UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

DANIELA GIROTO AMORIM

BALANÇO HÍDRICO DE LAGOA DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE BAUXITA NO OESTE DO PARÁ

OURO PRETO

2018

DANIELA GIROTO AMORIM

BALANÇO HÍDRICO DE LAGOA DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE BAUXITA NO OESTE DO PARÁ

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira de Minas.

OURO PRETO

2018

A524b Amorim, Daniela Giroto.
Balanço hídrico de lagoa de espessamento de rejeito de bauxita no oeste do Pará [manuscrito] / Daniela Giroto Amorim. - 2018.

53f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Beneficiamento de minério. 2. Bauxita. 3. Balanço hidrológico. I. Oliveira Filho, Waldyr Lopes de . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 622.79

Catalogação: ficha.sisbin@ufop.edu.br

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 10 dias do mês de dezembro de 2018, às 15h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado ***"BALANÇO HIDRICO DE LAGOA DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE BAUXITA NO OESTE DO PARÁ"***, pela aluna **Daniela Giroto Amorrim**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Waldyr Lopes de oliveira Filho (orientador), Prof. Dr. Hernani Mota de Lima e Prof. Dr. José Margarida da Silva.**

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovação da candidata, com a nota 10 concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 10 de dezembro de 2018.

Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima
Membro da Comissão Avaliadora

Prof. Dr. José Margarida da Silva
Membro da Comissão Avaliadora

Daniela Giroto Amorim
Daniela Giroto Amorim

Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por toda confiança e apoio nessa caminha e minha irmã Andrea pelo companheirismo.

À Universidade Federal de Ouro Preto, ao Departamento de Engenharia de Minas e a todos os professores pelos conhecimentos recebidos e ensino de qualidade.

Ao professor e orientador Dr. Waldyr Lopes pelo incentivo, por toda confiança na realização deste trabalho e pelo exemplo constante em fazer o melhor.

À Alcoa pela oportunidade de aprendizado durante o estágio. À Equipe de Produção, em especial à equipe SCDR pelo auxilio na realização deste trabalho.

Aos amigos de Ouro Preto e Juruti por compartilharem tantos momentos.

À República Patotinha pela acolhida e amizade.

RESUMO

O beneficiamento de bauxita demanda uma lavabilidade eficiente do minério para retirada de argila e ultrafinos. Em ambientes de mineração cujo sistema é dependente de fluxos de água, o controle do volume de água necessário para garantia de uma lavagem adequada é realizado através de simulações de balanço hídrico. O presente trabalho apresenta uma análise do balanço hídrico da Lagoa de Espessamento de rejeito de bauxita no Oeste do Pará. O controle de dados de entradas e saídas de água do sistema mostra o comportamento do volume de água disponível ao longo do ano, assim como possibilitou a previsão do volume da lagoa ao longo do próximo ano. Juntamente com o estudo hídrico, a taxa de desassoreamento do sistema foi obtida para análise do nível da Lagoa de Espessamento durante este período. Após essas análises, o plano de dragagem foi estruturado, de forma a assegurar a operacionalidade da mina e garantir o volume de água disponível na Planta de Lavagem.

Palavras-chave: Balanço hídrico, bauxita, rejeito, lagoa de espessamento, água.

ABSTRACT

Bauxite beneficiation demands an efficient washability to eliminate clay and ultrafines. Water balance studies are required in mine sites that relay on water reutilization to assure its availability and the process quality. This study presents Juruti's Mine Settling Ponds (Alcoa) water balance analysis. The available water volume during 2018 and 2019 predictions were obtained considering inputs and outputs data controls. Besides the water study, the desilting rate was calculated in order to analyse the settling ponds level during these periods. Through this study, the dredge planning was established in order to guarantee mine operation and available water volume at Washing Plant.

Keywords: Water balance, bauxite, tailings, settling pond, water.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do beneficiamento de bauxita....16
Figura 2 - Localização da Mina de Juruti....17
Figura 3 - Perfil litológico - Platô Capiranga....18
Figura 4 - Sistema de Contenção de Rejeitos Alcoa Juruti....21
Figura 5 - Vista aérea das lagoas - Mina Juruti....22
Figura 6 - Seção da Lagoa de Espessamento....25
Figura 7 - Canaletas de drenagem super0ficial na LE....26
Figura 8 - Croqui esquemático com entradas e saídas da LE....28
Figura 9 - Pluviometria histórica registrada pela Estação Metereológica....29
Figura 10 - Drenagem das pilhas de estoque e transbordo de tanque....31
Figura 11 - Percentual de sólidos após 7 dias de sedimentação....32
Figura 12 - Sistema de captação de água no Lago Grande Juruti....34
Figura 13 - Bombas flutuantes para recuperação de água do rejeito dragado....35
Figura 14 - Evaporação média anual....36
Figura 15 - Área de bombeamento de água para a Usina....37
Figura 16 - Draga a Diesel na LE....38
Figura 17 - Atividade de batimetria para monitoramento do volume de água....39
Figura 18 - Confiabilidade da instrumentação (Panorama inicial)....40
Figura 19 - Confiabilidade da instrumentação (Panorama final)....40
Figura 20 - Desassoreamento na LE....44
Figura 21 - Volume de Água Disponível na LE....44
Figura 22 - Nível da Lagoa de Espessamento....45

ÍNDICE DE TABELA

Tabela 1 - Caracterização do rejeito 22
Tabela 2 - Dados Gerais da LE 23
Tabela 3 - Saldo de Desassoreamento na LE (Massa seca em t) 43
Tabela 4 - Plano de Dragagem na LE 46

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ALCOA: *Aluminium Company of America*

LE: Lagoa de Espessamento

LD1: Lagoa de Disposição 1

LD2: Lagoa de Disposição 2

LD3: Lagoa de Disposição 3

LD4: Lagoa de Disposição 4

LD5: Lagoa de Disposição 5

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10

2 OBJETIVOS 11

2.1 Objetivos gerais 11

2.2 Objetivos específicos 11

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12

3.1 Balanço Hídrico 12

3.1.1 Evaporação 12

3.1.2 Pluviometria 13

3.1.3 Balanço Hídrico em Barragens de Rejeito 13

3.1.4 Instrumentação 14

3.2 Bauxita 14

3.2.1 Mineral minério 14

3.2.2 Beneficiamento 15

3.2.3 Produção e Disposição de rejeitos de bauxita 15

3.3 Alcoa Juruti 17

3.3.1 Geologia do jazimento 17

3.3.2 Lavra 18

3.3.3 Beneficiamento 19

3.3.4 Disposição de rejeitos 20

3.4 Lagoa de Espessamento 21

3.4.1 Operação 21
3.4.2 Dique de contenção 24
3.4.3 Manejo de água 25

4 MATERIAIS E MÉTODOS 27

4.1 Dados e premissas utilizados 27

4.2 Parâmetros de entrada 28

4.2.1 Pluviometria 28
4.2.2 Água de Drenagem da Planta e Pilhas de Estoque 30
4.2.3 Água liberada pelo Rejeito 31
4.2.4 Captação de Água Nova 33
4.2.5 Retorno de Água das Lagoas de Disposição 34

4.3 Parâmetros de saída 35

4.3.1 Evaporação 35
4.3.2 Infiltração 36
4.3.3 Água de Processo 36
4.3.4 Dragagem 37

4.4 Batimetria 39

4.5 Melhoria em instrumentação 40

4.6 Balanço hídrico diário 41

4.7 Validação dos dados 41

4.8 Balanço hídrico 2019 41

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 43

6 CONCLUSÃO 47

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48

APÊNDICE A – TABELA BASE DE CÁLCULOS (ENTRADAS) 50

APÊNDICE B – TABELA BASE DE CÁLCULOS (SAÍDAS) 51

1 INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil ocupa posição de destaque no setor produtivo, tendo exercido forte impacto desde os tempos do Brasil Colônia. O desenvolvimento dessa atividade está atrelado ao desenvolvimento de tecnologias para aperfeiçoamento dos processos produtivos e melhoria da qualidade de vida. No entanto, o ciclo produtivo da mineração é dependente do uso contínuo de água em quase todas as etapas da engenharia mineral.

A água é considerada um recurso estratégico para o desenvolvimento de uma mineração sustentável. Devido ao consumo elevado de água, a indústria mineral tem investido em tecnologias para melhor aproveitamento da água captada para este fim industrial, de forma a otimizar o uso deste recurso e diminuir os investimentos em captação de água externa.

O beneficiamento da bauxita não envolve processos de tratamento elaborados, como, por exemplo, o tratamento realizado em minério de ferro. Na maioria dos casos, devido à elevada disponibilidade de bauxita com alto teor de (Al_2O_3), etapas de concentração mineral não são necessárias. Sendo assim, o beneficiamento de bauxita consiste em uma lavagem do material para retirada de finos e ultrafinos, garantindo teor adequado no fim do processo. Para atingir uma lavabilidade eficiente, é necessário um consumo elevado de água.

Para garantir o volume de água suficiente para operações adequadas, o reaproveitamento da água no processo aparece como medida ímpar para uma mineração eficiente. Na Mina de Juruti, no estado do Pará, a recirculação da água consumida pela Usina de Beneficiamento ocorre através da recuperação de água da Lagoa de Espessamento, onde ocorre o espessamento natural do rejeito proveniente do beneficiamento da bauxita.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta um estudo de balanço hídrico da Lagoa de Espessamento da Mina de Juruti (Alcoa) para controle de entrada/saída de água na barragem, a fim de garantir o volume de água disponível adequado para lavabilidade do minério.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O objetivo principal deste trabalho é calcular o balanço hídrico da lagoa de espessamento no sistema de disposição de rejeitos da Mina de Juruti, no Pará. Por meio do balanço hídrico será possível estimar o volume de água disponível ao longo de todo o ano, garantindo assim a estabilidade das operações.

2.2 Objetivos específicos

I. Mapear as entradas e saídas de água/material na LE
II. Verificar a instrumentação para coleta de dados representativos
III. Calcular o volume de água disponível
IV. Comparar os dados do balanço com os dados da batimetria
V. Verificar possíveis melhorias para controle do volume de água

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Balanço Hídrico

O conceito de Balanço Hídrico é baseado, em linhas gerais, na Equação de Continuidade da Massa. A relação da quantidade de matéria que entra em um sistema, durante um determinado intervalo de tempo, com a quantidade de matéria que sai do mesmo corresponde à variação de volume neste período, como mostra a Equação 1:

$$\Delta V = \sum I - \sum O \tag{1}$$

Onde:

ΔV: Variação de volume em um determinado intervalo de tempo

ΣI: Somatório do volume de água que entra no sistema

ΣO: Somatório do volume de água que sai no sistema

Segundo Tomaz (2010), a avaliação de cada parâmetro desta equação é primordial para obtenção de um balanço representativo de um sistema. O conhecimento destes diferentes componentes é necessário para composição do balanço hídrico, sendo que há fatores presentes no ciclo hidrológico e nas condições do solo local que devem ser levados em consideração para o entendimento, como precipitação, evapotranspiração, condições do solo e uso do solo.

3.1.1 Evaporação

A evaporação consiste em um fenômeno físico no qual um líquido passa ao estado gasoso, sendo dependente da radiação solar, temperatura do ar, o vento e a pressão de vapor. Importante fase do ciclo hidrológico, este processo acontece quando a água líquida é transformada em vapor de água e transferida para a atmosfera, sendo para este processo necessária a presença de energia no sistema (SILVA, 2012).

Para análise de evaporação é necessário avaliar a superfície a ser considerada uma vez que alguns fatores podem limitar essa taxa de evaporação. Em regiões áridas, o baixo volume de água disponível pode afetar a evaporação, acarretando em uma evaporação real inferior à evaporação potencial. Esta evaporação potencial (EP) é definida como a evaporação ocorrente em uma superfície livre de água, sob condições climáticas estáveis.

Com a liberação de água pelo solo, a sucção aumenta. Com isso, uma quantidade de energia maior é necessária para retirar mais água para a atmosfera. Com o aumento da sucção, a permeabilidade diminui, inibindo a perda de água pelo solo. Em solos arenosos e argilosos

com o teor de umidade alto ou próximo à capacidade de campo, a evaporação real é igual à evaporação potencial. A relação entre a taxa de evaporação real da superfície do solo e a taxa de evaporação potencial é uma função da água disponível, da textura do solo e da taxa de secagem (SILVA, 2003).

A evaporação real (ER) pode ser calculada em função da evaporação potencial e da sucção do solo, através da Equação 2, elaborada por Wilson (1994):

$$ER = EP\left(\frac{1-e^{\frac{\psi W}{RT}}}{1-RH}\right) \quad (2)$$

Onde:

ER: evaporação real (mm/dia)

EP: evaporação potencial (mm/dia)

RH: umidade relativa do ar acima da superfície do solo

ψ: sucção total no solo (kPa)

W: peso molecular da água (0,018 kg/mol)

3.1.2 Pluviometria

Através do ciclo hidrológico, o vapor resultante da evaporação é transportado pelo movimento das massas. Sob determinadas condições, ocorre a condensação deste vapor, gerando nuvens com posterior precipitação. Esta precipitação pode ocorrer de diversas formas, sendo que a maior parte da água permanece retida temporariamente no solo onde caiu, retornando para a atmosfera através de evaporação e transpiração. O restante da água de precipitação escoa sob a superfície e outra parte penetra no solo, abastecendo reservatórios subterrâneos.

No Brasil, os dados de pluviometria evidenciam uma elevada heterogeneidade na distribuição de chuvas devido à variabilidade climática no país, justificada pela sua extensão. Para análise dos índices pluviométricos, é necessário analisar a sazonalidade e os dados temporais diários e mensais, uma vez que as chuvas podem ser bem distribuídas ao longo do ano ou concentradas em épocas específicas.

3.1.3 Balanço Hídrico em Barragens de Rejeito

O uso eficiente da água na mineração ocupa papel estratégico na busca por processos mais eficientes e sustentáveis. A reutilização da água reduz os investimentos em água captada,

propiciando economia e menor impacto ao meio ambiente. O setor mineral tem se beneficiado com a recuperação de água proveniente da decantação do rejeito em barragens, reaproveitando essa água no processo industrial (CELLA, MICHELUZZI, *et al.*, 2015).

O rejeito em forma de polpa, segundo Chammas (1989), possui três etapas de comportamento:

I. Comportamento de lâmina líquida, com floculação das partículas de menor tamanho.
II. Em processo de sedimentação, apresentando comportamento semilíquido e semi-viscoso.
III. Em processo de adensamento, comportando-se como um solo. É importante mencionar que o rejeito não é propriamente um solo, mas para fins geotécnicos seu comportamento é considerado equivalente a de um solo com características de baixa resistência ao cisalhamento.

No que diz respeito a recuperação de água, a sedimentação e o adensamento são responsáveis por aproximadamente 99% deste processo, sendo o restante a cargo do dessecamento e desaturação do material (FILHO e ZYL, 2006).

Dessa forma, o balanço hídrico é indispensável para verificação da viabilidade do reaproveitamento de água em barragens, assim como a quantificação do recurso necessário.

3.1.4 Instrumentação

A elaboração do estudo de balanço hídrico de barragens demanda um controle das variáveis de processos através da instrumentação. Segundo Brandão (2016), a instrumentação consiste na ciência que aplica e desenvolve técnicas para adequação de dispositivos com a finalidade de medir, registrar, converter e controlar variáveis físicas em equipamentos nos processos industriais. Em sua maioria, mensuram e controlam parâmetros físicos e químicos como vazão, densidade, pressão, ph, condutividade e velocidade.

A implementação de um sistema de instrumentação calibrado, automático e eficiente de controle reduz custos de operação, de manutenção e de produtos fora de especificação, além de promover melhorias operacionais no processo ocasionando em aumento de produtividade.

3.2 Bauxita

3.2.1 Mineral minério

A bauxita é um minério com coloração avermelhada formado em regiões tropicais e subtropicais devido à ação do intemperismo sobre rochas aluminossilicatadas. Apesar de sua

frequente descrição como minério de alumínio, a bauxita é um material heterogêneo composto por uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados, contendo impurezas (CONSTANTINO, ARAKI, *et al.*, 2002).

Seus principais constituintes são a gibbsita e polimorfos boehmita e diásporo, sendo que a proporcionalidade entre eles é variável de acordo com o local. As bauxitas ricas em gibbsita (possuem maior interesse comercial) são geologicamente mais novas e encontram-se em grandes depósitos em regiões como Jamaica, Austrália, Brasil, Guiana e Índia. O material mais rico em boehmita está presente em depósitos europeus e a concentração elevada em diaspório na China e Romênia (LAIRD, 1997).

3.2.2 Beneficiamento

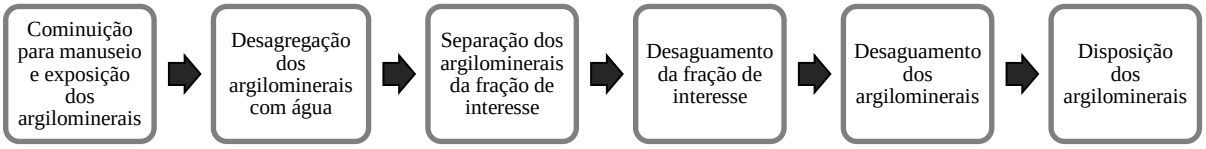
O principal constituinte da bauxita é a alumina (Al_2O_3), que corresponde a mais de 40% de sua composição. A alumina é a principal fonte natural para obtenção do alumínio, sendo um dos elementos em maior abundância na crosta terrestre, perdendo apenas para oxigênio e silício. Para obtenção do alumínio primário, tem-se dois processos envolvidos. Primeiramente, através do processo Bayer, ocorre a extração da alumina (óxido de alumínio). A alumina sofre processo de redução eletrolítica conhecido como Hall Herolt, produzindo o alumínio primário.

Cerca de 85% da bauxita produzida é utilizada para a produção de alumina. Os demais 15% são utilizados para fabricação de refratários, abrasivos, cimento e agentes de sustentação (DEURSEN, 2016). Para produção de uma tonelada de alumínio, são necessárias duas toneladas de alumina, cuja produção demanda cinco a sete toneladas de bauxita.

3.2.3 Produção e Disposição de rejeitos de bauxita

Segundo Deursen (2016), o beneficiamento de bauxita passa tipicamente pelas seguintes etapas:

Figura 1 - Etapas do beneficiamento de bauxita



Estima-se que anualmente são produzidos mais de 26 milhões de toneladas de rejeito de bauxita em todo mundo, sendo mais de 14 milhões no Brasil. Para desaguamento deste rejeito, as alternativas são:

I. Desaguamento natural: o rejeito do beneficiamento é disposto em diques. A água liberada retorna ao processo;
II. Desaguamento com espessamento: o rejeito é floculado e espessado (com recuperação imediata de água) antes de ser lançado. Em seguida, é lançado em diques, com retorno da água liberada para o processo;
III. Desaguamento mecânico com espessador e centrífugas: o rejeito é primeiramente espessado, e em seguida alimenta as centrífugas;
IV. Desaguamento mecânico com espessador e filtro: o rejeito é espessado e, em seguida alimenta o filtro;

Após o desaguamento, o rejeito é encaminhado para disposição permanente em estruturas adequadas para este fim. As diferentes opções para disposição são dependentes do modo de desaguamento adotado (em forma de polpa ou sólido). Para disposição final, tem-se:

I. Diques: o rejeito é disposto em diques para sedimentação. O tamanho destes diques varia em função do volume de material produzido e do % de sólidos;
II. Reaterro de tiras exauridas: o rejeito é disposto em áreas exauridas;

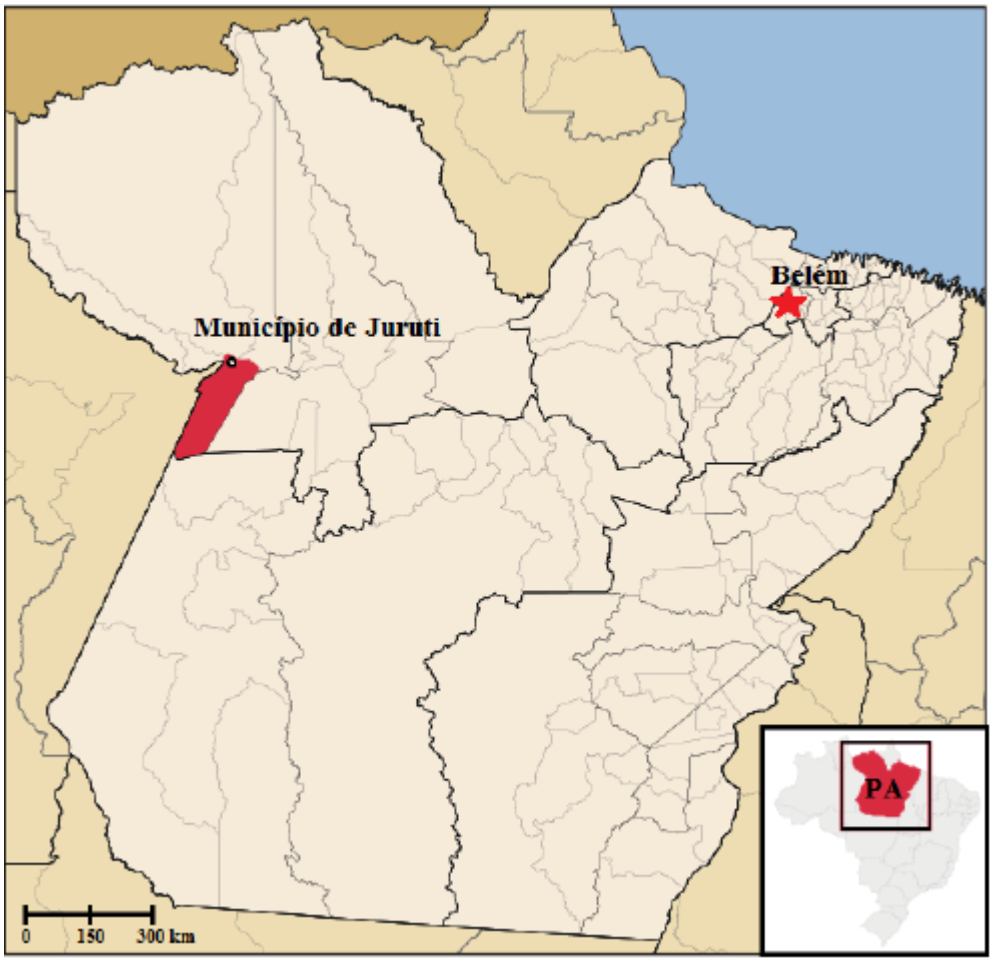
O método de disposição a ser adotado leva em consideração a escala de produção do empreendimento, o custo operacional, eficiência de processo e adequação ambiental. Outros fatores importantes são o consumo de água, a área ocupada pelo depósito e os perigos e descomissionamento de cada método. Segudo Deursen (2016), a opção cujo desembolso é menor no período de operação e com menor risco é o desaguamento com centrífugas e disposição do material em áreas já lavradas.

3.3 Alcoa Juruti

3.3.1 Geologia do jazimento

A unidade Juruti situa-se na margem direita do rio Amazonas, no município de Juruti, extremo oeste do Estado do Pará. Possui um dos maiores depósitos de bauxita de alta qualidade do mundo, com uma reserva estimada em 700 milhões de toneladas métricas (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV, 2009). O empreendimento possui a área de lavra, beneficiamento, ferrovia e um terminal portuário às margens do rio Amazonas.

Figura 2 - Localização da Mina de Juruti



As jazidas encontram-se dentro da unidade de relevo denominada de Bacia Sedimentar Amazônica, no planalto rebaixado da Amazônia – Médio Amazonas. Nesta área são observados platôs em cujos topos se encontram os depósitos de Bauxita Laterítica e por uma região intermediária formada por pequenas colinas, com altitudes de 35 a 90 m, que circunda estes platôs (BRETAS, 2014). O perfil litológico da área da mina de Juruti (Figura 3) pode ser descrito abaixo. Partindo-se do topo para a base, tem-se:

I. Solo Orgânico: Formado por material decomposto, apresentando uma espessura média de 30 cm.

II. Argila de decapeamento: Espessura variando de 1 a 12 m, composta por argila amarela a amarela escura, também chamada de Argila Belterra.

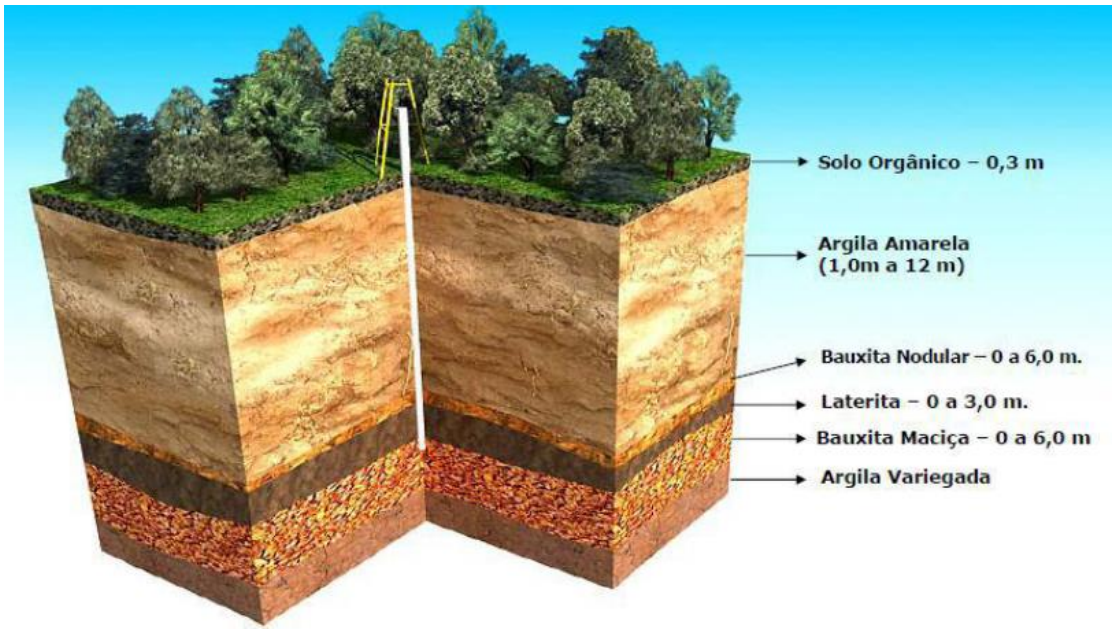
III. Bauxita Nodular: Esse horizonte pode chegar a uma espessura de 6 m e é representado por nódulos de gibbsita de tamanho variado dentro de uma matriz caulinítica.

IV. Laterita Ferruginosa: A espessura desta camada pode variar de poucos centímetros a 3 m. Esse horizonte é bem característico por causa da presença de altas concentrações de Fe_2O_3.

V. Bauxita Maciça: Trata-se de um horizonte com espessura de poucos centímetros a 6 m, formado essencialmente por gibbsita, hematita e caulinita.

VI. Argila Variegada: Composto de argila caulinítica de cores variegadas, predominando o avermelhado e o arroxeado, eventualmente alguma gibbsita.

Figura 3 - Perfil litológico - Platô Capiranga



3.3.2 Lavra

O depósito de Juruti sendo um horizonte laterítico utiliza-se o método de lavra a céu aberto tipo por tiras (*strip mining*), para um melhor aproveitamento desta reserva. Nesse método, consagrado internacionalmente na lavra de jazidas do tipo camada, o minério e o estéril são removidos ao longo de cortes paralelos de pequena largura e grandes comprimentos,

denominados tiras. As dimensões das tiras na mina de bauxita de Juruti são de 25 metros de largura e 200 metros de comprimento. O estéril removido em uma tira é depositado na tira imediatamente anterior, de onde já foi removido o minério, promovendo, deste modo, o descobrimento da camada de minério nesta tira. Por conjugar as operações de lavra do minério com a disposição do estéril, evitando a ocupação de novas áreas e os impactos ambientais decorrentes, o método de lavra em tiras é considerado um dos mais corretos sob a óptica ambiental (ALCOA, 2015). No caso de uma abertura, o método de retirada de bauxita inicia-se com o decapeamento e lavra a céu aberto. Para o aproveitamento das reservas de bauxita existentes no platô Capiranga, é utilizado o método de lavra em tiras ou faixas (strip mining) utilizando-se tratores de esteiras, escavadeiras e caminhões basculantes para a remoção do capeamento e lavra do minério. Nas áreas com espessura de capeamento reduzida, são utilizados somente tratores de esteiras, carregadeiras de rodas e caminhões basculantes.

As tiras de lavra possuem 25 m de largura e comprimento variável. A partir de cada boxcut, que é interligado à britagem primária pelas estradas principais, são preparadas estradas secundárias perpendiculares às tiras, que são construídas de acordo com o avanço da lavra.

As principais operações unitárias de lavra são:

I. Desmonte, transporte e disposição do material do capeamento, feitos com escavadeira, caminhões e tratores de esteira, respectivamente;
II. Desmonte, carregamento e transporte do minério para o britador, feitos com tratores de esteira, escavadeiras e caminhões, respectivamente;

3.3.3 Beneficiamento

O beneficiamento do minério obtido das frentes de lavra da mina consiste basicamente de duas etapas:

I. Britagem do minério bruto;
II. Lavagem do minério britado, para remoção do material fino aderido.

O processo de beneficiamento subsequente à britagem envolve os processos de lavagem através da desagregação das partículas em lavadores rotativos com adição de água. Posteriormente o material já desagregado e limpo é direcionado ao sistema de classificação de granulados, composto por peneiras vibratórias que classificam, com o auxílio de sprays d’agua o minério com granulometria superior a 1,20 mm. O material granulometricamente abaixo disso é direcionado por gravidade em forma de polpa para tanques de condicionamento e bombeado para a etapa seguinte de classificação através de hidrociclones.

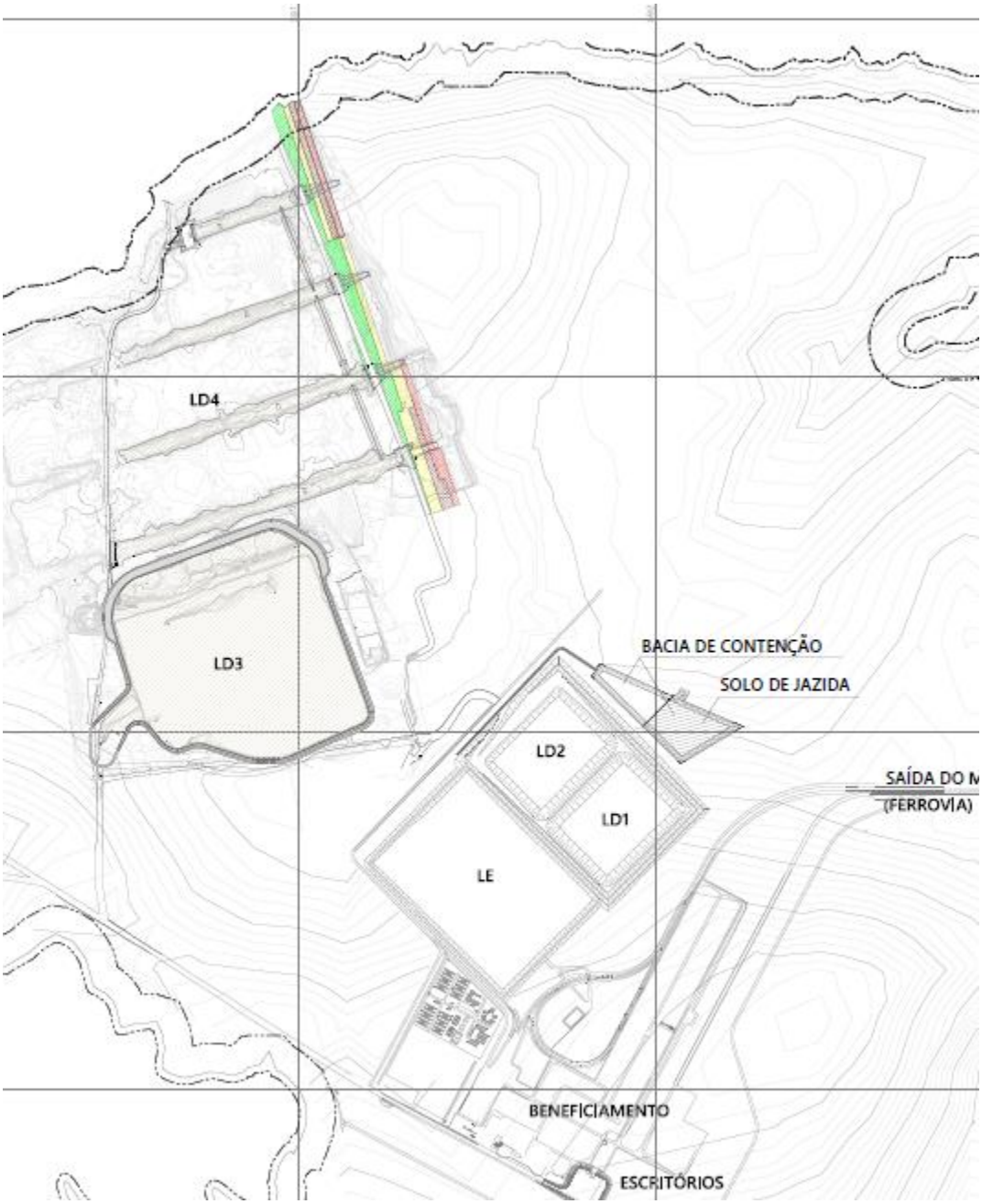
Os hidrociclones tem a função de separar as partículas consideradas contaminantes abaixo de 0,037mm (devido ao seu baixo teor de Alumina e alto teor de Silica reativa). O material maior que 0,037 mm, considerado minério, é secado em filtros de esteiras e direcionado juntamente ao material granulado, oriundo do peneiramento, para as pilhas de estocagem de produto com especificações adequadas ao processo do cliente. Os contaminantes são descartados pelos overflow's da ciclonagem de 10 polegadas para um tanque em cada linha, onde é feito coleta de amostras, e depois bombeado para a lagoa de espessamento (LE) por uma tubulação de aproximadamente 30 polegadas.

3.3.4 Disposição de rejeitos

O resíduo removido no processo de lavagem consiste essencialmente de material com granulometria fina (silte+argila) e deve ser disposto de modo adequado, evitando o seu descarte no meio-ambiente. A estratégia geral planejada para a Mina de Juruti prevê o descarte da lama de lavagem, juntamente com o estéril de capeamento da bauxita, no interior das próprias escavações da lavra. Tal estratégia promove um aproveitamento eficiente da área lavrada, permitindo a disposição do rejeito dentro dos parâmetros geotécnicos de segurança (COUTINHO, 2017).

O Sistema de Contenção dos Rejeitos de Juruti é composto por uma Lagoa de Espessamento (LE) e 4 (quatro) Lagoas de Disposição (LD1/LD2/LD3/LD4) posicionadas como mostra a Figura 4. A quinta Lagoa de Disposição está em construção, com início das operações programado para 2019.

Figura 4 - Sistema de Contenção de Rejeitos Alcoa Juruti



3.4 Lagoa de Espessamento

3.4.1 Operação

A lagoa de espessamento (LE) tem a função de um grande espessador natural, devendo operar durante toda a vida útil do empreendimento (Figura 5). O dique fechado de contenção da lagoa é construído com solo local compactado.

Figura 5 - Vista aérea das lagoas - Mina Juruti

Na LE, o rejeito da Usina de Beneficiamento é recebido na forma de polpa, com teor inicial médio de 7% de sólidos. Nessa lagoa, os sólidos de rejeito sedimentam e adensam parcialmente. Após o período de espessamento, a lama decantada é dragada e conduzida para as Lagoas de Disposição (LDs) por meio das bombas de polpa (centrífugas). Para caracterização do rejeito na lagoa, amostras foram coletadas e analisadas pelo laboratório de geotecnia da Universidade Federal de Viçosa (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização do rejeito

Granulometria:	% < #200 - 100%
Fração argila <2µ):	65 - 67%
Limite de Liquidez:	66,3 - 6,7%
Limite de Plasticidade:	31,7 - 33,3%
Peso específico dos grãos:	29,7 kN/m³

Através de ensaios de sedimentação com amostras, misturas com teores de sólidos de 26%, 45%, 50%, 55% e 60% foram produzidas para os testes. O resultado obtido foi que polpas com 53% de sólidos estão totalmente sedimentadas, sendo que, a partir deste ponto, há adensamento. Sem aplicação de força externa (como pressão) este adensamento é muito lento. O rejeito dragado possui cerca de 22% de teor de sólidos (análise obtida por densímetro on-line). As LDs possuem sistema de recuperação de água liberada pela polpa durante a disposição, que é retornada por meio de bombeamento para a LE.

Todo e qualquer resíduo produzido pela indústria é classificado quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Como explicitado na Tabela 2, o rejeito lançado na LE é classificado como IIB – Inerte pela NBR 10004/2004.

Segue abaixo o descritivo das principais características da Lagoa de Espessamento (Tabela 2), com as informações complementares descritas posteriormente.

Tabela 2 - Dados Gerais da LE

Características gerais do reservatório - LE	
Tipo de barragem:	Rejeito e agua
Situação:	Em operação
Coordenadas UMT:SAD 69 - ZONA 21:	Norte: 9723632 Leste: 592319
Início de operação:	Junho de 2010
Tipo de material construtivo do reservatório:	Terra homogênea e compactada Barragem de terra compactada, com compactação e umidade controlada
Tipo de rejeito/ resíduo armazenado:	ejeito de bauxita
Beneficiamento:	Lavagem, peneiramento e hidrociclonagem
Granulometria (top size - %):	<200#
Classificação do rejeito/resíduo conforme NBR 10.004 da ABNT:	II B – Inerte
Filtro vertical e tapete horizontal:	Possui
Instrumentação: Piezômetros, INAs e marcos superficiais:	Possui
Produtos químicos utilizados:	Nenhum
Produtos químicos agressivos:	Nenhum
Sistema de lançamento de rejeito /resíduo:	Calha/canal

Tipo de vertedor de emergência:	Canal (2,0 m de largura). Soleira na cota 116,0m (1,0 m abaixo da crista)
Descarga máxima do vertedor (m^3/seg):	2,23
Área da bacia drenagem (m^2):	1.302.000,00
Área do reservatório (m^2):	483.000,00
Elevação da crista (m):	117
Largura da crista (m):	8
Comprimento total da crista (m):	2.750,00
Altura máxima no dique (m):	11,5
Volume final do aterro da barragem (m^3)	980.375,00
Volume final do reservatório (m^3):	4.836.511,00
Volume operacional do reservatório (Vr em m^3):	4.353.511,00
Bacia hidrográfica:	Amazônica
Sub bacia:	Lago Grande Juruti Velho
Curso d'água mais próximo:	Igarapé do Chaim

3.4.2 Dique de contenção

Em relação ao projeto estrutural das paredes de contenção da LE, foi especificado um grau de compactação equivalente, no mínimo, a 90% da densidade máxima do ensaio Proctor Normal. A seção dos diques da LE é homogênea, em solo compactado e sua crista, na condição atual está posicionada na El. 117,00 m e o fundo do reservatório em torno da El. 107,00 m. Os taludes possuem inclinação 1V:2H.

A Parede Leste adjacente as LD’s 1/2 é composto por duas bermas de equilíbrio, uma na El. 117,00 m, com largura de 7,0 m e outra na El. 124,00 m, com largura de 3,0 m.

O sistema é composto por um filtro vertical associado a um tapete de areia na base, descarregando no pé dos taludes de jusante dos diques, em toda sua extensão, exceto na interface com as LD’s 1/ 2 (Parede Leste).

Esta estrutura foi projetada pela Minerconsult Engenharia e a construção foi iniciada em novembro de 2007 pela empresa Construções e Comércio Camargo Correa (CCCC), que implantou o Dique 1 e parte do Dique 3, e encerrou sua participação em dezembro de 2007.

Posteriormente a obra foi reiniciada pela Construtora Fidens, em dezembro de 2007, que a concluiu em fevereiro de 2009.

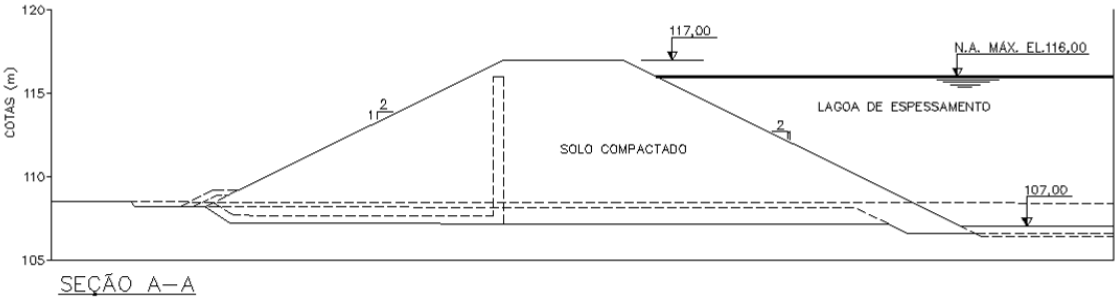
Os diques foram projetados, e construídos, em acordo com os critérios e normas de segurança geotécnica e ambiental, seguindo as normas pertinentes da ABNT.

3.4.3 Manejo de água

A captação da água sobrenadante na LE ocorre através de uma torre extravasora (em concreto armado) ligada a uma tubulação sob o dique que a conduz até a casa de bombas, para recirculação à usina. A LE possui também extravasor de emergência direcionando um possível volume excedente para uma bacia de contenção a jusante (de espera). Como premissa, não há nenhum descarte para o meio ambiente, mantendo assim um circuito fechado com o sistema de beneficiamento.

A localização da LE visou atender a otimização dos sistemas de adução de rejeitos e de recuperação de água, de forma a minimizar o transporte dos rejeitos. Por isto ficou o mais próximo possível da Planta, e em cota inferior a esta, de forma a permitir o fluxo da polpa por gravidade através de tubulação. Foi posicionada no platô RN-102, nas adjacências da usina (do lado das baterias de hidrociclones da lavagem), entre esta e a área inicial da lavra no platô RN-103. Foi preservada uma faixa (30 m) adjacente aos diques para estradas, drenagem, tubulações de água e transmissão elétrica.

Figura 6 - Seção da Lagoa de Espessamento



Devido à extensão da estrutura dos diques (2750m) foi provido um cuidadoso sistema de controle da drenagem superficial (Figura 7), para prevenção e controle de erosões, e proteção superficial, além de conter o volume de água fluvial:

I. A crista dos diques é revestida por uma camada de 0,20 m de material granular (laterita) e com inclinação de 1% para o interior do reservatório;

II. Para que as águas das chuvas não escoem, pela superfície dos taludes desnudados, foi implantado um dispositivo de coleta e condução das águas para o seu interior. Este será constituído por canaletas de crista (L=40 cm), caixas de passagem (espaçadas de 50 m), e tubos de PVC (d=100 mm);

III. Os taludes externos são protegidos com gramíneas (hidrossemeadura) e canaleta de drenagem (L=50 cm) no pé.

Figura 7 - Canaletas de drenagem super0ficial na LE

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para desenvolvimento deste trabalho contemplou as seguintes etapas:

I. Revisão bibliográfica sobre os temas levantados;
II. Análise em campo para levantamento dos parâmetros de entrada e saída da lagoa de espessamento;
III. Consulta em acervo técnico da área para delimitar as variáveis;
IV. Melhoria em instrumentação para leitura dos dados
V. Estruturação do balanço de massa anual
VI. Estruturação do balanço de massa semanal
VII. Revisão diária do modelo para validação

4.1 Dados e premissas utilizados

Primeiramente, para estruturação do balanço, as entradas e saídas de água da Lagoa de Espessamento foram levantadas a fim de delimitar as variáveis.

ENTRADA:

Precipitação direta no reservatório

Água do Canal de Drenagem

Água liberada pelo rejeito

Captação de água nova do Igarapé Juruti Grande

Retorno de Água das Lagoas de Disposição

SAÍDA:

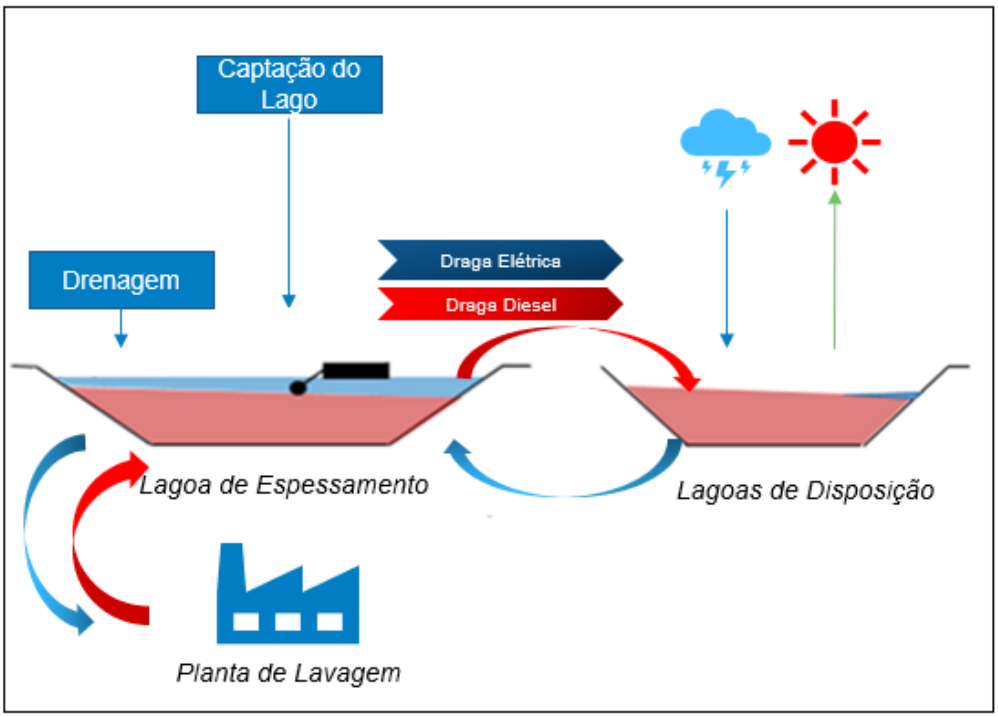
Evaporação direta no reservatório

Infiltração

Água para atender a demanda hídrica da Planta

Água contida na polpa do material dragado

Figura 8 - Croqui esquemático com entradas e saídas da LE



A Figura 8 apresenta um croqui esquemático do balanço hídrico da LE, com indicação das entradas e saídas do Sistema.

4.2 Parâmetros de entrada

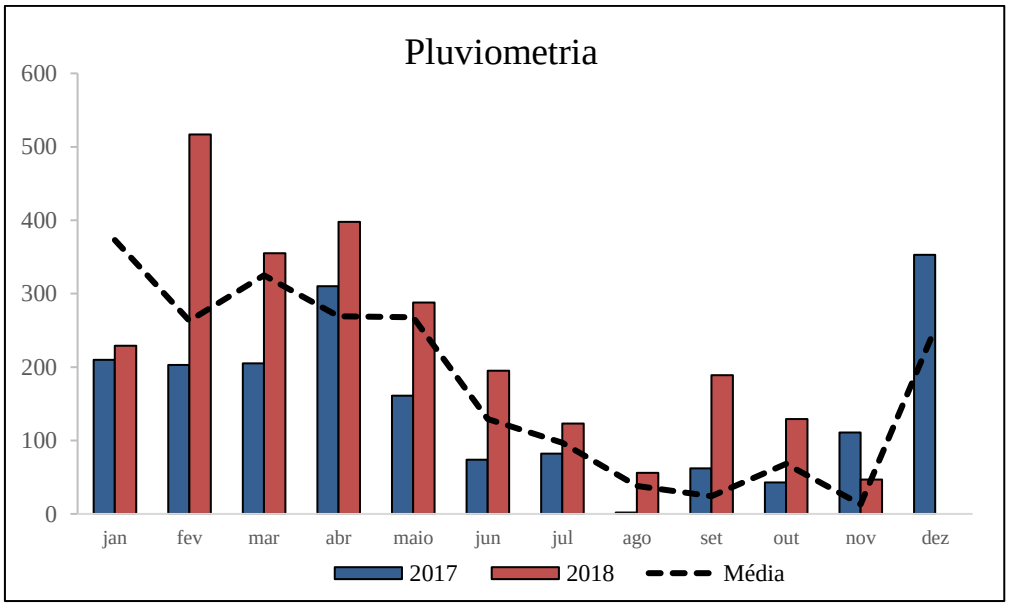
4.2.1 Pluviometria

A região norte constitui o domínio mais chuvoso do Brasil, possuindo a maior média anual acumulada de precipitação quando comparada com outras regiões do país. A Figura 9 apresenta a precipitação média da região ao longo do ano, e o registro de chuvas em 2017 e 2018. A precipitação média mensal é obtida na estação pluviométrica de Juruti (código 00256001).

A estação selecionada é de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA) e é operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), tendo seus registros publicados no sistema de informações hidrológicas da ANA (HIDROWEB), que consiste num sistema de aquisição de informações hidro meteorológicas, disponibilizados no site: http://hidroweb.ana.gov.br. Os dados referentes à precipitação de 2017 e 2018 foram obtidos pela estação meteorológica

localizada ao lado do escritório administrativo da Lagoa de Espessamento, gerando alta confiabilidade da informação.

Figura 9 - Pluviometria histórica registrada pela Estação Metereológica



Apesar da sazonalidade do regime de chuvas da região, os valores quantitativos das chuvas para cada ano podem ser bem distintos dos valores da média. Esses valores dependem principalmente da intensidade de chuvas durante a estação chuvosa, período no qual ocorre maior variabilidade das médias mensais de um ano para outro. A chuva média anual é de 2120mm, sendo que, em 2018, o regime de chuvas está 20% acima desta média.

O volume de água obtido com a chuva é calculado levando em conta a área de cada lagoa, como apresentado abaixo:

$$V = A * \frac{P}{1000} \quad (3)$$

Onde:

V = Volume de Água de Chuva (m³)

A = Área alagada (m²)

P = Pluviometria (mm)

O volume de água de chuva que cai na LE acumula-se na área alagada da lagoa, no entanto, parte da chuva que cai sobre a área exposta (praia) infiltra no depósito e o restante

escoa para a área alagada. Dessa forma, foi considerado um fator de 20% de escoamento da parte exposta (run-off). Portanto, 80% da chuva na área exposta da lagoa escoa para dentro do lago, aumentando o acúmulo de água. Esta porcentagem foi calculada através da leitura de régua antes e após a chuva, correlacionando com o aumento do nível da lagoa e sua respectiva área.

$$x = \frac{(\Delta h - p) * A1}{p * (A2 - A1)} \quad (4)$$

Onde:

X: % da água que cai na área exposta e escoa para área alagada

Δh: diferença de nível (m) antes e após chuva

P: Pluviometria (m)

A1: Área alagada (m²)

A2: Área exposta (praia) (m²)

4.2.2 Água de Drenagem da Planta e Pilhas de Estoque

Na porção SW do Dique da LE há entrada de água proveniente da drenagem superficial das pilhas de bauxita e, drenagem da planta de beneficiamento que captam águas de precipitação e perdas durante o processo da planta. Existe uma bacia de contenção de sedimentos, que capta o volume de água/sedimentos proveniente da drenagem das pilhas de

minério e da planta, e na saída para o Dique SW, há um canal aberto em concreto, com dimensões de 2,0 m x 2,0 m (Figura 10).

Figura 10 - Drenagem das pilhas de estoque e transbordo de tanque

4.2.3 Água liberada pelo Rejeito

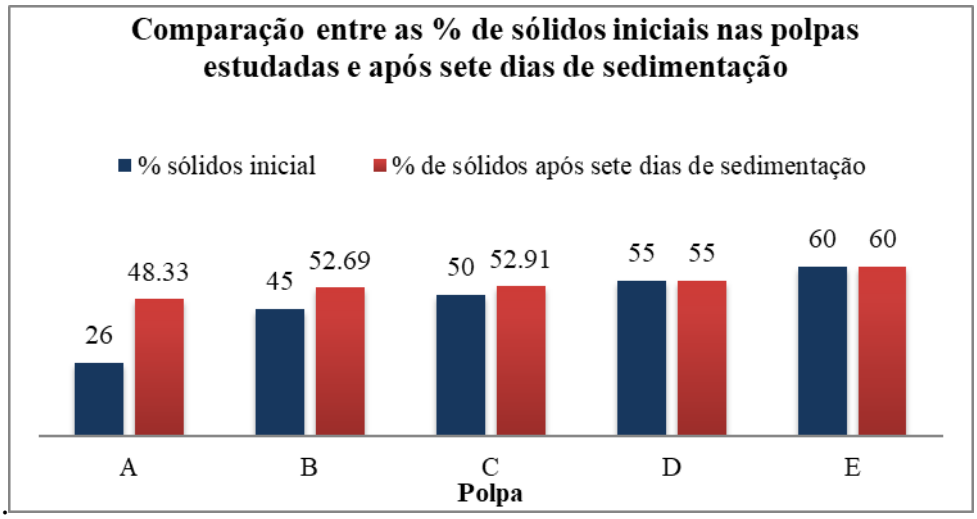
A lama proveniente da lavagem na Usina de Beneficiamento é descartada na forma de polpa diluída, sendo conduzida por gravidade, através de tubulação, até a LE. Conforme monitoramento realizado diariamente pelo Laboratório ALCOA, o rejeito proveniente da planta de beneficiamento é lançado, atualmente, com teor de sólidos de cerca de 7% em sua composição.

Após lançado, o rejeito passa pelos processos de sedimentação e adensamento, e ao final deste processo, tem-se a formação de uma camada de água sobrenadante (água liberada pelo rejeito), para recirculação no processo e atendimento da demanda hídrica do beneficiamento.

Para obter o volume de água liberada pelo rejeito, foram coletadas amostras de rejeitos na lagoa. Este material foi seco em estufa, com posterior moagem e pulverização. Cinco polpas

com diferentes % de sólidos (26%, 45%, 50%, 55% e 60%) foram produzidas em diferentes Beckers de 1000 ml. As polpas foram deixadas em repouso para decantar por sete dias, sendo que os recipientes que as continham foram tampados com papéis filme para que não houvesse perda de água para o ambiente. Após os sete dias, toda água sobrenadante nos Beckers foi retirada com a utilização de uma pipeta e adicionada em provetas, tendo seu volume contabilizado. A porcentagem de sólidos presente nas polpas após a retirada da água sobrenadante está presente na Figura 11.

Figura 11 - Percentual de sólidos após 7 dias de sedimentação



Nota-se que após os sete dias as porcentagens de sólidos das polpas A, B e C aumentaram, mas não passaram da marca dos 55%. Também se percebe que as polpas D e E não liberaram água, indicando que toda água presente é intersticial.

Após estes resultados, outro teste foi realizado. Um sistema formado por Becker e papel filtro em formato de cone foi montado, sendo o papel filtro saturado por água. A saturação foi feita para que qualquer água liberada por polpas formasse gotas na ponta inferior do cone, não sendo absorvida pelo papel.

Doze polpas, com 100 gramas cada, foram produzidas com 51%, 52%, 53% e 54% de sólidos, três polpas para cada porcentagem de sólidos. Estas polpas foram despejadas sobre o papel filtro a fim de verificar a liberação de água das polpas. A segunda etapa do estudo mostrou que nas polpas com 51% e 52% de sólidos houve gotejamento na parte inferior do filtro. Já nas polpas com 53% e 54% não houve gotejamento após um minuto do material dentro do filtro, o que, assim como na primeira etapa, indica que toda água presente nestas polpas é intersticial.

Sendo assim, conclui-se que polpas com 53% de sólidos estão totalmente sedimentadas, a partir deste ponto há adensamento, sendo que sem a aplicação de uma força externa (como pressão), este adensamento é muito lento.

A partir destes testes, a água liberada pelo rejeito foi considerada baseando-se em um % de sólidos de 53%. Os dados referentes à produção de rejeitos são obtidos através das informações de alimentação e produção da usina, com posterior checagem pelo medidor de vazão instalado na tubulação (FIT 661B 002) e com os teores obtidos nos ensaios laboratoriais.

4.2.4 Captação de Água Nova

O Sistema de Captação de água bruta para o abastecimento das instalações do beneficiamento é proveniente das bombas verticais de captação com operação paralela (372 BA 001/002) instaladas em uma balsa no Lago Grande Juruti Velho (Figura 12). Na casa de bombas estão instaladas duas bombas centrífugas horizontais (372 BA 003/004), que em série com as bombas verticais instaladas na balsa, funcionam como bombas booster, operando com uma vazão de cerca de 900 m^3/hora e 1667 kPa de pressão. A tubulação entre as bombas verticais instaladas na balsa e as bombas horizontais foi projetada em PEAD, sendo sustentada por flutuadores no trecho com água do igarapé. Para conexão da casa de bombas com o sistema de disposição de rejeitos (10,6 km), são utilizadas tubulações de alvenius. A água bruta é direcionada para duas localizadas: uma parte é bombeada para os tanques do sistema de utilidades da Mina Juruti e o restante direcionado para a Lagoa de Espessamento.

Figura 12 - Sistema de captação de água no Lago Grande Juruti

Os valores referentes ao volume de água bombeada são obtidos por dois medidores de vazão (FIT 372 01 e FIT 372 02), sendo a primeira aferição relacionada à vazão bombeada do Lago Juriti e a segunda em relação ao volume de água que entra na Lagoa de Espessamento. A diferença destas duas medições corresponde ao volume de água direcionado para utilidades (consumo humano, selagem de bombas, limpeza, etc).

4.2.5 Retorno de Água das Lagoas de Disposição

As Lagoas de Disposição compreendem a destinação final de rejeito pós dragagem, sendo que as mesmas têm tempo de vida útil compatível com o assentamento do material sólido (adensamento) e a recuperação de água. Estas lagoas contêm bombas flutuantes (Figura 13) que recuperam a água de rejeito dragado para a Lagoa de Espessamento.

Figura 13 - Bombas flutuantes para recuperação de água do rejeito dragado

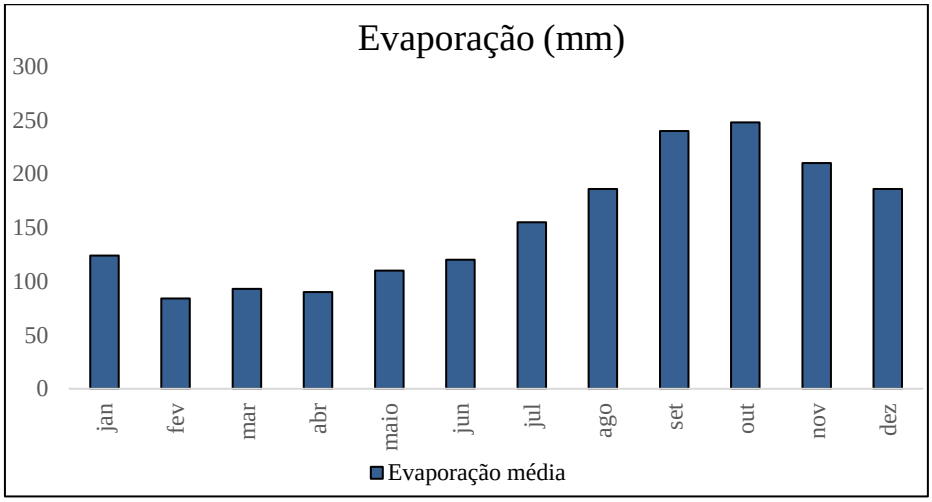
Os dados referentes ao volume de água recuperada são obtidos a partir do somatório das horas operacionais das bombas flutuantes, cuja vazão horária é conhecida pela capacidade das mesmas. Os dados de horas de operação são contabilizados por horímetros inseridos nos painéis elétricos destas bombas, contabilizando a partir do início de funcionamento do motor.

4.3 Parâmetros de saída

4.3.1 Evaporação

O sistema para medição da evaporação na LE consiste em um Tanque Classe A cujo valor do coeficiente de tanque adotado (Kp) é 0,7. A alteração de nível é mensurada através do sensor de nível modelo PS98i, sendo que o sistema de medição é localizado na estação metereológica, ao lado da Lagoa de Espessamento. A Figura 14 mostra a evaporação mensal média obtida pelo sistema de análise de dados:

Figura 14 - Evaporação média anual



A evaporação média anual avaliada é de 1.846 mm. Observa-se que os maiores valores de evaporação se relacionam aos meses de setembro e outubro pertencentes à estação seca, e com os menores índices de umidade relativa do ar.

Os dados obtidos pelo tanque classe A são relativos à evaporação potencial (máxima taxa de evaporação que ocorreria em uma superfície livre de água sob dadas condições climáticas). No entanto, em uma superfície como a LE na qual parte da lagoa encontra-se assoreada, é necessário calcular a evaporação efetiva, uma vez que a taxa de evaporação real da superfície do solo em relação a taxa de evaporação potencial é uma função da água disponível, da textura do solo e da taxa de secagem (SILVA, 2003).

4.3.2 Infiltração

O valor adotado para as taxas de perdas por infiltração no reservatório da LE é de 55 m³/h. Ressalta-se que o valor estimado foi subsidiado por ensaios de infiltração do tipo Matsuo, nas Células C2A e C2B e por análise da sensibilidade de entrada e saída do sistema.

4.3.3 Água de Processo

Para abastecimento da Usina de Classificação, a água é bombeada da LE através de 3 bombas centrífugas localizadas na área 671B (Figura 15). Estas bombas apresentam vazão média de 2.100 m³/hora com cerca de 686 kPa. Nesta área é realizada a coleta de água para análise de turbidez com medição das partículas suspensas na água visando uma qualidade que atenda a lavagem com eficácia e maximização.

Figura 15 - Área de bombeamento de água para a Usina

Os dados referentes ao volume de água bombeada para a planta de beneficiamento são coletados através de um medidor de vazão (FIT 671 001) instalado na tubulação.

4.3.4 Dragagem

A Draga é um equipamento utilizado na Lagoa de Espessamento para retirar a lama espessada na lagoa e bombear esta lama para as lagoas de disposição para armazenamento final, garantindo assim a vida útil e operacionalidade da lagoa de espessamento e planta de lavagem (com a utilização de água recuperada no processo de lavagem).

Essa Draga é um sistema de flutuadores com uma bomba centrífuga, sistema hidráulico para movimentação através de cabos de aço, molinetes e spuds, e uma lança com alcance de até 11 m para sucção do material (Figura 16). Há uma cabine climatizada para o operador comandar os controles e acompanhar a instrumentação de processo, garantindo assim a maior eficiência de retirada de sólidos.

Figura 16 - Draga a Diesel na LE

No sistema atual da LE, há duas dragas operantes. O volume de água bombeada é calculado através dos dados de densidade do rejeito dragado e da vazão horário de produção. A partir deles, é calculado o volume de água contido no rejeito bombeado, através da seguinte fórmula:

$$V = \Delta t * Q * \rho * \left(1 - (Gs * \frac{\frac{\rho - 1}{(Gs-1)*\rho}}{100})\right) \quad (5)$$

Onde:

V= Volume de água (m^3)

Δt = Horas trabalhadas

Q = Vazão (m^3/hora)

ρ = densidade do rejeito (t/m^3)

Gs = densidade dos grãos

4.3.4.1 Draga Elétrica

A draga elétrica possui um sistema automatizado, no qual as leituras dos instrumentos são enviadas diretamente para o supervisório de dados. Os dados são fornecidos por um densímetro radioativo (DIT 661B-01) e medidor de vazão (FIT 661B-01).

4.3.4.2 Draga Diesel

As informações de processo da Draga Diesel, cuja operação foi iniciada em junho de 2018, são obtidas através de amostragem na Balança Marcy de 10 em 10 minutos. A vazão é estimada de acordo com uma medição feita no início de sua operação (maio/2018), no qual o medidor de vazão portátil indicou as vazões na tubulação. A instrumentação adequada e automatizada para o equipamento será instalada ainda este ano, para melhor confiabilidade das informações.

4.4 Batimetria

A batimetria consiste em uma atividade diária realizada na LE a fim de estimar o volume de água disponível (Figura 17). Através de um equipamento de medição, o operador realiza a leitura da profundidade da lâmina de água em 300 pontos igualmente distribuídos. Com os dados de nível da Lagoa e Volume de Água Disponível, a cota de lama é obtida a fim de verificar o assoreamento ao longo da LE.

Figura 17 - Atividade de batimetria para monitoramento do volume de água

A batimetria constitui-se em uma ferramenta de checagem das informações de processo, uma vez que as modificações no balanço de entrada e saída de água são refletidas nas diferenças de volumes de água encontrados na batimetria.

4.5 Melhoria em instrumentação

Após esta listagem, cada *input* e *output* foi separadamente estudado para determinação da metodologia para obtenção de seus respectivos dados. Para tal, foram elaborados planos de ações para melhorias de instrumentação da área da barragem de rejeitos, uma vez que no início do projeto não havia um sistema de medições eficiente para uma análise assertiva de dados. Como ilustrado nos diagramas a seguir (Figuras 18 e 19), segue um comparativo da confiabilidade das informações destes parâmetros na fase inicial e final do desenvolvimento do balanço hídrico.

Figura 18 - Confiabilidade da instrumentação (Panorama inicial)

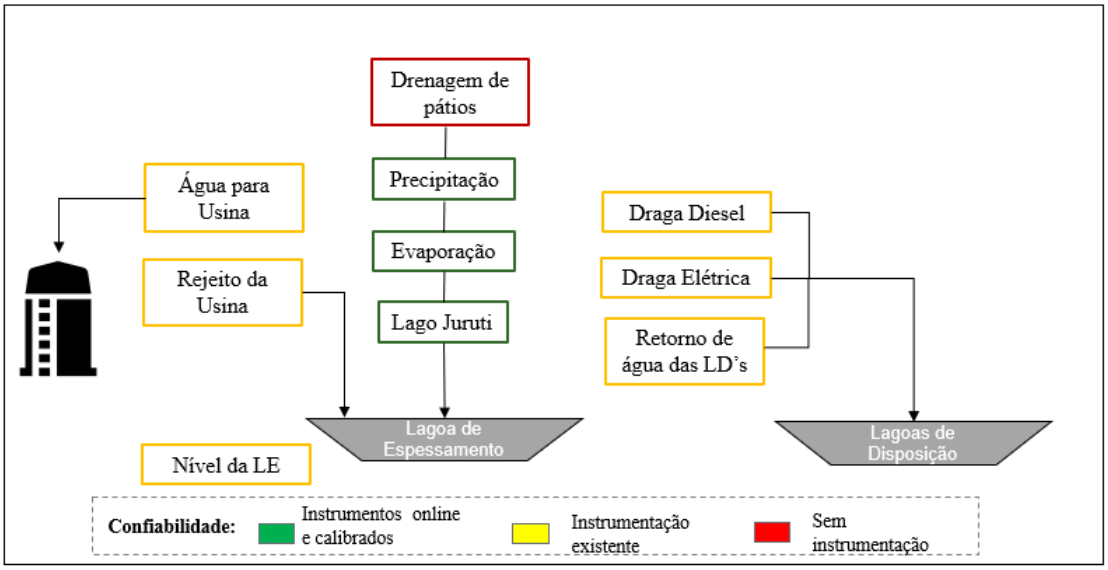
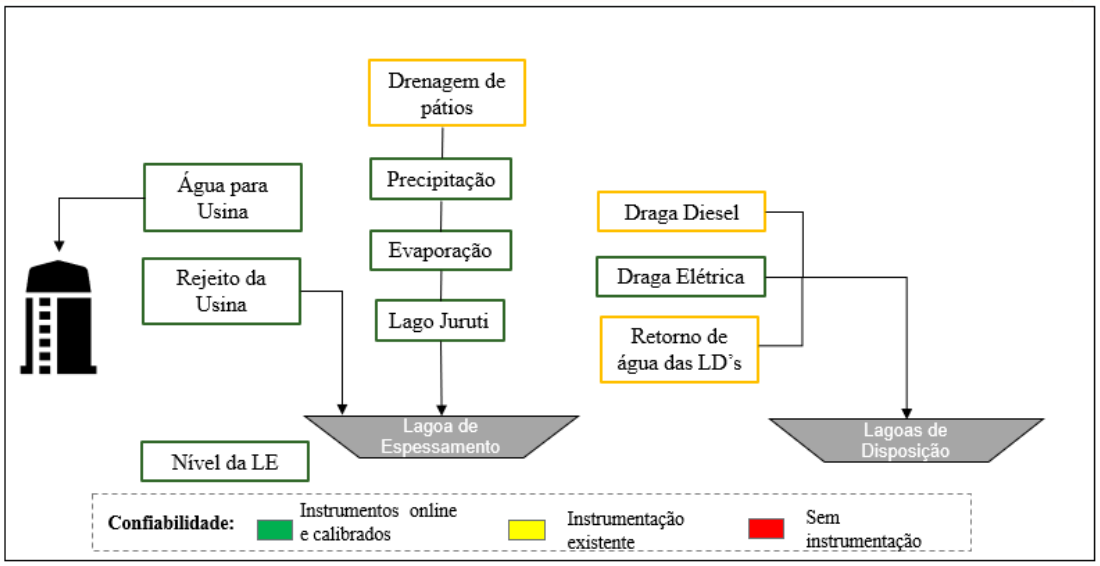


Figura 19 - Confiabilidade da instrumentação (Panorama final)



4.6 Balanço hídrico diário

Após as análises para balanço de massa anual, os mesmos parâmetros foram analisados em base diária. O objetivo deste controle foi identificar rapidamente alguma anormalidade no processo, a fim de evitar perdas de água significativas. A validação das informações era realizada diariamente pela batimetria, através do comparativo abaixo:

$$V_d = V_{d-1} + E - S \tag{6}$$

Onde:

V_d: Volume de água disponível atual (m³)

V_{d-1}: Volume de água disponível no dia anterior (m³)

E: Volume de água que entrou na LE (m³)

S: Volume de água que saiu da LE

4.7 Validação dos dados

Após o input de todas as informações históricas de entrada e saída, os dados para previsão dos meses seguintes foram inseridos considerando o Plano de Produção 2018 (para previsão do volume de água de rejeito proveniente da usina) e as médias históricas de 2018 para os demais parâmetros. A partir destas informações foi possível, a partir do volume inicial da LE calculado pela topografia em janeiro, calcular o volume de água disponível e a cota de lama ao longo do ano. O volume de água para estabilidade operacional é 200.000 m³, e a partir desta estimativa de volume de água na LE é possível traçar planos de ação para garantia de água suficiente para operação estável ao longo de todo o ano.

4.8 Balanço hídrico 2019

O balanço hídrico da LE em 2019 foi construído a partir dos dados do Plano de Produção 2019 (valor a partir da qual é obtido a quantidade de rejeito produzida). A partir deste dado, fez-se necessária a verificação do enchimento das Lagoas de Disposição, a fim de verificar se o volume disponível para enchimento nas LD's está de acordo com o volume de rejeito a ser lançado nos próximos anos de operação. A operação da LD5 irá iniciar no próximo ano, sendo que a liberação para lançamento de rejeitos é dependente da LO (Licença Operacional), com prazo entre março e maio. Sendo assim, dois diferentes cenários foram criados em 2019: LD5 com início de operação em março e início em maio. Além destes cenários, diferentes taxas de

precipitação foram consideradas, para flexibilizar o balanço mostrando a dependência do sistema de rejeitos com o regime de chuvas.

Para as demais entradas e saídas, temos:

I. Rejeito da planta a partir do Plano de Produção 2018;
II. Captação de água nova considerando 21 horas operacionais na estação chuvosa (contingência possível devido à chuva) e 23 horas operacionais na estação seca, ambas a uma taxa média de 880 m^3/hora (volume médio sob condições normais de operação);
III. Retorno de Água das LD's: Previsão levando em conta o total de chuva em cada LD somado à água liberada do rejeito adensado;
IV. Evaporação média registrada nos últimos anos;
V. Infiltração da LE de 55 m^3/h (testes de infiltração e análise de sensibilidade);
VI. Água de processo com vazão de 2.100 m^3/h (volume médio para abastecimento da usina de beneficiamento);
VII. Dragagem a 22% de sólidos e vazão de 1.200 m^3/h (média obtida em condição operacional estável);

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a inserção de todos os parâmetros de entrada e saída de água e material, o saldo de rejeito, em toneladas, foi obtido (Tabela 3). O saldo (entrada de rejeito – saída de rejeito por dragagem) indica que houve o desassoreamento da LE (massa de rejeito retirada superior à massa de rejeito proveniente da usina de classificação). Como previsto no Plano de Produção 2018, o desassoreamento da LE foi necessário para redução da cota de lama na lagoa, a fim de aumentar o volume disponível para armazenamento de água.

Tabela 3 - Saldo de Desassoreamento na LE (Massa seca em t)

Data	Produção de Rejeito (t)	Produção das Dragas (t)	Saldo (t)
jan-18	120.828	182.365	**-61.537**
fev-18	134.278	126.854	**7.424**
mar-18	143.499	172.825	**-29.325**
abr-18	131.685	191.020	**-59.335**
mai-18	88.750	160.987	**-72.237**
jun-18	129.117	254.846	**-125.728**
jul-18	187.304	307.071	**-119.766**
ago-18	140.479	228.133	**-87.653**
set-18	91.809	167.526	**-75.717**
out-18	138.053	191.145	**-53.091**
nov-18	135.584	138.792	**-3.208**
dez-18	149.405	286.956	**-137.552**
jan-19	145.732	286.956	**-141.224**
fev-19	111.120	241.907	**-130.787**
mar-19	156.303	267.826	**-111.523**
abr-19	150.812	259.186	**-108.374**
mai-19	150.643	248.695	**-98.052**
jun-19	146.054	203.646	**-57.592**
jul-19	154.908	172.174	**-17.265**
ago-19	150.664	153.043	**-2.380**
set-19	141.923	138.850	**3.073**
out-19	147.721	143.478	**4.243**
nov-19	141.923	129.593	**12.330**
dez-19	151.190	210.434	**-59.245**

Como comentado anteriormente, a segunda draga foi adquirida em maio de 2018, sendo que nos meses anteriores o sistema era totalmente dependente da disponibilidade física de uma

draga. Dessa forma, verifica-se (Figura 20) um desassoreamento elevado no mês de junho, devido à dragagem com os dois equipamentos. Nos meses seguintes este ritmo de desassoreamento foi reduzido devido a uma diminuição do volume de água disponível na LE, justificado pelo início da estação seca (Figura 21). Sendo assim, o plano de dragagem foi reduzido para manter o volume de água disponível adequado para continuidade das operações na planta e para controle da qualidade da água.

Figura 20 - Desassoreamento na LE

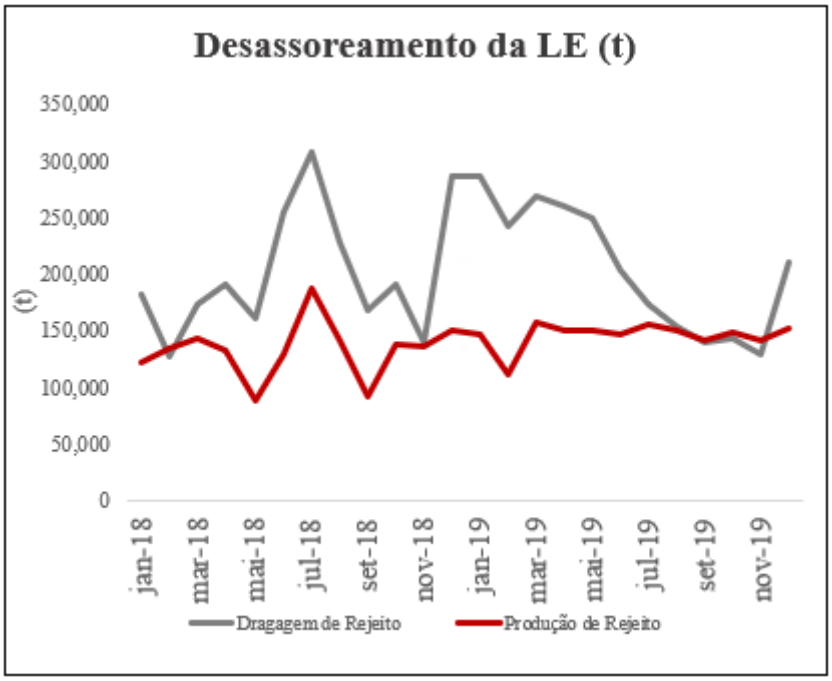
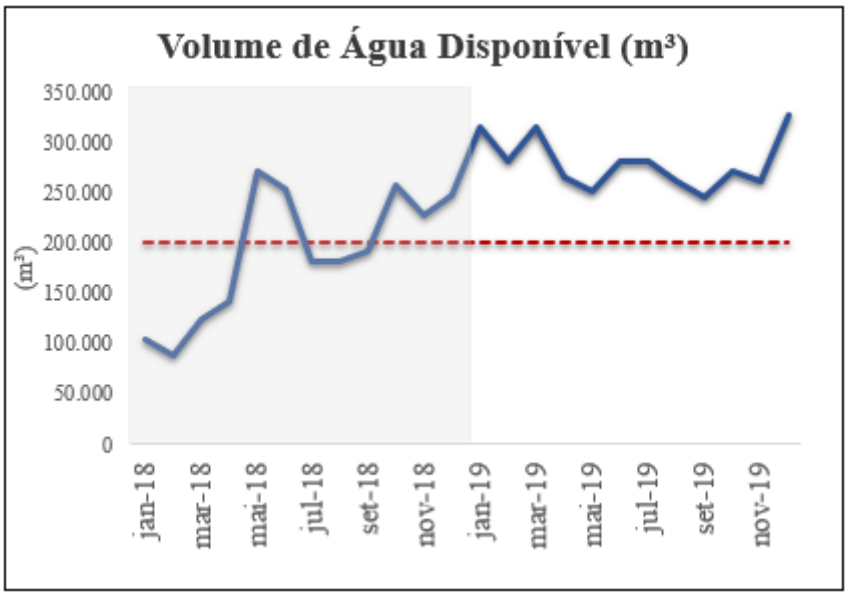
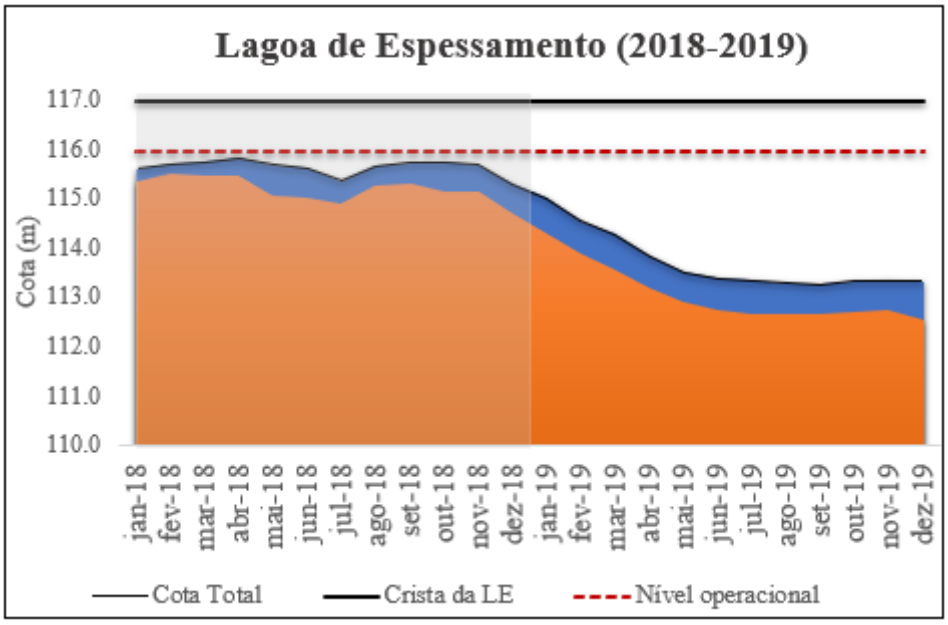


Figura 21 - Volume de Água Disponível na LE



Para 2019, o primeiro semestre será marcado por um desassoreamento elevado durante um período maior em relação a 2018. Este desassoreamento será possível através da operação das duas dragas, promovendo uma redução superior a dois metros na cota de lama média da lagoa (Figura 22).

Figura 22 - Nível da Lagoa de Espessamento



Com relação ao histórico de 2018, os dados de cota de lama foram obtidos pela batimetria. A cota de lama de novembro e dezembro de 2018 e todo o ano de 2019 foi calculada, como mostra no perfil acima (Figura 22).

Para controle operacional, o balanço diário é realizado a fim de estabelecer as horas de dragagem (Tabela 4). O plano de dragagem mensal é estabelecido como parâmetro de meta média, o que torna possível a variação operacional durante os dias a fim de promover um balanceamento de água/cota de lama, além de um controle de processo mais efetivo. Ao verificar que o volume de água da LE caiu consideravelmente durante um dia (acima de 30 mil m³), é necessário revisar as horas de dragagem e checar todas as entradas e saídas para garantir o funcionamento adequado do sistema.

Tabela 4 - Plano de Dragagem na LE

Horas operacionais	
Nov-18	15
Dez-18	25
Jan-19	25
Fev-19	25
Mar-19	25
Abril-19	25
Maio-19	18
Jun-19	18
Jul-19	18
Ago-19	14
Set-19	14
Out-19	14
Nov-19	14
Dez-19	20

6 CONCLUSÃO

Através do Balanço Hídrico da Lagoa de Espessamento, o plano de dragagem (horas operacionais e local de dragagem) é estabelecido, sendo este em função da cota de lama e volume de água disponível na LE.

A operação contínua da planta de beneficiamento em 2018 foi possível devido ao gerenciamento de água na lagoa ao longo do ano, de forma que em outubro o volume de água encontrado está acima do volume estável operacional (2×10^5 m³). Este gerenciamento aconteceu através da construção do balanço, correlacionando as entradas e saídas com o comportamento da cota de lama assim como os resultados de batimetria. Além do gerenciamento, o comportamento da LE em 2019 foi traçado com foco em aumentar a estabilidade do sistema de lagoas.

Esta estabilidade será alcançada através de uma alta taxa de desassoreamento durante o período chuvoso, com posterior controle de dragagem a fim de manter o volume de água. Seguindo estes parâmetros, será possível alcançar uma borda livre acima de 2 metros, o que implica em uma estabilidade operacional e adequada aos requisitos legais e ambientais.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCOA. **Relatório Interno**. [S.l.]. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade**. ABM. [S.l.]. 2017.

BRANDÃO, D. **Redes de Comunicação Industrial**. [S.l.]. 2016.

BRETAS, V. L. **Diagnóstico do consumo de água no beneficiamento de bauxita em Juruti-PA**. [S.l.]. 2014.

CELLA, P. R. C. et al. Balanço hídrico de longo termo - Estudo de caso da Barragem Bocaiúva. **15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**, 2015.

CHAMMAS, R. **Notas de Aula do Curso de Barragens de Contenção de Rejeitos**. [S.l.]: [s.n.], 1989.

CONSTANTINO, V. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita. **Química Nova**, v. 25, 2002.

COUTINHO, K. F. **Análise de estabilidade de taludes remanescentes da lavra de bauxita para a disposição de rejeito**. [S.l.]: [s.n.], 2017.

DELLA, J. P.; BACK, Á. Simulação Hidrológica para Gerenciamento dos Recursos Hídricos da Barragem do Rio São Bento. **XXX - Seminário Nacional de Grandes Barragens**, 2015.

DEURSEN, M. V. **Métodos de desaguamento e disposição de rejeito da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica.** São Paulo. 2016.

FILHO, L. D. O.-; ZYL, D. V. **Modeling Discharge of Interstitial Water from Tailings**. [S.l.]: [s.n.], 2006.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. **Indicadores de Juruti: Para onde caminha o desenvolvimento do município**. [S.l.], p. 145. 2009.

LAIRD, T. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. [S.l.]: [s.n.], 1997.

MOTA, J. P. **Instrumentação e Controle de Processos**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. [S.l.]. 2011.

SILVA, D. R. Estudos do Processo de Ressecamento de um Rejeito Fino de Minério de Ferro em uma Área Teste. **Rem: Revista Escola de Minas**, 2003.

SILVA, F. B. D. Evaporação Em Barragem Subterrânea No Semiárido Pernambucano: Estudo de Caso., 2012.

TOMAZ, P. Balanço Hídrico em pequenas barragens. In: TOMAZ, P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. [S.l.]: [s.n.], 2010. Cap. 40.

WILSON, G. W. . F. D. G. . B. S. L. Coupled Soil-atmosphere Modeling for Soil Evaporation. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994.

ZEN, A. D. O. Estimativa da evaporação e evapotranspiração potencial do reservatório da hidrelétrica de Tucuruí, 2011.

APÊNDICE A – TABELA BASE DE CÁLCULOS (ENTRADAS)

	Entradas							
Meses	Dias/mês	Volume de água lançada planta (m³/mês)	Volume de Água Captada (m³)	Volume de Água Captada LE (m³)	Chuva	Pluviometria LE	Recuperação das LD's LE total	
jan-18	31	1.619.680	512.672	461.405	229	109.920	340.660	2.531.665
fev-18	28	1.445.641	429.708	386.737	517	248.160	861.991	2.942.530
mar-18	31	1.536.835	551.760	496.584	355	170.400	631.793	2.835.611
abr-18	30	1.104.848	470.682	423.614	398	191.040	706.677	2.426.179
mai-18	31	979.876	416.994	375.295	288	138.240	535.734	2.029.144
jun-18	30	1.523.436	588.285	529.457	195	93.600	439.214	2.585.707
jul-18	31	1.596.465	590.186	531.168	123	59.040	367.510	2.554.183
ago-18	31	1.469.265	644.349	579.914	56	26.880	208.213	2.284.272
set-18	30	1.395.454	512.415	461.173	189	90.720	414.339	2.361.686
out-18	31	1.485.379	627.440	564.696	129	61.920	344.339	2.456.334
nov-18	30	1.437.760	607.200	546.480	13	6.240	93.151	2.083.631
dez-18	31	1.483.963	627.440	564.696	253	121.584	529.418	2.699.661
jan-19	31	1.483.731	409.200	368.280	373	178.896	707.037	2.737.944
fev-19	28	1.337.473	369.600	332.640	263	126.432	520.484	2.317.029
mar-19	31	1.485.108	409.200	368.280	325	156.192	626.500	2.636.079
abr-19	30	1.437.143	396.000	356.400	269	129.264	538.451	2.461.257
mai-19	31	1.484.371	409.200	368.280	268	128.544	530.640	2.511.835
jun-19	30	1.436.523	607.200	546.480	129	62.064	300.649	2.345.716
jul-19	31	1.484.847	627.440	564.696	97	46.320	163.342	2.259.205
ago-19	31	1.487.263	627.440	564.696	38	18.240	109.656	2.179.855
set-19	30	1.438.707	607.200	546.480	24	11.664	91.917	2.088.768
out-19	31	1.486.823	627.440	564.696	68	32.400	126.511	2.210.430
nov-19	30	1.438.707	607.200	546.480	13	6.240	78.589	2.070.016
dez-19	31	1.487.342	627.440	564.696	253	121.584	300.317	2.473.939

APÊNDICE B – TABELA BASE DE CÁLCULOS (SAÍDAS)

	Saídas							
Meses	Dias/mês	Produção de água Draga Elétrica (m³)	Produção de água Draga Diesel (m³)	Produção de água Dragagem (m³)	Água de Processo	Infiltração LE	Evaporação LE	
jan-18	31	729.460		729.460	1.602.637	142.414	45.024	**2.519.535**
fev-18	28	619.348		619.348	1.428.782	128.632	42.672	**2.219.434**
mar-18	31	691.299		691.299	1.520.213	142.414	44.976	**2.398.902**
abr-18	30	764.081		764.081	1.091.221	137.820	37.008	**2.030.129**
mai-18	31	715.370		715.370	969.967	142.414	35.424	**1.863.175**
jun-18	30	797.882	196.331	994.213	1.509.713	137.820	38.544	**2.680.290**
jul-18	31	840.692	389.544	1.230.235	1.596.974	142.414	43.152	**3.012.776**
ago-18	31	415.076	417.640	832.716	1.454.243	142.414	48.288	**2.477.661**
set-18	30	297.407	293.074	590.481	1.384.908	137.820	58.080	**2.171.289**
out-18	31	338.565	339.130	677.695	1.464.750	142.414	67.680	**2.352.539**
nov-18	30	245.938	246.143	492.080	1.417.500	137.820	65.664	**2.113.064**
dez-18	31	508.695	508.695	1.017.390	1.464.750	142.414	55.584	**2.680.138**
jan-19	31	508.695	508.695	1.017.390	1.464.750	142.414	45.024	**2.669.578**
fev-19	28	428.835	428.835	857.670	1.323.000	128.632	42.672	**2.351.975**
mar-19	31	474.782	474.782	949.564	1.464.750	142.414	44.976	**2.601.704**
abr-19	30	459.466	459.466	918.933	1.417.500	137.820	37.008	**2.511.261**
mai-19	31	440.869	440.869	881.738	1.464.750	142.414	35.424	**2.524.326**
jun-19	30	361.009	361.009	722.018	1.417.500	137.820	38.544	**2.315.883**
jul-19	31	305.217	305.217	610.434	1.464.750	142.414	43.152	**2.260.750**
ago-19	31	271.304	271.304	542.608	1.464.750	142.414	48.288	**2.198.060**
set-19	30	246.143	246.143	492.285	1.417.500	137.820	58.080	**2.105.685**
out-19	31	254.347	254.347	508.695	1.464.750	142.414	67.680	**2.183.539**
nov-19	30	229.733	229.733	459.466	1.417.500	137.820	65.664	**2.080.450**
dez-19	31	373.043	373.043	746.086	1.464.750	142.414	55.584	**2.408.834**

DECLARAÇÃO

Certifico que o aluna **Daniela Giroto Amorim**, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado "**BALANÇO HÍDRICO DE LAGOA DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE BAUXITA NO OESTE DO PARÁ**", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Prof. Waldyr Lopes de Oliveira Filho
Orientador
Ouro Preto, 11 de dezembro de 2018.