	Vazão de polpa	m ³ /h	1506,96	1603,14	1625,93	1358,5	1412,5	2005,9	2210,0
	Porcentagem de sólidos	%	9,0	8,8	9,0	6,4	6,4	8,4	7,8
	Pressão de operação	kPa	193,1	190,1	195,8	179,0	193,5	185,0	183,2
	Número de Ciclones requeridos por linha	-	14	15	15	13	13	19	21
	Número de Ciclones disponíveis por linha	-	18	18	18	18	18	18	18
Secundária de Superfinos	Vazão de polpa	m ³ /h	100,90	123,99	117,80	121,8	120,9	125,0	116,4
	Porcentagem de sólidos	%	17,0	15,3	17,0	18,0	19,0	19,0	20,0
	Pressão de operação	kPa	181,4	183,1	167,2	179,9	178,5	190,9	166,7
	Número de Ciclones requeridos por linha	-	2	2	2	2	2	2	2
	Número de Ciclones disponíveis por linha	-	4	4	4	4	4	4	4
Terciária de Superfinos	Vazão de polpa	m ³ /h	-	45,67	46,54	45,3	47,5	47,7	71,7
	Porcentagem de sólidos	%	-	29,0	30,0	33,0	33,0	33,0	23,0
	Pressão de operação	kPa	-	149,3	156,1	151,5	166,1	167,7	156,6
	Número de Ciclones requeridos por linha	-	-	2	2	2	2	2	3
	Número de Ciclones disponíveis por linha	-	4	4	4	4	4	4	4

A seguir são apresentadas as avaliações para cada bateria de ciclones.

- Primária de Finos

Para a bateria primária de finos, os cenários que mais demandaram ciclones são os SIM 3A e SIM 3B, com alimentação relativamente mais fina. A distribuição da polpa alimentada para 3 ciclones nos arranjos com 4 ciclones pode resultar em desempenho distintos e conseqüente redução de qualidade. Idealmente, a distribuição seria melhor com 6 ciclones equiespaçados no distribuidor. Por outro lado, a capacidade requerida é atendida com o arranjo atual, restando um ciclone em *stand-by*.

Uma limitação da etapa primária de finos é a diluição proveniente dos processos à montante. Valores altos de diluição elevam a vazão de polpa, resultando nos números de ciclones requeridos apresentados acima.

De maneira geral, as baterias operam com diluições relativamente altas nas alimentações. Se por um lado, isto requer maior capacidade de processamento, por outro, eleva a nitidez de separação ao reduzir arrastes por contato sólido-sólido. As simulações foram realizadas tentando manter as diluições praticadas durante a amostragem, visto que bons desempenhos foram observados na análise da campanha de amostragem base deste trabalho.

Desta forma, não houve fortes evidências para inserir novas unidades de ciclones na bateria primária de finos. Importante reforçar que para minérios finos deverão ser operados 3 ciclones, alcançando valores de vazão acima dos praticados durante o período da amostragem e usuais na operação da usina (~550 t/h em base úmida).

- Secundária de Finos

O cenário que mais demanda ciclones na bateria secundária de finos é o SIM 3B, com alimentação fina, utilizando todas as duas unidades instaladas. Não foram observadas evidências fortes para inserir mais unidades nesta etapa, visto que os dois ciclones só serão utilizados simultaneamente em caso de minério muito fino alimentado à usina.

- Primária de Superfinos

O cenário que mais demanda ciclones é o SIM 3B, com alimentação fina, sendo necessários 21 ciclones. Neste cenário haveria, então, necessidade de inserir-se mais unidades nas etapas primárias de superfinos, sendo recomendado a adição de mais 6 unidades por linha.

- Secundária de Superfinos

Em todos os cenários, a bateria secundária de superfinos atende à necessidade e permanece com unidades em *stand-by*.

- Terciária de Superfinos

A bateria terciária de superfinos atende à demanda de aumento de produção aqui estudada, utilizando 3 de 4 ciclones instalados no cenário SIM 3B. Idealmente, a distribuição seria melhor com 6 ciclones equiespaçados no distribuidor. Por outro lado, a capacidade requerida é atendida com o arranjo atual, restando ainda um ciclone em *stand-by*.

7.2.3.7 Resumo das alterações necessárias

Com os modelos gerados e calibrados para as linhas de produção da usina de beneficiamento de Juruti foi possível realizar um conjunto de simulações que permitiram o estudo e identificação das intervenções necessárias nos equipamentos para alcançar o aumento estipulado na vazão de alimentação da usina existente. Por meio das simulações com diferentes tipos granulométricos de minério foi possível verificar quais as condições que demandam mais dos equipamentos e com base em dados de vazão, espessura da camada, área necessária *versus* área disponível, foi possível definir quais equipamentos precisam ser repotenciados ou acrescentadas unidades dos mesmos.

A Tabela 47 a seguir sumariza as intervenções necessárias para atingir o aumento de produção requerido.

Tabela 47 - Sumário das intervenções requeridas nos equipamentos.

Equipamento	Intervenção
Equipamento	Não requer intervenção
<i>Lavador Rotativo com Trommel</i>	<i>Requer repotenciamento</i>
Rebritador	Não requer intervenção
Peneira da Rebritagem	Não requer intervenção
<i>Peneiramento de Grossos</i>	<i>Requer adição de 1 módulo de 2 decks por linha</i>
Peneiramento de Intermediários	Não requer intervenção
Ciclonagem Primária de Finos	Não requer intervenção
<i>Ciclonagem Secundária de Finos</i>	<i>Requer adição de 6 unidades em cada linha</i>
Ciclonagem Primária de Superfinos	Não requer intervenção
Ciclonagem Secundária de Superfinos	Não requer intervenção

7.3 SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DE MELHORIAS DE DESEMPENHO NO CIRCUITO DE CLASSIFICAÇÃO

O objetivo principal da operação integrada de ciclonagem do circuito de Juruti é a produção de material fino com quantidade baixa de material contido na fração passante em 0,037 mm. A quantidade de material produzido pela ciclonagem também afeta a operação e desempenho dos filtros, em função da relação entre produto fino e superfino. Conforme foi possível observar nos balanços apresentados nos tópicos anteriores, o circuito de ciclonagem já apresenta uma eficiência global considerada alta, tanto na remoção de material contido na fração passante em 0,037 mm (91,8%), quanto de recuperação da fração retida em 0,037 mm (98,2%), conforme apresentado na Tabela 48.

Tabela 48 - Eficiência de classificação global.

Fluxo	Alimentação	Grosso (Underflow)	Finos (Overflow)
TPH	236,1	114,61	121,49
Malha (mm)	Passante Acumulado		
6,35	100	100	100
2,38	100	99	100
1,19	93,6	86,8	100
0,59	83,4	65,7	100
0,212	69,8	37,6	100
0,15	66,7	31,3	100
0,105	63,9	25,4	100
0,074	60,3	18,2	99,9
0,053	57,5	12,7	99,5
0,037	55,1	9,1	98,3
TPH -400#	130,1	10,5	119,4
Eficiência de Finos (%)	-	-	91,8
TPH +400#	106	104,1	2,1
Eficiência de Grossos (%)	-	98,2	-

Apesar de elevada eficiência, foram avaliados cenários de operação sobre o sistema de ciclonagem da usina, buscando identificar oportunidades de aumento de recuperação, aumento de qualidade ou seletividade na operação. Para tal, tomando como base o modelo gerado e calibrado para a ciclonagem de Juruti, foram determinados dois cenários de simulação: o primeiro grupo consistiu em medidas visando aumentos de recuperação mássica, enquanto o segundo considerou alterações para redução da fração passante em 0,037 mm e concentrações de sólidos na alimentação dos filtros. Os tópicos a seguir apresentam os resultados e discussões das referidas simulações.

7.3.1 Simulações com objetivo de aumento de recuperação mássica

Com o objetivo de avaliar alternativas de aumento da recuperação mássica foram realizadas cinco simulações alterando-se o diâmetro de *apex* dos ciclones

que compõem as quatro baterias da ciclonagem de Juruti, conforme sumarizado a seguir.

- SIM 1A: *Apex* da Primária de Finos = 100 mm
- SIM 2A: *Apex* da Primária de Finos = 120 mm
- SIM 3A: *Apex* da Secundária de Finos = 120 mm
- SIM 4A: *Apex* da Primária de Superfinos = 32 mm
- SIM 5A: *Apex* da Secundária de Superfinos = 32 mm

As pressões de operação foram mantidas próximas às obtidas no caso base, ajustando-se a porcentagem de sólidos da alimentação de cada bateria. A Tabela 49 apresenta os resultados das cinco simulações indicadas acima, comparando-os aos valores de referência adotados.

Observa-se na Tabela 49 que os resultados mais distantes do caso base foram obtidos com a alteração do diâmetro dos *apex* da bateria primária de finos de 80 mm para 120 mm. Houve um acréscimo de produção igual a 1,6% (95.000 TPA), com elevação da porcentagem da fração passante em 0,037 mm no produto fino de 9,1% para 13,2%. Do aumento de 5,8 t/h de bauxita lavada, 0,4 t/h são provenientes da fração retida em 0,037 mm do rejeito, e 5,4 t/h são devidos a fração passante em 0,037 mm. Isso acarreta queda no teor de alumina disponível e aumento do teor de sílica reativa.

Tabela 49 - Resultados das simulações para aumento de recuperação mássica.

Cenário	Un	Caso Base	Primária de Finos SIM A1	Primária de Finos SIM A2	Secundária de Finos SIM A3	Primária de Superfinos SIM A4	Secundária de Superfinos SIM A5
Instalado	m	-	0,080	0,080	0,100	0,025	0,025
Simulado	m	-	0,100	0,120	0,120	0,032	0,032
Vazão de Alimentação	tph	488	488	488	488	488	488
Vazão de Produto Lavado	tph	366	368,7	371,8	366,5	366,5	367,1
Horas Trabalhadas	h	7.132	7.132	7.132	7.132	7.132	7.132
Produção Anual @13% Umidade	tpa	6.000.731	6.045.042	6.096.202	6.008.125	6.009.219	6.018.818
Acréscimo de Produção	tpa	0	44.310	95.471	7.393	8.488	18.086
Acréscimo de Produção	%	-	0,74	1,59	0,12	0,14	0,3
Recuepração - Fração	%	75	75,6	76,2	75,1	75,1	75,2
Vazão Granulado	tph	251,4	251,4	251,4	251,4	251,4	251,4
Vazão Finos	tph	114,6	117,3	120,4	115,1	115,1	115,7
Particção Granulado/Finos	%	68,7	68,2	67,6	68,6	68,6	68,5
Partição Finos/Superfinos	-	5,3	6,1	7	5,4	5,1	5
Granulado -400#	%	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
Finos Total -400#	%	9,14	11,05	13,18	9,51	9,34	9,75
Vaazão de -400# no Produto	tph	20,94	23,43	26,34	21,41	21,21	21,75
Rejeito Total +400#	%	1,74	1,6	1,46	1,76	1,54	1,51
Vazão de +400# no Rejeito	tph	2,12	1,9	1,69	2,14	1,87	1,82
Rejito (% Sólidos)	%	6,81	6,7	6,49	6,84	6,85	6,79
Alimentação dos Filtros (% Sólidos)	%	67,2	67,9	68,7	57,9	67,4	63,5
Eficiência de Remoção de -400#	%	85,17	83,4	81,33	84,83	84,97	84,59
Eficiência de Recuperação de +400#	%	99,99	99,99	100	99,99	99,99	99,99
Teor de AA no Produto Final	%	47,5	47,31	47,09	47,46	47,47	47,43
Teor SR no Produto Final	%	4,1	4,13	4,17	4,11	4,1	4,11

Desta forma, verificou-se que é possível aumentar a recuperação mássica, no entanto, o preço é aumentar a participação de contaminantes (fração passante em 0,037 mm) no produto fino, o que gera perda de qualidade em termos dos teores de alumina aproveitável e sílica reativa. Desta forma, é necessário avaliar tal relação entre quantidade e qualidade, principalmente em função das regras de benefícios e penalidades da empresa.

7.3.2 Simulações com o objetivo de aumento de qualidade do produto

Com o objetivo de avaliar alternativas de aumento da qualidade do produto, foram realizadas sete simulações alterando-se o diâmetro de *apex* e *vortex finder* dos ciclones que compõem as quatro baterias da ciclonagem de Juruti, conforme sumarizado a seguir.

- SIM 1B: *Apex* da Secundária de Finos = 90 mm
- SIM 2B: *Apex* da Primária de Superfinos = 20 mm
- SIM 3B: *Apex* da Secundária de Superfinos = 20 mm
- SIM 4B: *Vortex finder* da Primária de Finos = 240 mm
- SIM 5B: *Vortex finder* da Secundária de Finos = 240 mm
- SIM 6B: *Vortex finder* Primária de Superfinos = 100 mm
- SIM 7B: *Vortex finder* da Secundária de Superfinos = 90 mm

As pressões de operação foram mantidas próximas às obtidas no caso base, ajustando-se a porcentagem de sólidos da alimentação de cada bateria, exceto na SIM 7B, devido à elevada diluição necessária para reestabelecer a pressão padrão de operação. A Tabela 50 apresenta os resultados das sete simulações realizadas, comparando-os aos valores de referência adotados.

Tabela 50 - Resultados das simulações para aumento de qualidade do produto para as simulações de SIM 1B a 7B.

Cenário	Un	Caso Base	Secundária de Finos SIM B1	Primária de Superfinos SIM B2	Secundária de Superfinos SIM B3	Primária de Finos SIM B4	Secundária de Finos SIM B5	Primária de Superfinos SIM B6	Secundária de Superfinos SIM B7
Instalado	m	-	0,100	0,025	0,025	0,200	0,200	0,080	0,060
Simulado	m	-	0,090	0,020	0,020	0,240	0,240	0,100	0,090
Vazão de Alimentação	tph	488	488	488	488	488	488	488	488
Vazão de Produto Lavado	tph	366	365,8	365,2	365,1	365,2	365,8	365,3	364,7
Horas Trabalhadas	h	7.132	7.132	7.132	7.132	7.132	7.132	7.132	7.132
Produção Anual @13% Umidade	tpa	6.000.731	5.996.941	5.988.218	5.985.399	5.988.107	5.997.836	5.989.833	5.979.698
Acréscimo de Produção	tpa	0	-3.790	-12.513	-15.332	-12.625	-2.896	-10.899	-21.034
Acréscimo de Produção	%	-	-0,06	-0,21	-0,26	-0,21	-0,05	-0,18	-0,35
Recuperação - Fração	%	75	75	74,8	74,8	74,6	75	74,9	74,7
Vazão Granulado	tph	251,4	251,4	251,4	251,4	251,4	251,4	251,4	251,4
Vazão Finos	tph	114,6	114,4	113,8	113,7	113,8	114,4	113,9	113,3
Partição Granulado/Finos	%	68,7	68,7	68,8	68,9	68,8	68,7	68,8	68,9
Partição Finos/Superfinos	-	5,3	5,2	5,5	5,6	5	5,3	5,5	5,7
Granulado -400#	%	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
Finos Total -400#	%	9,14	8,96	8,95	8,73	8,6	9,01	8,98	8,68
Vazão de -400# no Produto	tph	20,94	20,71	20,66	20,39	20,25	20,78	20,69	20,3
Rejeito Total +400#	%	1,74	1,73	2,12	2,03	1,79	1,75	2,07	2,24
Vazão de +400# no Rejeito	tph	2,12	2,12	2,6	2,49	2,2	2,13	2,54	2,76
Rejeito (% Sólidos)	%	6,81	6,8	6,81	6,83	5,78	6,81	6,82	6,75
Alimentação dos Filtros (% Sólidos)	%	67,2	72,2	67	69,3	67	68,8	67	67,8
Eficiência de Remoção de -400#	%	85,17	85,33	85,38	85,57	85,66	85,28	85,35	85,64
Eficiência de Recuperação de +400#	%	99,99	99,99	100	99,99	99,99	100	99,99	99,99
Teor de AA no Produto Final	%	47,5	47,51	47,53	47,55	47,55	47,51	47,52	47,55
Teor SR no Produto Final	%	4,1	4,1	4,1	4,09	4,09	4,1	4,1	4,09

Observa-se que a maior estimativa de ganho, apesar de modesta, foi obtida na troca do *vortex finder* da bateria primária de finos de 200 mm para 240 mm. Este ganho refere-se ao aumento do teor de alumina aproveitável em 0,05% e redução do teor de sílica reativa em 0,01%. Dependendo da política praticada de bônus&pênalti, pequenos percentuais de redução nos teores podem trazer bons resultados financeiros. De acordo com as condições contratuais vigentes entre a mina de Juruti e refinaria que processa a bauxita produzida, reduções na escala de 1% no percentual de contaminantes apenas no produto fino, que representa 30% do produto total da usina de beneficiamento, pode impactar em um retorno financeiro de até três milhões de dólares ao ano.

As pequenas variações nos resultados de qualidade diante dos cenários simulados, corroboram com a elevada eficiência encontrada no caso base.

8 CONCLUSÕES

Com base nos aspectos apresentados, as principais conclusões do trabalho foram:

- A estratégia e critérios de amostragem estipulados revelaram-se adequados para o imenso trabalho desenvolvido durante a campanha de amostragem na usina de Juruti;
- Os balanços de massas conduzidos indicaram valores consistentes com base nos resultados de granulometria e concentração de sólidos das amostras, assim como de valores obtidos no PIMS da usina de Juruti;
- O modelamento matemático adotado revelou-se adequado para representar as operações unitárias da usina de beneficiamento de Juruti, assim como do processo integrado de lavagem do minério. Em particular foram obtidas aderências elevadas entre valores experimentais balanceados e aqueles resultantes da calibração dos modelos matemáticos empregados.
- O caso base resultante da integração dos modelos matemáticos foi considerado uma plataforma adequada para a condução de simulações de processo no circuito de lavagem de Juruti;
- O caso base forneceu também uma referência importante para análises detalhadas de desempenho. Destaca-se a eficiência particularmente elevada nos peneiramentos, assim como nas ciclonações, exceção feita nesta última à etapa secundária de finos;
- As simulações de aumento de capacidade do circuito tiveram por referência incremento de 8% em relação à capacidade do caso base. Além do aumento, os cenários de simulação incluíram variação de características do minério alimentado e diferentes eficiências. Com base nos resultados obtidos nas simulações, foi possível identificar quais etapas do processo requerem reportenciamento, como é o caso do rebitador, ou mesmo adição de novos equipamentos, caso do peneiramento de intermediário que requer a adição de um módulo de peneira, de modo a manter o desempenho de lavabilidade da usina, no mínimo, no mesmo patamar do obtido nas campanhas de amostragem;

- Simulações também foram realizadas para avaliar oportunidades de melhoria de desempenho do circuito de finos através da alteração dos diâmetros de *apex* e *vortex finder* dos ciclones. Os resultados demonstraram o potencial impacto da qualidade dos produtos gerados em Juruti;
- Com o uso do simulador de processos foi possível apresentar cenários que possibilitaram identificar oportunidades de melhorias dos índices de desempenho do circuito de beneficiamento, bem como intervenções necessárias nas operações unitárias para comportar aumentos de capacidade, mantendo os mesmos níveis de qualidade do produto, permitindo validar um estudo de otimização de processos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREWS, W. H. Uses and specifications of bauxite. In: BAUXITE SYMPOSIUM, 1984, Los Angeles. **Bauxite: proceedings**. New York: SME, 1984. Cap.3, p. 49- 63.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil - Mineração responsável e competitividade**. São Paulo, 2017. p.10 - 17.

BATTERHAM, R. J. et al. **Screen performance and modeling with special reference to iron ore crushing plants**. In: European Symposium on Particle Technology, 1980, Amsterdam.

BERGERMAN, M.G. **Dimensionamento e simulação de moinhos verticais**. São Paulo, 2013. 154 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CBA aumentou recuperação em Mirai e economizou mais de 9 milhões ano passado. **Conexão Mineral**, n. 438, 2017. Disponível em: < <http://conexaomineral.com.br/noticia/438/cba-aumentou-recuperacao-em-mirai-e-economizou-mais-de-r-9-milhoes-ano-passado.htm>>. Acesso em: janeiro de 2019.

CHAVES, A. P. **Bombeamento de polpa e classificação**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012b. (Coleção teoria e prática do tratamento de minérios, v. 3).

CHAVES, A. P. **Britagem, peneiramento e moagem**. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012a. (Coleção teoria e prática do tratamento de minérios, v. 3)

CHAVES, A. P. et al. The practice of bauxite ores processing. In: MEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE ON MINERAL TECHNOLOGY; ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 23., 2007, Ouro Preto. **Proceedings**. Ouro Preto: UFOP, 2007. v.1, p.187-192.

CORREIA, J. C. G. Classificação e peneiramento. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Cap. 6, p. 257-297.

COSTA, J. H. B. **Modelagem matemática da operação de escrubagem da bauxita de Paragominas - PA**. São Paulo, 2010. 135 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

COSTA, J. H. B.; DELBONI, H. J. Escrubagem da bauxita de Paragominas - PA. Parte 1: influência de variáveis operacionais na desagregação da bauxita. **REM: Revista da Escola de Minas**, v. 65, p. 254-261, 2012.

DAMASCENO, E. C.; FLORES, J. C. C. **A bauxita e a indústria do alumínio**. São Paulo: EPUSP, 1998. 26 p.

DELBONI JR., H. **Ajuste de modelos empíricos de operação de ciclones**. São Paulo, 1989. 182 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

DOMINGUES, G. M. **Peneiras de alta frequência para recuperação da fração +0,16 mm no rejeito da usina de manganês do Azul**. Porto Alegre, 2019. 63 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e moagem. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Cap. 4, p.143-180

FOGGIATTO, B. **Previsão de desempenho do circuito de moagem de Carajás**. São Paulo, 2009. 230 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOMES, W. L. et al. Modelagem e simulação para melhoria de desempenho do circuito de moagem da vanádio de maracás. **Holos**, v. 6, p. 77-84, 2017.

GREENWOOD, N. N.; EARNSHAW, A. **Chemistry of the elements**. 2nd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. Cap. 7, p. 216-267: Aluminium, gallium, indium and thallium.

GY, P. M. **Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: theories of heterogeneity, sampling and homogenizing**. Amsterdam: Elsevier, 1992. (Data handling in science and technology, v. 10).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010 - Resultados gerais da amostra**. Rio de Janeiro, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. Brasília, 2015. p. 9 -11.

KARRA, V. K. Development of a model for predicting the screening performance of a vibrating screen. **CIM Bulletin**, v.72, p. 167-171, 1979.

KELSALL, D. F. A further study of the hydraulic cyclone. **Chemical Engineering Science**, v. 2, n. 6, p. 254-272, 1953.

LEITE, T. O. N.; DELBONI JUNIOR, H. Simulation of the Mineração Serra Grande industrial grinding circuit. **REM: International Engineering Journal**, v. 70, n.3, p. 347-355, jul. /set. 2017.

LYNCH, A. J.; RAO, T. C. Modeling and scale-up of hidrocyclone classifiers. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11th., Cagliari, 1975. **Proceedings**. Cagliari: Istituto di Arte Mineraria, 1975. p. 245-269.

LYNCH, A.J. **Mineral crushing and grinding circuits: their simulation, optimization and control.** Amsterdam: Elsevier, 1977.

MACHACA, Y. Y. C. **Modelagem da classificação de polpas de bauxita e de fosfato em hidrociclones.** 2010. 171 fls. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MASSOLA, C. P. **Flotação reversa da bauxita de Mirai, MG.** São Paulo, 2008. 73 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MILLER, G. Drum scrubber design and selection. In CONFERENCE ON METALLURGICAL PLANT DESIGN AND OPERATING STRATEGIES, 2004. **Metallurgical plant design and operating strategies: proceedings.** Carlton: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004. p. 529-539.

MINERAÇÃO RIO DO NORTE. **Mineração Rio do Norte.** Disponível em: <<http://www.mrn.com.br/>>. Acesso em: janeiro de 2019.

NAGESWARARAO, K. **Further developments in the modeling and scale up of industrial hydrocyclones.** St. Lucia, 1978. 183 p. Thesis (PhD) – School of Engineering, University of Queensland, St. Lucia, 1978.

NAPIER-MUN, T. J.; LYNCH, A. J. The modelling and steady state computer simulation of mineral treatment processes – current status and future trends. **Minerals Engineering**, v. 5, n. 2, p.143-167, 1992.

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral comminution circuits: their operation and optimization.** Indooroopilly, Qld: Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, 1999. 413 p. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, 2).

NORSK HYDRO ASA. **Hydro Paragominas.** Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Operacoes-no-Brasil/Hydro-Paragominas-mina/>>. Acesso em: janeiro de 2019.

NUNES FILHO, E. S. **Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras em instalações de britagem.** São Paulo, 2017. 35 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

NUNES, A. C. **Sistema computadorizado para ajuste de balanço de massas e metalúrgico.** 1992. 76 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

PATTERSON, S. H. Bauxita and nonbauxite aluminium resources and production: an up dat. In: BAUXITE SYMPOSIUM, 1984, Los Angeles. **Bauxite: proceedings.** New York: SME, 1984. Cap. 1, p. 3-30.

PLITT L.R. A mathematical model of the hydrocyclone. **CIM Bulletin**, v.69, n. 776, p. 114-123, 1976.

ROSA, A. C. **Desempenho dos circuitos de moagem direto e inverso da Samarco**. São Paulo, 2012. 134 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. Classificação. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (Ed.). **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. Pt. 2, cap. 3, p. 55-72.

SILVA, A. C. **Notas de aula do curso de modelamento e simulação de processos**. s.L.: Universidade Federal de Goiás, 2013. Curso de especialização em Tratamento de Minérios.

SUMÁRIO MINERAL. 2015. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/sumários/sumario-mineral-2015/view>>. Acesso em: novembro 2018.

TEODORO, T. S. **Otimização e simulação de processos: noção geral**. Disponível em: <http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ790/Modelagem_Processos.pdf> Acesso em: 25 out. 2018.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2018**. U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3133/70140094>> Acesso em: março 2019.

VAN DEURSEN, C. M. **Métodos de desaguamento e disposição de rejeitos da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica**. São Paulo, 2016. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

WHITEN W. J. The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATIONS OF COMPUTER METHODS IN THE MINERAL INDUSTRY, 10th, Johannesburg, 1972. [**Proceedings**]. S.L.: s.n., 1972. p. 317-323.

WHITEN, W. J.; WHITE, M. E. Modelling and simulation of high tonnage crushing plants. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 12th., São Paulo, 1977. **Proceedings/Anais**. São Paulo: DNPM, 1980. p. 245-269.

Apêndice A – Resultados das simulações para os cenários simulados variando-se a granulometria da alimentação da usina e eficiência de peneiramento

I) SIM 1B - Granulometria média e eficiência do peneiramento alta

Neste cenário considerou-se a distribuição granulométrica definida como médios e eficiência de peneiramento tal qual obtido na amostragem.

A Figura 59 apresenta o fluxograma obtido para a SIM 1B contendo o sumário do respectivo balanço de massas, em termos de vazões de sólidos, vazões volumétricas de polpa, recuperações mássicas, porcentagens de sólidos, P80 e porcentagens passante em 0,037 mm. Neste caso a simulação incluiu a vazão de rebitagem especificamente da linha 1. A Tabela 51 apresenta o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 1B para o circuito de granulado.

Figura 59 - Fluxograma SIM 1B.

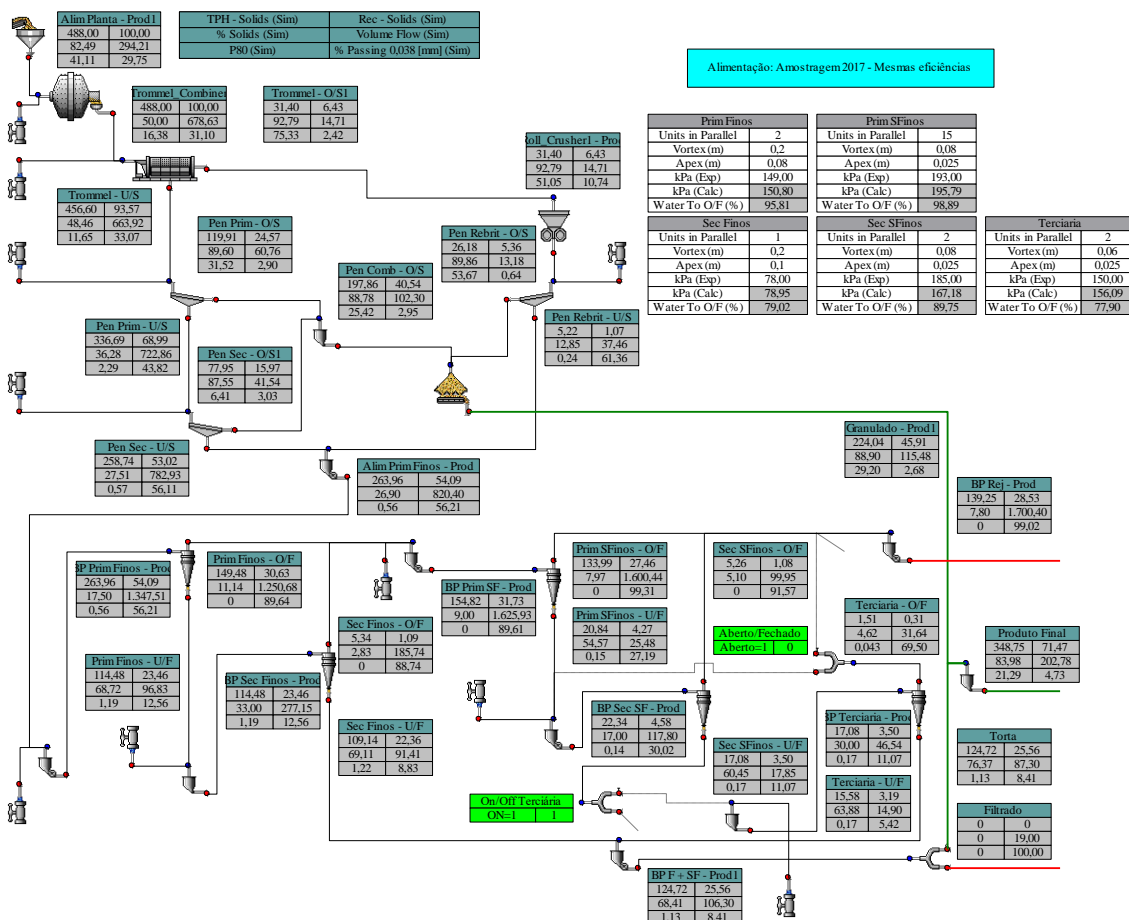


Tabela 51 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 1B).

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebritador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento de Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	488,0	488,0	31,4	456,6	456,6	119,9	336,7	31,4	31,4	31,4	26,2	5,2	336,7	78,0	258,7	224,0
Densidade dos Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	103,6	488,0	2,4	486	605	13,9	591	2,4	2,4	38,4	3,0	35,4	693	11,1	682	28,0
Porcentagem de Sólidos	82,5	50,0	92,8	48,5	43,0	89,6	36,3	92,8	92,8	45,0	89,9	12,8	32,7	87,5	27,5	88,9
Densidade da Polpa (t/m ³)	2,01	1,44	2,30	1,42	1,36	2,20	1,28	2,30	2,30	1,38	2,21	1,08	1,25	2,14	1,20	2,18
Vazão de Polpa (m ³ /h)	294	679	14,7	664	784	60,8	723	14,7	14,7	50,6	13,2	37,5	824	41,5	783	115
P ₈₀ (mm)	41,1	16,4	75,3	11,6	11,6	31,5	2,29	75,3	51,1	51,1	53,7	0,24	2,29	6,4	0,569	29,2
Malha (mm)		% Passante														
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	98,87	99,6	100,0	100	100	100	100	100	99,9	99,9	99,9	100	100	100	100	100
76,2	95,02	98,3	82,4	100	100	100	100	82,4	97,4	97,4	97,6	100	100	100	100	100
50,8	83,59	93,7	11,0	99,3	99,3	97,5	100	11,0	79,7	79,7	75,6	100	100	100	100	95,8
25,40	70,97	85,9	6,7	91,3	91,3	66,9	100	6,7	42,5	42,5	31,0	100	100	100	100	74,2
12,70	60,15	76,2	5,9	81,1	81,1	27,9	100	5,9	27,7	27,7	13,2	100	100	100	100	51,3
8,00	54,25	69,9	5,4	74,3	74,3	12,3	96,4	5,4	23,8	23,8	8,6	100	96,4	84,7	100	37,0
6,350	52,18	67,7	5,3	72,0	72,0	6,8	95,2	5,3	22,4	22,4	7,0	100	95,2	79,3	100	32,0
2,380	43,96	57,1	4,4	60,8	60,8	5,3	80,5	4,4	19,3	19,3	3,2	99,9	80,5	17,1	99,5	9,2
1,190	40,02	50,6	3,9	53,8	53,8	4,7	71,3	3,9	17,3	17,3	0,73	98,3	71,3	5,7	91,1	4,6
0,590	36,67	44,6	3,5	47,4	47,4	4,2	62,8	3,5	15,6	15,6	0,65	90,7	62,8	4,5	80,4	3,9
0,212	33,49	38,0	3,0	40,4	40,4	3,5	53,6	3,0	13,5	13,5	0,64	78,0	53,6	3,7	68,6	3,3
0,150	32,54	36,2	2,8	38,5	38,5	3,4	51,0	2,8	12,9	12,9	0,64	74,1	51,0	3,5	65,3	3,1
0,105	31,68	34,5	2,7	36,7	36,7	3,2	48,7	2,7	12,3	12,3	0,64	70,5	48,7	3,4	62,3	3,0
0,074	30,79	33,0	2,6	35,1	35,1	3,1	46,5	2,6	11,7	11,7	0,64	67,1	46,5	3,2	59,6	2,8
0,053	30,17	31,9	2,5	33,9	33,9	3,0	45,0	2,5	11,2	11,2	0,64	64,1	45,0	3,1	57,6	2,7
0,037	29,75	31,1	2,4	33,1	33,1	2,9	43,8	2,4	10,7	10,7	0,64	61,4	43,8	3,0	56,1	2,7

A Tabela 52 apresentam o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 1B para o circuito de finos.

Tabela 52 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 1B).

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Terciária de Superfinos			Rejeito	Produto Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	264,0	114,5	149,5	114,5	109,1	5,3	154,8	20,8	134,0	22,3	17,1	5,3	17,1	15,6	1,5	139,2	124,7
Densidade dos Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	1244,4	52,1	1192	232,4	49	183,7	1565,4	17,3	1548,1	109,1	11,2	97,9	39,9	8,8	31,1	1646,0	58
Porcentagem de Sólidos	17,5	68,7	11,1	33,0	69,1	2,8	9,0	54,6	8,0	17,0	60,5	5,1	30,0	63,9	4,6	7,8	68,4
Densidade da Polpa (t/m ³)	1,12	1,72	1,07	1,25	1,73	1,02	1,06	1,50	1,05	1,12	1,58	1,03	1,22	1,64	1,03	1,05	1,71
Vazão de Polpa (m ³ /h)	1348	96,8	1251	277,1	91	185,7	1625,9	25,5	1600,4	117,8	17,8	100,0	46,5	14,9	31,6	1700,4	106
P ₈₀ (mm)	0,559	1,193	<0,010	1,193	1,217	0,000	0,000	0,148	<0,010	0,142	0,165	<0,010	0,165	0,173	0,043	<0,010	1,129
Malha (mm)	% Passante																
6,350	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	99,5	98,9	100	98,9	98,9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,0
1,190	91,3	79,9	100	79,9	78,9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	81,5
0,590	80,6	55,3	100	55,3	53,1	100	100	99,9	100	99,9	99,9	100	99,9	99,8	100	100	58,9
0,212	68,8	29,7	98,7	29,7	26,2	99,8	98,7	90,6	100	91,2	88,5	100	88,5	87,4	100	100	33,9
0,150	65,4	23,8	97,3	23,8	20,1	99,1	97,4	80,4	100	81,7	76,1	100	76,1	73,8	100	100	26,8
0,105	62,5	19,4	95,5	19,4	15,6	97,3	95,5	66,8	100	69,0	59,5	100	59,5	55,6	100	100	20,6
0,074	59,7	16,0	93,2	16,0	12,2	94,3	93,3	50,2	99,95	53,5	39,2	99,9	39,2	33,3	99,5	99,9	14,8
0,053	57,7	13,9	91,3	13,9	10,1	91,3	91,3	36,6	99,76	40,5	22,6	98,6	22,6	15,7	93,5	99,7	10,8
0,037	56,2	12,6	89,6	12,6	8,8	88,7	89,6	27,2	99,31	30,0	11,1	91,6	11,1	5,4	69,5	99,0	8,4

A Tabela 53 apresenta os índices de eficiência calculados para o cenário da simulação com granulometria média e eficiência do peneiramento tal qual a da amostragem (SIM 1B).

Tabela 53 - Índices de eficiência para a simulação SIM 1B.

Variáveis	Fluxo	<i>Trommel</i>	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneiramento da Rebitagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	50,0	43,0	32,7	45,0	17,5	33,0	9,0	17,0	30,0
	Grossos	92,8	89,6	87,5	89,9	68,7	69,1	54,6	60,5	63,9
	Finos	48,5	36,3	27,5	12,8	11,1	2,8	8,0	5,1	4,6
Partição para os Grossos (%)	Polpa (vol)	2,2	7,8	5,0	26,0	7,2	33,0	1,6	15,2	32,0
	Sólidos	6,4	26,3	23,2	83,4	43,4	95,3	13,5	76,5	91,2
	Água	0,5	2,3	1,6	7,7	4,2	21,0	1,1	10,2	22,1
<i>d</i> _{50C} (mm)		54,40	8,66	2,09	1,10	0,084	<0,010	0,029	0,032	0,035
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de -400# para os grossos)	76,2 mm	95,2%	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	95,7%	-	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	98,1%	94,4%	-	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	90,3%	33,0%	95,9%	71,8%	44,6%

II) SIM 2A - Granulometria grossa e eficiência do peneiramento reduzida

Neste cenário considerou-se a distribuição granulométrica definida como grossos e eficiência de peneiramento reduzida.

A Figura 60 apresenta o fluxograma obtido para a SIM 2A contendo o sumário do respectivo balanço de massas, em termos de vazões de sólidos, vazões volumétricas de polpa, recuperações mássicas, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagens passante em 0,037 mm. Neste caso a simulação incluiu a vazão de rebitagem especificamente da linha 1. A Tabela 54 apresenta o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 2A para o circuito de granulado.

Figura 60 - Fluxograma SIM 2A.

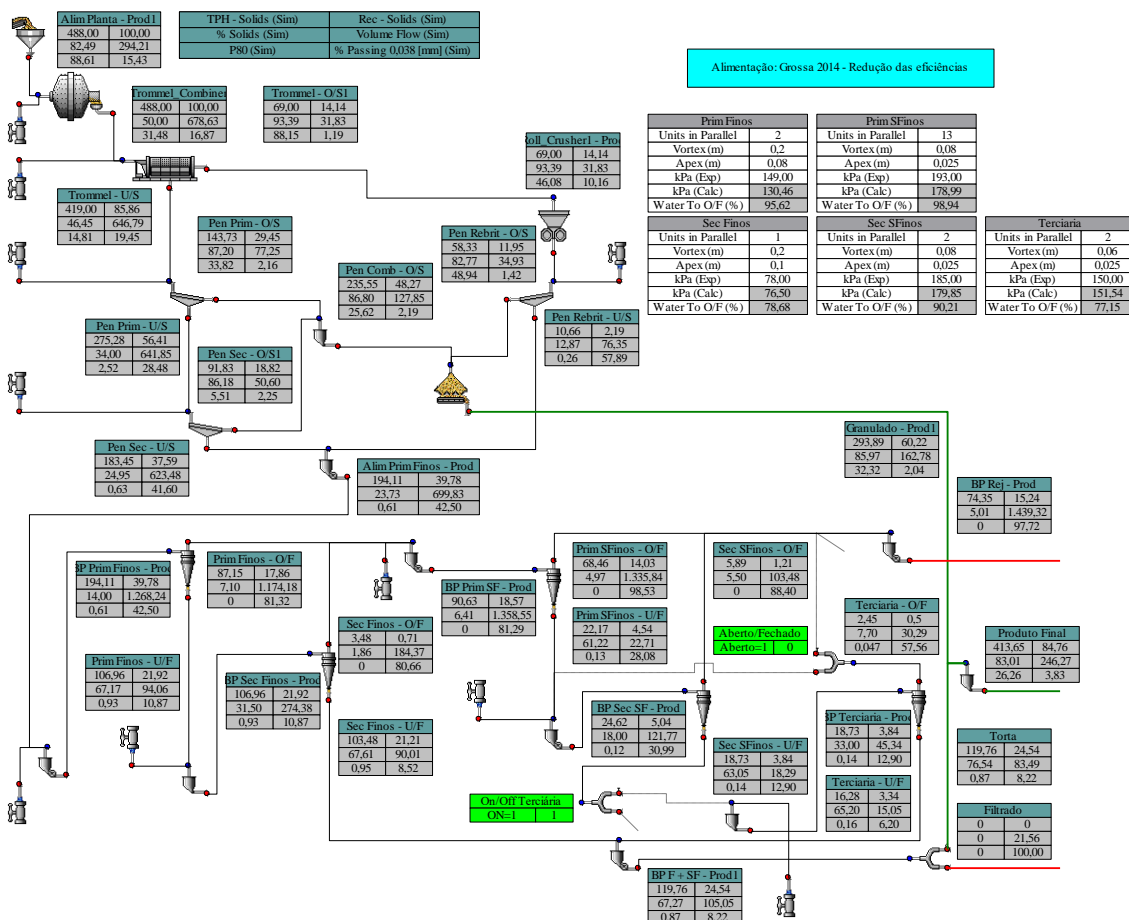


Tabela 54 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 2A).

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebitador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	488,0	488,0	69,0	419,0	419,0	143,7	275,3	69,0	69,0	69,0	58,3	10,7	275,3	91,8	183,4	293,9
Densidade dos Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	103,6	488,0	4,9	483	555	21,1	534	4,9	4,9	84,3	12,1	72,2	567	14,7	552	48,0
Porcentagem de Sólidos	82,5	50,0	93,4	46,4	43,0	87,2	34,0	93,4	93,4	45,0	82,8	12,9	32,7	86,2	25,0	86,0
Densidade da Polpa (t/m³)	2,01	1,44	2,32	1,39	1,36	2,13	1,26	2,32	2,32	1,38	2,02	1,09	1,25	2,11	1,18	2,10
Vazão de Polpa (m³/h)	294	679	31,8	647	719	77,2	642	31,8	31,8	111,3	34,9	76,4	674	50,6	623	163
P ₈₀ (mm)	88,6	31,5	88,1	14,8	14,8	33,8	2,52	88,1	46,1	46,1	48,9	0,26	2,52	5,5	0,626	32,3
Malha (mm)		% Passante														
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	86,119	97,0	95,2	100	100	100	100	95,2	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100
76,2	72,325	93,4	56,9	100	99,9	99,8	100	56,9	99,5	99,5	99,6	100	100	100	100	99,9
50,8	60,603	86,1	15,1	97,8	97,8	93,7	100	15,1	85,2	85,2	82,5	100	100	100	100	93,4
25,40	51,000	77,0	6,3	88,6	88,6	66,8	100,0	6,3	43,0	43,0	32,6	100	100,0	100,0	100	70,4
12,70	43,574	67,0	4,9	77,2	77,2	33,7	99,9	4,9	27,8	27,8	14,6	100,0	99,9	99,7	100,0	50,5
8,00	39,840	60,4	4,4	69,7	69,7	18,1	96,6	4,4	24,0	24,0	10,1	100,0	96,6	89,8	100,0	38,9
6,350	38,529	58,1	4,2	67,0	67,0	12,6	95,4	4,2	22,6	22,6	8,4	100,0	95,4	86,3	100,0	34,8
2,380	31,385	46,8	3,3	54,0	54,0	6,7	78,7	3,3	19,3	19,3	4,6	100,0	78,7	36,7	99,6	15,7
1,190	27,000	39,4	2,8	45,4	45,4	5,3	66,3	2,8	17,2	17,2	2,09	99,8	66,3	13,4	92,8	7,2
0,590	23,151	32,3	2,3	37,2	37,2	4,2	54,5	2,3	15,4	15,4	1,42	91,6	54,5	6,4	78,5	4,3
0,212	19,257	24,3	1,7	28,0	28,0	3,1	41,1	1,7	13,1	13,1	1,42	76,8	41,1	3,6	59,8	2,9
0,150	18,632	22,6	1,6	26,1	26,1	2,9	38,2	1,6	12,4	12,4	1,42	72,6	38,2	3,2	55,8	2,7
0,105	18,095	21,2	1,5	24,5	24,5	2,7	35,8	1,5	11,8	11,8	1,42	68,6	35,8	2,9	52,3	2,5
0,074	16,993	19,4	1,4	22,4	22,4	2,5	32,8	1,4	11,2	11,2	1,42	64,6	32,8	2,6	47,8	2,3
0,053	16,080	17,9	1,3	20,7	20,7	2,3	30,3	1,3	10,7	10,7	1,42	61,1	30,3	2,4	44,3	2,2
0,037	15,434	16,9	1,2	19,4	19,4	2,2	28,5	1,2	10,2	10,2	1,42	57,9	28,5	2,3	41,6	2,0

A Tabela 55 apresentam o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 2A para o circuito de finos.

Tabela 55 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 2A).

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Terciária de Superfinos			Rejeito	Produto Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	194,1	107,0	87,2	107,0	103,5	3,5	90,6	22,2	68,5	24,6	18,7	5,9	18,7	16,3	2,4	74,4	119,8
Densidade dos Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	1192,4	52,3	1140	232,6	50	183,0	1323,1	14,0	1309,1	112,2	11,0	101,2	38,0	8,7	29,3	1410,3	58
Porcentagem de Sólidos	14,0	67,2	7,1	31,5	67,6	1,9	6,4	61,2	5,0	18,0	63,0	5,5	33,0	65,2	7,7	5,0	67,3
Densidade da Polpa (t/m ³)	1,09	1,69	1,05	1,24	1,70	1,01	1,04	1,60	1,03	1,12	1,62	1,03	1,25	1,66	1,05	1,03	1,69
Vazão de Polpa (m ³ /h)	1268	94,1	1174	274,4	90	184,4	1358,5	22,7	1335,8	121,8	18,3	103,5	45,3	15,0	30,3	1439,3	105
P ₈₀ (mm)	0,608	0,935	<0,010	0,935	0,954	0,000	0,000	0,129	<0,010	0,120	0,144	<0,010	0,144	0,157	0,047	<0,010	0,870
Malha (mm)	% Passante																
6,350	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	99,6	99,4	100	99,4	99,3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,4
1,190	93,2	87,6	100	87,6	87,2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89,0
0,590	79,2	62,3	100	62,3	61,1	100	100	99,9	100	99,9	99,9	100	99,9	99,9	100	100	66,4
0,212	60,8	30,4	98,0	30,4	28,1	99,8	98,0	91,9	100	92,7	90,4	100	90,4	89,0	100	100	36,4
0,150	56,7	24,6	96,0	24,6	22,1	99,0	96,1	84,2	100	85,8	81,3	100	81,3	78,5	100	100	29,8
0,105	53,2	20,3	93,4	20,3	17,8	96,8	93,6	73,7	100	76,3	68,9	100	68,9	64,3	100	100	24,1
0,074	48,7	15,9	89,1	15,9	13,3	91,7	89,2	56,2	99,92	60,4	48,0	99,9	48,0	40,3	99,0	99,9	17,0
0,053	45,2	12,8	84,9	12,8	10,4	85,9	84,9	39,9	99,52	44,8	28,0	98,2	28,0	18,9	88,9	99,4	11,5
0,037	42,5	10,9	81,3	10,9	8,5	80,7	81,3	28,1	98,53	31,0	12,9	88,4	12,9	6,2	57,6	97,7	8,2

A Tabela 56 apresenta os índices de eficiência calculados para o cenário da simulação com granulometria grossa e eficiência do peneiramento reduzida (SIM 2A).

Tabela 56 - Índices de eficiência para a simulação SIM 2A.

Variáveis	Fluxo	Trommel	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneiramento da Rebitagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	50,0	43,0	32,7	45,0	14,0	31,5	6,4	18,0	33,0
	Grossos	93,4	87,2	86,2	82,8	67,2	67,6	61,2	63,0	65,2
	Finos	46,4	34,0	25,0	12,9	7,1	1,9	5,0	5,5	7,7
	Polpa (vol)	4,7	10,7	7,5	31,4	7,4	32,8	1,7	15,0	33,2
Partição para os Grossos (%)	Sólidos	14,1	34,3	33,4	84,5	55,1	96,8	24,5	76,1	86,9
	Água	1,0	3,8	2,6	14,4	4,4	21,3	1,1	9,8	22,9
d_{50C} (mm)		54,00	7,60	1,50	1,00	0,078	<0,010	0,027	0,033	0,039
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de -400# para os grossos)	76,2 mm	91,8%	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	91,1%	-	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	93,3%	89,6%	-	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	85,9%	24,1%	91,5%	68,3%	41,8%

III) SIM 2B - Granulometria grossa eficiência do peneiramento alta

Neste cenário considerou-se a distribuição granulométrica definida como grossos e eficiência de peneiramento tal qual.

A Figura 61 apresenta o fluxograma obtido para a SIM 2B contendo o sumário do respectivo balanço de massas, em termos de vazões de sólidos, vazões volumétricas de polpa, recuperações mássicas, porcentagens de sólidos, P₈₀ e porcentagens passante em 0,037 mm. Neste caso a simulação incluiu a vazão de rebitagem especificamente da linha 1. A Tabela 57 apresenta o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 2B para o circuito de granulado.

Figura 61 - Fluxograma SIM 2B.

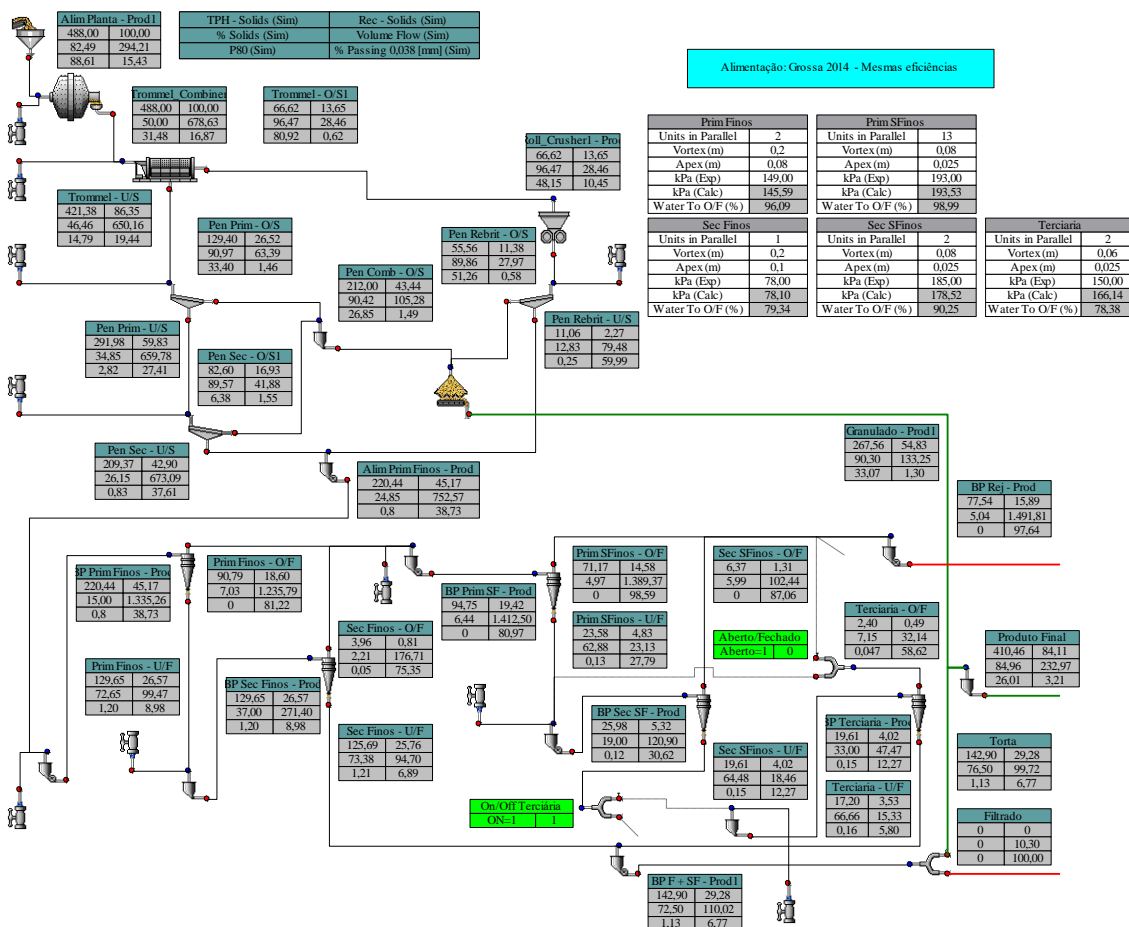


Tabela 57 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 2B).

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebritador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	488,0	488,0	66,6	421,4	421,4	129,4	292,0	66,6	66,6	66,6	55,6	11,1	292,0	82,6	209,4	267,6
Densidade dos Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	103,6	488,0	2,4	486	559	12,8	546	2,4	2,4	81,4	6,3	75,2	601	9,6	591	28,7
Porcentagem de Sólidos	82,5	50,0	96,5	46,5	43,0	91,0	34,9	96,5	96,5	45,0	89,9	12,8	32,7	89,6	26,1	90,3
Densidade da Polpa (t/m³)	2,01	1,44	2,43	1,39	1,36	2,24	1,27	2,43	2,43	1,38	2,21	1,08	1,25	2,20	1,19	2,22
Vazão de Polpa (m³/h)	294	679	28,5	650	723	63,4	660	28,5	28,5	107,5	28,0	79,5	715	41,9	673	133
P ₈₀ (mm)	88,6	31,5	80,9	14,8	14,8	33,4	2,82	80,9	48,2	48,2	51,3	0,25	2,82	6,4	0,829	33,1
Malha (mm)									% Passante							
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	86,119	97,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
76,2	72,325	93,4	62,4	100	100	100	100	62,4	98,5	98,5	98,6	100	100	100	100	100
50,8	60,603	86,1	5,2	98,9	98,9	96,5	100	5,2	82,7	82,7	79,3	100	100	100	100	94,0
25,40	51,000	77,0	2,8	88,7	88,7	63,2	100	2,8	43,4	43,4	32,1	100	100	100	100	68,1
12,70	43,574	67,0	2,5	77,2	77,2	25,7	100	2,5	27,6	27,6	13,2	100	100	100	100	46,0
8,00	39,840	60,4	2,2	69,6	69,6	10,7	95,7	2,2	23,7	23,7	8,5	100	95,7	84,9	100	33,2
6,350	38,529	58,1	2,1	67,0	67,0	5,5	94,2	2,1	22,3	22,3	6,9	100	94,2	79,6	100	28,7
2,380	31,385	46,8	1,7	54,0	54,0	4,1	76,1	1,7	19,2	19,2	3,1	99,9	76,1	16,7	99,4	7,8
1,190	27,000	39,4	1,4	45,4	45,4	3,4	64,0	1,4	17,2	17,2	0,66	98,3	64,0	4,5	87,4	3,2
0,590	23,151	32,3	1,2	37,2	37,2	2,8	52,5	1,2	15,5	15,5	0,59	90,6	52,5	3,1	71,9	2,4
0,212	19,257	24,3	0,9	28,0	28,0	2,1	39,5	0,9	13,3	13,3	0,58	77,4	39,5	2,3	54,2	1,8
0,150	18,632	22,6	0,8	26,1	26,1	2,0	36,8	0,8	12,7	12,7	0,58	73,6	36,8	2,1	50,5	1,7
0,105	18,095	21,2	0,8	24,4	24,4	1,8	34,5	0,8	12,1	12,1	0,58	69,8	34,5	2,0	47,3	1,6
0,074	16,993	19,4	0,7	22,4	22,4	1,7	31,5	0,7	11,5	11,5	0,58	66,2	31,5	1,8	43,3	1,5
0,053	16,080	17,9	0,7	20,7	20,7	1,5	29,2	0,7	10,9	10,9	0,58	63,0	29,2	1,7	40,0	1,4
0,037	15,434	16,9	0,6	19,4	19,4	1,5	27,4	0,6	10,4	10,4	0,58	60,0	27,4	1,6	37,6	1,3

A Tabela 58 apresentam o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 2B para o circuito de finos.

Tabela 58 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 2B).

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Terciária de Superfinos			Rejeito	Produto Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	220,4	129,7	90,8	129,7	125,7	4,0	94,7	23,6	71,2	26,0	19,6	6,4	19,6	17,2	2,4	77,5	142,9
Densidade dos Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	1249,1	48,8	1200	220,8	46	175,2	1375,5	13,9	1361,6	110,8	10,8	100,0	39,8	8,6	31,2	1461,5	54
Porcentagem de Sólidos	15,0	72,6	7,0	37,0	73,4	2,2	6,4	62,9	5,0	19,0	64,5	6,0	33,0	66,7	7,2	5,0	72,5
Densidade da Polpa (t/m ³)	1,10	1,79	1,04	1,29	1,81	1,01	1,04	1,62	1,03	1,13	1,65	1,04	1,25	1,68	1,05	1,03	1,79
Vazão de Polpa (m ³ /h)	1335	99,5	1236	271,4	95	176,7	1412,5	23,1	1389,4	120,9	18,5	102,4	47,5	15,3	32,1	1491,8	110
P ₈₀ (mm)	0,799	1,199	<0,010	1,199	1,214	0,050	0,000	0,131	<0,010	0,122	0,147	<0,010	0,147	0,160	0,047	<0,010	1,131
Malha (mm)	% Passante																
6,350	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	99,4	99,0	100	99,0	98,9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,1
1,190	88,0	79,6	100	79,6	79,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	81,5
0,590	72,8	53,9	100	53,9	52,4	100	100	99,9	100	99,9	99,9	100	99,9	99,9	100	100	58,1
0,212	55,4	25,6	97,9	25,6	23,3	99,3	97,9	91,7	100	92,5	90,0	100	90,0	88,6	100	100	31,2
0,150	51,6	20,6	95,9	20,6	18,2	97,5	96,0	83,9	100	85,3	80,6	100	80,6	77,9	100	100	25,4
0,105	48,4	17,0	93,3	17,0	14,6	94,1	93,3	73,3	100	75,8	67,9	100	67,9	63,5	100	100	20,5
0,074	44,4	13,2	89,0	13,2	10,8	87,6	88,9	55,7	99,92	59,7	46,7	99,9	46,7	39,4	99,1	99,9	14,3
0,053	41,2	10,6	84,8	10,6	8,4	80,9	84,6	39,6	99,55	44,2	26,8	97,8	26,8	18,0	89,3	99,4	9,5
0,037	38,7	9,0	81,2	9,0	6,9	75,3	81,0	27,8	98,59	30,6	12,3	87,1	12,3	5,8	58,6	97,6	6,8

A Tabela 59 apresenta os índices de eficiência calculados para o cenário da simulação com granulometria grossa e eficiência do peneiramento tal qual a da amostragem (2B).

Tabela 59 - Índices de eficiência para a simulação SIM 2B.

Variáveis	Fluxo	Trommel	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneiramento da Rebitagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	50,0	43,0	32,7	45,0	15,0	37,0	6,4	19,0	33,0
	Grossos	96,5	91,0	89,6	89,9	72,6	73,4	62,9	64,5	66,7
	Finos	46,5	34,9	26,1	12,8	7,0	2,2	5,0	6,0	7,2
Partição para os Grossos (%)	Polpa (vol)	4,2	8,8	5,9	26,0	7,4	34,9	1,6	15,3	32,3
	Sólidos	13,7	30,7	28,3	83,4	58,8	96,9	24,9	75,5	87,7
	Água	0,5	2,3	1,6	7,7	3,9	20,7	1,0	9,8	21,6
d_{50C} (mm)		54,40	8,66	2,09	1,10	0,078	<0,010	0,027	0,034	0,037
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de -400# para os grossos)	76,2 mm	92,4%	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	95,3%	-	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	98,0%	94,6%	-	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	86,4%	25,6%	91,5%	69,7%	41,5%

IV) SIM 3A - Granulometria fina e eficiência do peneiramento reduzida

Neste cenário considerou-se a distribuição granulométrica definida como finos e eficiência de peneiramento reduzida.

A Figura 62 apresenta o fluxograma obtido para a SIM 3A contendo o sumário do respectivo balanço de massas, em termos de vazões de sólidos, vazões volumétricas de polpa, recuperações mássicas, porcentagens de sólidos, P₈₀ e porcentagens passante em 0,037 mm. Neste caso a simulação incluiu a vazão de rebritagem especificamente da linha 1. A Tabela 60 apresenta o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 3A para o circuito de granulado.

Figura 62 - Fluxograma SIM 3A.

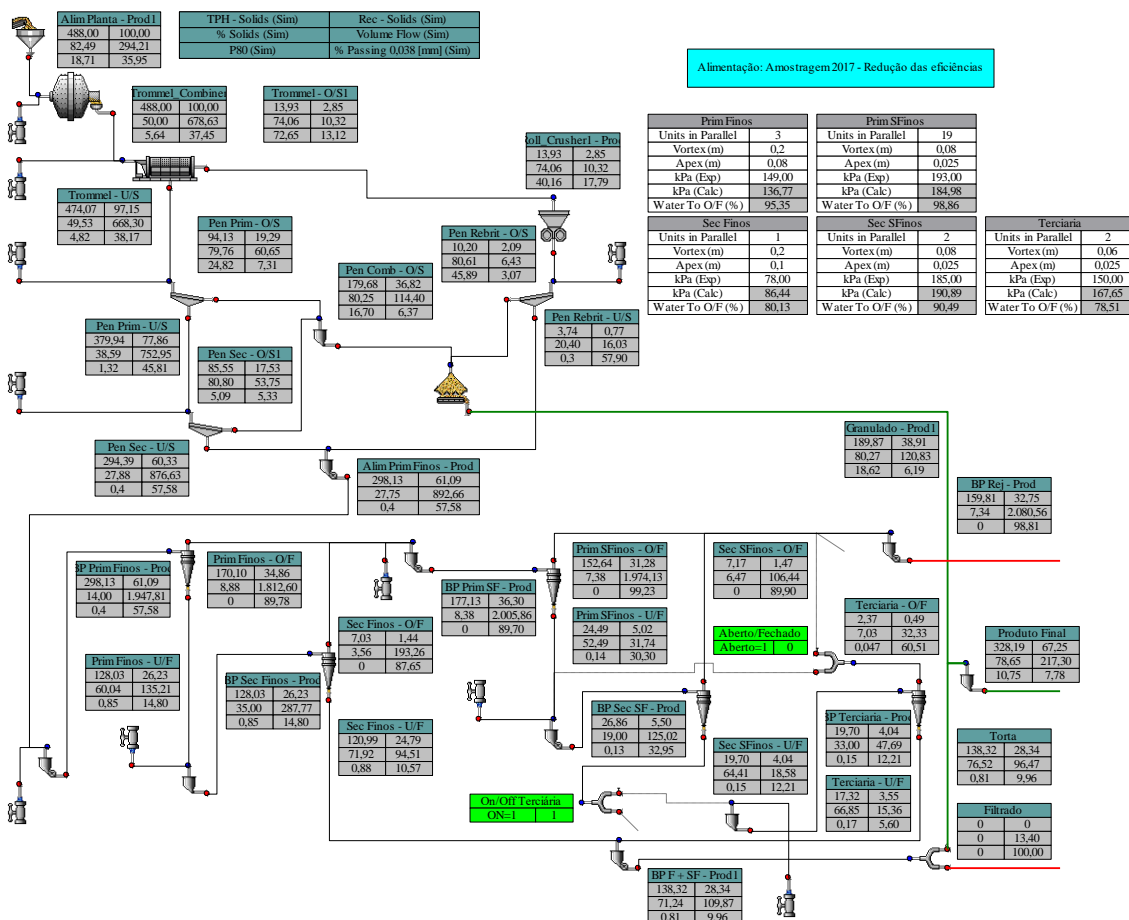


Tabela 60 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 3A).

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebritador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	488,0	488,0	13,9	474,1	474,1	94,1	379,9	13,9	13,9	13,9	10,2	3,7	379,9	85,6	294,4	189,9
Densidade dos Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	103,6	488,0	4,9	483	628	23,9	605	4,9	4,9	17,0	2,5	14,6	782	20,3	762	46,7
Porcentagem de Sólidos	82,5	50,0	74,1	49,5	43,0	79,8	38,6	74,1	74,1	45,0	80,6	20,4	32,7	80,8	27,9	80,3
Densidade da Polpa (t/m³)	2,01	1,44	1,82	1,43	1,36	1,95	1,31	1,82	1,82	1,38	1,97	1,14	1,25	1,97	1,20	1,96
Vazão de Polpa (m³/h)	294	679	10,3	668	814	60,6	753	10,3	10,3	22,5	6,4	16,0	930	53,7	877	121
P ₈₀ (mm)	18,7	5,6	72,6	4,8	4,8	24,8	1,32	72,6	40,2	40,2	45,9	0,30	1,32	5,1	0,397	18,6
Malha (mm)		% Passante														
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	98,855	99,8	97,3	100	100	100	100	97,3	100	100	100	100	100	100	100	100
76,2	97,562	99,5	83,3	100	100	100	100	83,3	99,7	99,7	99,8	100	100	100	100	100
50,8	94,277	98,3	51,8	99,7	99,7	98,4	100	51,8	89,7	89,7	85,9	100	100	100	100	98,5
25,40	84,455	94,5	36,2	96,2	96,2	81,0	100	36,2	56,0	56,0	39,9	100	100	100	100	87,4
12,70	73,768	87,7	31,6	89,4	89,4	46,6	100	31,6	43,7	43,7	23,0	100	100	99,8	100	69,3
8,00	68,759	82,8	29,5	84,4	84,4	28,9	98,1	29,5	39,7	39,7	17,7	100	98,1	91,7	100	56,6
6,350	67,000	81,1	28,7	82,7	82,7	22,7	97,5	28,7	38,4	38,4	15,8	100	97,5	88,9	100	52,2
2,380	58,003	71,3	25,1	72,6	72,6	15,1	86,9	25,1	33,4	33,4	9,0	100	86,9	42,5	99,8	27,1
1,190	52,997	64,4	22,6	65,6	65,6	13,0	78,6	22,6	30,1	30,1	4,55	99,8	78,6	19,5	95,8	15,5
0,590	47,153	56,0	19,7	57,1	57,1	11,1	68,5	19,7	26,5	26,5	3,07	90,3	68,5	10,8	85,3	10,5
0,212	40,757	45,9	16,1	46,8	46,8	9,0	56,2	16,1	22,0	22,0	3,07	73,6	56,2	6,9	70,5	7,7
0,150	39,713	43,8	15,4	44,7	44,7	8,6	53,6	15,4	21,0	21,0	3,07	69,9	53,6	6,5	67,3	7,3
0,105	38,854	42,1	14,7	42,9	42,9	8,2	51,5	14,7	20,1	20,1	3,07	66,6	51,5	6,1	64,7	7,0
0,074	37,647	40,2	14,1	40,9	40,9	7,8	49,1	14,1	19,2	19,2	3,07	63,1	49,1	5,8	61,7	6,7
0,053	36,658	38,6	13,5	39,3	39,3	7,5	47,2	13,5	18,4	18,4	3,07	60,2	47,2	5,5	59,3	6,4
0,037	35,952	37,5	13,1	38,2	38,2	7,3	45,8	13,1	17,8	17,8	3,07	57,9	45,8	5,3	57,6	6,2

A Tabela 61 apresentam o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 2B para o circuito de finos.

Tabela 61 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 3A).

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Secundária de Superfinos			Terciária de Superfinos			Rejeito	Produto Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	298,1	128,0	170,1	128,0	121,0	7,0	177,1	24,5	152,6	26,9	19,7	7,2	19,7	17,3	2,4	159,8	138,3
Densidade dos Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	1831,4	85,2	1746	237,8	47	190,5	1936,7	22,2	1914,5	114,5	10,9	103,6	40,0	8,6	31,4	2018,1	56
Porcentagem de Sólidos	14,0	60,0	8,9	35,0	71,9	3,6	8,4	52,5	7,4	19,0	64,4	6,5	33,0	66,8	7,0	7,3	71,2
Densidade da Polpa (t/m ³)	1,09	1,58	1,06	1,27	1,78	1,02	1,05	1,47	1,05	1,13	1,65	1,04	1,25	1,69	1,04	1,05	1,77
Vazão de Polpa (m ³ /h)	1948	135,2	1813	287,8	95	193,3	2005,9	31,7	1974,1	125,0	18,6	106,4	47,7	15,4	32,3	2080,6	110
P ₈₀ (mm)	0,396	0,849	<0,010	0,849	0,878	0,000	0,000	0,135	<0,010	0,127	0,155	<0,010	0,155	0,167	0,047	<0,010	0,810
Malha (mm)	% Passante																
6,350	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	99,8	99,5	100	99,5	99,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,6
1,190	95,9	90,3	100	90,3	89,8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,1
0,590	85,4	65,9	100	65,9	63,9	100	100	99,9	100	99,9	99,9	100	99,9	99,9	100	100	68,4
0,212	70,5	33,0	98,8	33,0	29,1	99,7	98,8	91,3	100	92,1	89,2	100	89,2	87,7	100	100	36,4
0,150	67,4	27,2	97,6	27,2	23,0	99,0	97,7	83,1	100	84,6	78,9	100	78,9	76,0	100	100	29,7
0,105	64,7	23,0	96,1	23,0	18,6	97,2	96,1	72,0	100	74,5	65,2	100	65,2	60,4	100	100	23,9
0,074	61,7	19,1	93,8	19,1	14,7	94,0	93,8	55,7	99,95	59,5	44,8	99,9	44,8	37,4	99,1	99,9	17,6
0,053	59,4	16,5	91,6	16,5	12,2	90,6	91,6	40,9	99,73	45,2	25,9	98,3	25,9	17,1	89,7	99,7	12,8
0,037	57,6	14,8	89,8	14,8	10,6	87,7	89,7	30,3	99,23	32,9	12,2	89,9	12,2	5,6	60,5	98,8	10,0

A Tabela 62 apresenta os índices de eficiência calculados para o cenário da simulação com granulometria fina e eficiência do peneiramento reduzida (SIM 3A).

Tabela 62 - Índices de eficiência para a simulação SIM 3A.

Variáveis	Fluxo	Trommel	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneiramento da Rebitagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	50,0	43,0	32,7	45,0	14,0	35,0	8,4	19,0	33,0
	Grossos	74,1	79,8	80,8	80,6	60,0	71,9	52,5	64,4	66,8
	Finos	49,5	38,6	27,9	20,4	8,9	3,6	7,4	6,5	7,0
Partição para os Grossos (%)	Polpa (vol)	1,5	7,5	5,8	28,6	6,9	32,8	1,6	14,9	32,2
	Sólidos	2,9	19,9	22,5	73,2	42,9	94,5	13,8	73,3	88,0
	Água	1,0	3,8	2,6	14,4	4,7	19,9	1,1	9,5	21,5
d_{50C} (mm)		54,00	7,60	1,50	1,00	0,077	<0,010	0,029	0,033	0,037
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de -400# para os grossos)	76,2 mm	97,6%	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	93,2%	-	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	94,4%	88,9%	-	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	89,0%	32,5%	95,3%	72,8%	40,4%

V) SIM 3B - Granulometria fina e eficiência do peneiramento alta

Neste cenário considerou-se a distribuição granulométrica definida como finos e eficiência de peneiramento tal qual a da amostragem.

A Figura 63 apresenta o fluxograma obtido para a SIM 3B contendo o sumário do respectivo balanço de massas, em termos de vazões de sólidos, vazões volumétricas de polpa, recuperações mássicas, porcentagens de sólidos, P₈₀ e porcentagens passante em 0,037 mm. Neste caso a simulação incluiu a vazão de rebitagem especificamente da linha 1. Tabela 63 apresenta o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 3B para o circuito de granulado.

Figura 63 - Fluxograma SIM 3B.

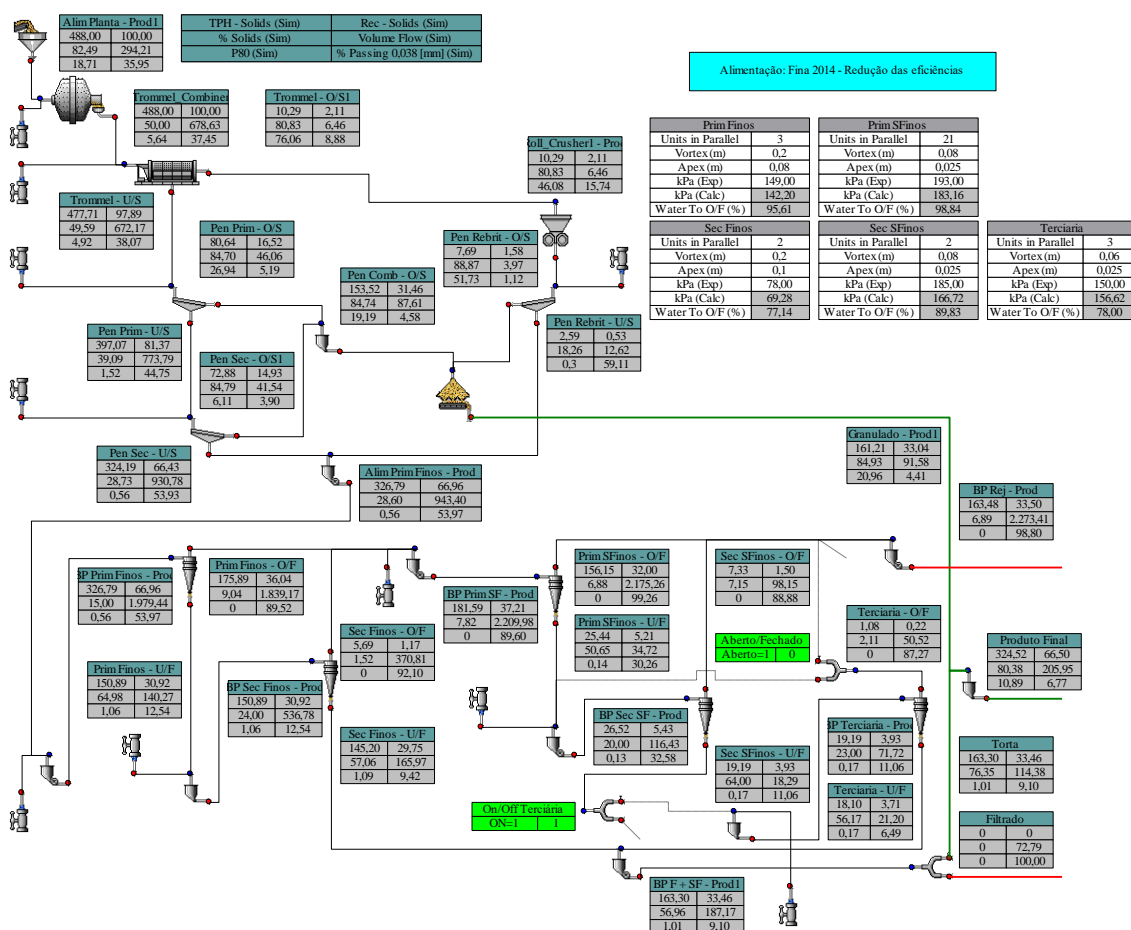


Tabela 63 - Balanço de massa para as operações de lavagem, rebitagem, peneiramento primário e secundário (SIM 3B).

Variáveis	ALM Usina	Trommel			Peneiramento Primário			Rebitador		Peneira da Rebitagem			Peneiramento Secundário			Produto Granulado
		ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	ALM	PT	ALM	O/S	U/S	ALM	O/S	U/S	
Vazão de Sólidos (t/h)	488,0	488,0	10,3	477,7	477,7	80,6	397,1	10,3	10,3	10,3	7,7	2,6	397,1	72,9	324,2	161,2
Densidade dos Sólidos (t/m³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	103,6	488,0	2,4	486	633	14,6	619	2,4	2,4	12,6	1,0	11,6	817	13,1	804	28,6
Porcentagem de Sólidos	82,5	50,0	80,8	49,6	43,0	84,7	39,1	80,8	80,8	45,0	88,9	18,3	32,7	84,8	28,7	84,9
Densidade da Polpa (t/m³)	2,01	1,44	1,97	1,43	1,36	2,07	1,31	1,97	1,97	1,38	2,18	1,13	1,25	2,07	1,21	2,07
Vazão de Polpa (m³/h)	294	679	6,5	672	820	46,1	774	6,5	6,5	16,6	4,0	12,6	972	41,5	931	92
P ₈₀ (mm)	18,7	5,6	76,1	4,9	4,9	26,9	1,52	76,1	46,1	46,1	51,7	0,30	1,52	6,1	0,561	21,0
Malha (mm)		% Passante														
127	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
101,6	98,86	99,8	99,8	100	100	100	100	99,8	99,9	99,9	100,0	100	100	100	100	100
76,2	97,56	99,5	80,2	100	100	100	100	80,2	98,1	98,1	98,2	100	100	100	100	99,9
50,8	94,28	98,3	27,8	99,8	99,8	99,1	100	27,8	84,0	84,0	78,6	100	100	100	100	98,5
25,40	84,46	94,5	22,5	96,1	96,1	76,7	100	22,5	51,8	51,8	35,5	100	100,0	100,0	100	85,3
12,70	73,77	87,7	20,8	89,2	89,2	35,8	100	20,8	38,7	38,7	18,0	100	100	100	100	64,0
8,00	68,76	82,8	19,6	84,2	84,2	18,1	97,6	19,6	34,8	34,8	12,7	100,0	97,6	87,0	100,0	49,0
6,350	67,00	81,1	19,2	82,4	82,4	11,9	96,8	19,2	33,4	33,4	10,9	100,0	96,8	82,5	100,0	43,7
2,380	58,00	71,3	16,9	72,4	72,4	9,9	85,1	16,9	29,1	29,1	5,2	99,9	85,1	20,4	99,6	14,4
1,190	53,00	64,4	15,3	65,4	65,4	8,9	76,9	15,3	26,3	26,3	1,26	98,2	76,9	7,8	92,4	8,1
0,590	47,15	56,0	13,3	57,0	57,0	7,8	67,0	13,3	23,3	23,3	1,12	89,1	67,0	6,0	80,7	6,7
0,212	40,76	45,9	10,9	46,7	46,7	6,4	54,9	10,9	19,6	19,6	1,12	74,3	54,9	4,8	66,1	5,4
0,150	39,71	43,8	10,4	44,6	44,6	6,1	52,4	10,4	18,7	18,7	1,12	70,8	52,4	4,6	63,1	5,2
0,105	38,85	42,1	10,0	42,8	42,8	5,8	50,3	10,0	17,9	17,9	1,12	67,5	50,3	4,4	60,6	5,0
0,074	37,65	40,2	9,5	40,8	40,8	5,6	48,0	9,5	17,0	17,0	1,12	64,3	48,0	4,2	57,8	4,7
0,053	36,66	38,6	9,2	39,2	39,2	5,3	46,1	9,2	16,3	16,3	1,12	61,5	46,1	4,0	55,6	4,5
0,037	35,95	37,5	8,9	38,1	38,1	5,2	44,7	8,9	15,7	15,7	1,12	59,1	44,7	3,9	53,9	4,4

A Tabela 64 apresentam o detalhamento dos resultados do balanço de massas da simulação SIM 2B para o circuito de finos.

Tabela 64 - Balanço de massa para as operações de ciclonagem primária e secundária de finos e superfinos e terciária de superfinos (SIM 3B).

Variáveis	Primária de Finos			Secundária de Finos			Primária de Superfinos			Ciclones - Secundária de Superfinos			Terciária de Superfinos			Rejeito	Produto Fino
	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F	ALM	U/F	O/F		
Vazão de Sólidos (t/h)	326,8	150,9	175,9	150,9	145,2	5,7	181,6	25,4	156,1	26,5	19,2	7,3	19,2	18,1	1,1	163,5	163,3
Densidade dos Sólidos (t/m ³)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
Vazão de Água (t/h)	1851,8	81,3	1770	477,8	109	368,6	2139,0	24,8	2114,3	106,1	10,8	95,3	64,2	14,1	50,1	2209,5	123
Porcentagem de Sólidos	15,0	65,0	9,0	24,0	57,1	1,5	7,8	50,7	6,9	20,0	64,0	7,1	23,0	56,2	2,1	6,9	57,0
Densidade da Polpa (t/m ³)	1,10	1,66	1,06	1,17	1,53	1,01	1,05	1,45	1,04	1,14	1,64	1,05	1,16	1,52	1,01	1,04	1,53
Vazão de Polpa (m ³ /h)	1979	140,3	1839	536,8	166	370,8	2210,0	34,7	2175,3	116,4	18,3	98,1	71,7	21,2	50,5	2273,4	187
P ₈₀ (mm)	0,558	1,060	<0,010	1,060	1,086	0,000	0,000	0,139	<0,010	0,135	0,166	<0,010	0,166	0,172	0,000	<0,010	1,008
Malha (mm)	% Passante																
6,350	100	100	100	100	100	100	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2,380	99,6	99,2	100	99,2	99,2	100	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100	99,3
1,190	92,5	83,7	100	83,7	83,1	100	100,0	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100	84,9
0,590	80,7	58,3	100	58,3	56,6	100	100,0	99,9	100	99,9	99,9	100	99,9	99,9	100	100	61,4
0,212	66,2	28,3	98,6	28,3	25,5	100	98,7	90,6	100	91,0	87,6	100	87,6	86,8	100	100	32,3
0,150	63,2	23,3	97,4	23,3	20,3	99,8	97,5	82,3	100	83,0	76,5	100	76,5	75,1	100	100	26,3
0,105	60,6	19,6	95,9	19,6	16,5	99,1	96,0	71,3	100	72,5	62,0	100	62,0	59,7	100	100	21,3
0,074	57,9	16,2	93,6	16,2	13,1	97,2	93,7	55,3	99,95	57,1	40,7	99,8	40,7	37,2	99,9	99,9	15,7
0,053	55,6	14,0	91,4	14,0	10,8	94,7	91,5	40,7	99,75	43,1	22,2	97,6	22,2	17,7	98,3	99,7	11,6
0,037	54,0	12,5	89,5	12,5	9,4	92,1	89,6	30,3	99,26	32,6	11,1	88,9	11,1	6,5	87,3	98,8	9,1

A Tabela 65 apresenta os índices de eficiência calculados para o cenário da simulação com granulometria fina e eficiência do peneiramento tal qual a da amostragem (SIM 3B).

Tabela 65 - Índices de eficiência para a simulação SIM 3B.

Variáveis	Fluxo	<i>Trommel</i>	Peneiramento de Grossos	Peneiramento de Intermediários	Peneiramento da Rebritagem	Primária de Finos	Secundária de Finos	Primária de Superfinos	Secundária de Superfinos	Terciária de Superfinos
% Sólidos	Alimentação	50,0	43,0	32,7	45,0	15,0	24,0	7,8	20,0	23,0
	Grossos	80,8	84,7	84,8	88,9	65,0	57,1	50,7	64,0	56,2
	Finos	49,6	39,1	28,7	18,3	9,0	1,5	6,9	7,1	2,1
Partição para os Grossos (%)	Polpa (vol)	1,0	5,6	4,3	23,9	7,1	30,9	1,6	15,7	29,6
	Sólidos	2,1	16,9	18,4	74,8	46,2	96,2	14,0	72,3	94,4
	Água	0,5	2,3	1,6	7,7	4,4	22,9	1,2	10,2	22,0
<i>d</i> _{50C} (mm)		54,40	8,66	2,09	1,10	0,079	<0,010	0,028	0,036	0,027
Eficiência de Finos (100% - <i>bypass</i> de - 400# para os grossos)	76,2 mm	98,4%	-	-	-	-	-	-	-	-
	8,0 mm	-	96,4%	-	-	-	-	-	-	-
	1,2 mm	-	-	98,1%	94,2%	-	-	-	-	-
	0,037 mm	-	-	-	-	89,3%	27,7%	95,3%	75,4%	55,4%

