

**Mestrado Profissional**  
**Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais**

**YUUKI SILVEIRA MIURA**

**REVEGETAÇÃO DO DEPÓSITO DE RESÍDUO DE BAUXITA:  
UMA ANÁLISE DE TÉCNICAS PROMISSORAS PARA O  
CASO DA HYDRO ALUNORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Orientador: Prof. José Oswaldo Siqueira  
Co-orientador: Prof. Antônio Furtini

**Belém – PA**  
**2016**

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M618a

Miura, Yuuki silveira

Avaliação Metodológica para Reabilitação de Resíduo de Bauxita do Depósito de Resíduos Sólidos da Hydro Alunorte / Yuuki Silveira Miura - Belém-PA, 2015.

48 f.: il.

Dissertação (mestrado) -- Instituto Tecnológico Vale, 2015.

Orientador(a): Prof. José Oswaldo Siqueira

1. Bauxita . 2. Reabilitação 3. Resíduo. I. Título.

CDD 23. ed. 631.45

**YUUKI SILVEIRA MIURA**

**Revegetação do Depósito de Resíduos de Bauxita: Uma  
Análise de Técnicas Promissoras para o Caso da Hydro  
Alunorte**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Desenvolvimento Sustentável do Programa de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV).

Data da aprovação:

Banca examinadora:

---

**Dr. José Oswaldo Siqueira**  
Orientador - ITV

---

**Dr. Rafael Borges Valadares**  
Membro interno - ITV

---

**Dr. Cecílio Caldeira**  
Membro externo - ITV

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Kenichi e Gislene que acreditaram, dedicaram e não mediram esforços em trazer educação de excelência aos seus filhos, despertando o nosso interesse em alçar vôo mais distante a cada dia,

Aos meus irmãos Dayki e Aika que são responsáveis pela minha busca incessante pelo conhecimento a fim de orientá-los da melhor maneira possível,

Aos meus amigos Hugo e Ranan que quando me sentia desacreditado ou perdido em meus objetivos, me aconselharam, me levantaram e me fizeram seguir em frente,

Aos meus colegas de trabalho, professores, familiares e todos aqueles que andaram junto comigo todo este tempo, participando de alguma forma na construção e realização deste sonho.

Dedico...

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. José Oswaldo Siqueira pela orientação e conselhos dados ao longo deste período.

Ao Prof. Antônio Furtini pela orientação, conselhos e dicas essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Rafael Borges Valadares pelos conhecimentos repassados em sala de aula.

À Nisa Gonçalves, Helen Luz e Maíze Ferreira pelo fornecimento de referências bibliográficas e toda dedicação ao longo do curso.

À Hydro Alunorte por possibilitar o desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

Aproximadamente 120 milhões de toneladas de resíduo de bauxita são produzidos anualmente e segundo estimativa o estoque global deste material já ultrapassa 3.5 bilhões de toneladas. Com o aumento da demanda pelo alumínio nos próximos anos, o estoque do resíduo de bauxita é um passivo que continuará aumentando, tornando-se uma ameaça para as empresas deste setor. A revegetação dos depósitos de resíduos de bauxita é um procedimento bastante promissor para estabilizar o resíduo e diminuir seus riscos ambientais. O presente trabalho deve ser entendido como um estudo técnico, que descreve as diretrizes e práticas promissoras para subsidiar plano de fechamento do Depósito de Resíduos Sólidos da Hydro Alunorte. Foi realizado uma análise em técnicas que adotadas em revegetação sobre resíduo de bauxita com características semelhantes à da Hydro Alunorte. Avaliou-se propostas de condicionamento do resíduo a fim de melhorar suas características físico-químicas. Também foi analisado espécies vegetais capazes de tolerar ao alto teor de sodicidade e elevado pH do meio. Verificou-se que a incorporação de gesso e de matéria orgânica nas camadas superficiais do resíduo de bauxita são capazes de fornecer condições mais favoráveis para o estabelecimento de comunidades vegetais. Dentre as espécies vegetais, as halófitas e algumas espécies arbóreas apresentaram bom desenvolvimento sobre o resíduo de bauxita, como é o caso da *Acacia spp* e *Eucalyptus spp*. Como conclusão, foi elaborado uma proposta técnica para revegetação do DRS1 da Hydro Alunorte, no qual é fundamentado pelas melhores práticas encontradas até o momento do presente estudo.

**Palavras-chave:** Revegetação. Resíduo de bauxita. Processo Bayer.

## ABSTRACT

Approximately 120 million tons of bauxite residue is produced annually and according to estimates the global stock of this material have exceeded 3.5 billion tons. Due to the increasing demand for aluminum in the coming years, the stock of bauxite residue will remain a growing threat for aluminum companies. Revegetation of bauxite residue deposits is the most promising method to mitigate the environmental inherent risk of this material. The current work shall be understood as a technical study that describe promising guideline and practices adopted for rehabilitation in bauxite residues in order to support the closer plan of deposit residue from Hydro Alunorte. It was performed technical analyses adopted in revegetation over bauxite residues with similar characteristics from Hydro Alunorte. It was evaluated conditioning proposals of bauxite residue in order to improve physical and chemical characteristics. It was also evaluated plant species able to tolerate the high sodicity content and high pH. It has been found that the incorporation of gypsum and organic matter in the surface layers of the bauxite residue are able to provide more favorable conditions for the establishment of plant community. Among the plant species, some halophytes and tree species showed good development on the bauxite residue, such as *Acacia spp* and *Eucalyptus spp*. In conclusion, it was prepared a technical proposal for revegetation of DRS1 Hydro Alunorte, which is based on the best practices found by the time of this study.

**Keywords:** Revegetation. Bauxite residue. Bayer process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral do DRS1, Hydro Alunorte e DRS2.....	14
Figura 2 - Fluxograma do processo Bayer (Fortes et al. 2006).....	16
Figura 3 - Altura de 13 espécies arbóreas crescendo em resíduo sólido alcalino em Barcarena - PA (Tukey 5%). (Franco et al.; 2001).....	39
Figura 4 - Segregação das áreas para fechamento progressivo.....	42
Figura 5 - Ilustração da proposta para cobertura do DRS1.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos da composição química do resíduo de bauxita entre os maiores países produtores.....	17
Tabela 2 - Análise textural de resíduos de bauxita.....	18
Tabela 3 - Insumos utilizados na hidrossemeadura para em uma área de 1000 m <sup>2</sup> .....	34
Tabela 4 - Estratégias para melhoria do resíduo de bauxita.....	34
Tabela 5 - Quantidade de sementes utilizadas na técnica de hidrossemeadura em uma área de 1000m <sup>2</sup> .....	40
Tabela 6 - Principais espécies vegetais utilizadas para revegetação em resíduo de bauxita.....	40

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADRS – Área de Deposição de Resíduo Sólido

CE – Condutividade Elétrica

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DRS – Depósito de Resíduos Sólidos

EPA – *Environmental Protecyc Agency*

PAE – Plano de Ação de Emergência

PST – Porcentagem de Sódio Trocável

TAS – Taxa de Absorção do Sódio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>RESÍDUO DE BAUXITA.....</b>	<b>14</b>
2.1	A PRODUÇÃO DO RESÍDUO.....	14
2.2	CARACTERIZAÇÃO GERAL DO RESÍDUO DE BAUXITA.....	16
2.2.1	Características físicas do resíduo de bauxita.....	17
2.2.2	Propriedades químicas do resíduo da bauxite.....	19
2.2.3	Características biológicas.....	20
<b>3</b>	<b>DEPÓSITOS DE RESÍDUO DE BAUXITA.....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>ALUNORTE: PROCESSO, PRODUÇÃO DE RESÍDUO, DEMANDA TECNOLÓGICA PARA REVEGETAÇÃO E ESTUDOS CONDUZIDOS.....</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>O STATUS TECNOLÓGICO DA REABILITAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA.....</b>	<b>27</b>
5.1	CONDICIONAMENTO DO RESÍDUO DE BAUXITA.....	29
5.2	SELEÇÃO DE ESPÉCIES VEGETAIS.....	35
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
6.1	PROPOSTA PARA PREPARO DE ÁREA.....	40
6.2	PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DA CAMADA DE COBERTURA.....	41
6.3	PROPOSTA PARA REVEGETAÇÃO.....	43
6.4	PROPOSTA DE MONITORAMENTO DA REVEGETAÇÃO.....	43
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda global por alumínio aumenta a cada ano para diversas aplicações seja no transporte, construção civil ou no setor tecnológico. Genericamente, para produção de uma tonelada de alumina, matéria prima para produção do alumínio, gera-se 1,5 ton de resíduo de bauxita, também conhecida como lama vermelha (HAMADA, 1986). Estimativas recentes indicam a produção anual de cerca de 120 milhões de toneladas deste resíduo resultando em 3.5 bilhões de toneladas de estoque global. A disposição e estocagem de todo resíduo produzido ainda permanece como um dos maiores passivos da atualidade. Historicamente, na França e no Japão a disposição do resíduo é feita nos oceanos por razões econômica e ambientais. Já os norte americanos optaram pela sua estocagem em lagoas (GRAFE et al., 2011). Atualmente, no Brasil, o método de disposição mais comum é o *Dry Stacking*, no qual o resíduo com baixo teor de umidade é depositado em bacias impermeabilizadas. Embora tecnologias para a utilização deste material estejam sendo desenvolvidas para aplicações nas indústria do cimento, tijolos e blocos para construção (KLAUBER; GRAFE; POWER, 2011), estudos indicam que estas soluções, muitas vezes, enfrentam entraves como custos, transporte e dificuldades para encontrar empresas parceiras que absorvam o resíduo de bauxita em sua linha de produção.

Os impactos relacionados à deposição do resíduo de bauxita podem provocar sérios danos ambientais, principalmente devido à significativa concentração de cáusticos, o que torna o resíduo altamente alcalino (pH  $11.3 \pm 1.0$ ) (GRAFE et al., 2010). A emissão de particulados no período seco, contaminação do lençol freático e possíveis impactos à fauna e flora são alguns dos riscos ambientais inerentes aos depósitos de resíduo de bauxita. Adicionalmente, o depósito de resíduo pode ser observado à longa distância, o que pode comprometer a imagem da empresa caso a mesma não tome providencias que amenizem o impacto visual deixado pelo resíduo depositado.

O estabelecimento de vegetação mostra-se como um método ambientalmente sustentável e com bom custo benefício para a estabilização dos depósitos de resíduo de bauxita (TORDOFF et al., 2000). Os procedimentos de

condicionamento do resíduo para promover o crescimento da vegetação varia de acordo com os tipos de depósitos, condições climáticas e disponibilidade de recursos. Apesar das características físico-químicas do resíduo de bauxita não serem favoráveis para plantas, pesquisas recentes evidenciam a viabilidade de resíduos de bauxita sustentar o desenvolvimento vegetal após seu condicionamento (JONES; HAYNES, 2011; COURTNEY; KIRWAN, 2012; GRAFE et al., 2011).

Embora muitas pesquisas tenham sido conduzidas para revegetação em depósitos de resíduos de bauxita, é importante selecionar tecnologias e métodos aplicáveis para cada caso, visando o maior sucesso de desenvolvimento das espécies vegetais e conseqüentemente maior agilidade no descomissionamento do depósito.

A análise técnica deste estudo foi conduzida para o caso do Depósito de Resíduos Sólidos 1 (DRS1) da Hydro Alunorte, localizada no município de Barcarena, norte do estado do Pará (figura 1), no qual passará por descomissionamento após o fim de suas operações. No intuito de se estabilizar o resíduo de bauxita visando a diminuição dos riscos ambientais e aumentar a segurança estrutural do depósito, será adotado a revegetação como o método de descomissionamento.

Estudos de metodologias e técnicas de revegetação em depósitos de resíduos de bauxita oriundo do Processo Bayer no Brasil, principalmente na Amazônia, são limitados. Em linhas gerais, um Plano de descomissionamento constitui um instrumento de gestão ambiental que reúne as informações técnicas, projetos e ações que permitem atingir condições ambientais aceitáveis e seguras na área impactada. Neste sentido, o presente documento deve ser entendido como um estudo técnico, que descreve as diretrizes e práticas promissoras para o descomissionamento do Depósito de Resíduos Sólidos da Hydro Alunorte.



Figura 1 Visão geral do DRS1, Hydro Alunorte e DRS2  
Fonte: Hydro Alunorte

## 2 RESÍDUO DE BAUXITA

### 2.1 A PRODUÇÃO DO RESÍDUO

Apesar dos grandes avanços tecnológicos no setor de alumínio e das variedades de minério de bauxita encontradas no mundo, fundamentalmente, o processo Bayer é o mesmo desde a sua descoberta, em meados de 1885, por Karl Josef Bayer. Bayer descobriu que o hidróxido de alumínio poderia precipitar em forma cristalina a partir do resfriamento da solução de alumina sódica. Logo em seguida ele descobriu que essa solução poderia ser preparada pelo aquecimento da bauxita sobre alta pressão em uma determinada concentração de soda cáustica. Essas duas descobertas foram a base fundamental para o processo que hoje carrega o seu nome (HABASHI, 1988).

Desse processo gera-se um grande volume de resíduo de bauxita que produz o hidróxido de alumínio. A bauxita é uma rocha laterítica que é uma rocha resultante da ação do intemperismo, constituída essencialmente por hidróxidos de alumínio, tais como gibsit, diásporo e boemita, óxido e hidróxido de ferro, caulinita, óxido de titânio e minerais residuais.

A bauxita é moída e transportada a refinaria, onde é misturada em uma solução de soda cáustica, aluminato de sódio e carbonato de sódio sob alta temperatura e pressão, 140°C e 7atm, respectivamente. Esta etapa tem como objetivo aumentar o contato do hidróxido de alumínio contido na bauxita com a soda cáustica, para a obtenção de um maior grau de conversão da reação. Nos digestores, tem-se uma solução cáustica com alta concentração de aluminato de sódio, com resíduos de bauxita insolúveis, também comumente denominado como resíduo de bauxita ou lama vermelha na indústria da alumina. O resíduo é separado da solução de aluminato de sódio por decantação e posteriormente lavado e filtrado para redução do seu teor cáustico antes de ser descartado no depósito de resíduo.

O licor de aluminato de sódio, após a etapa de separação da lama, é enviada para filtros de pressão verticais onde as partículas de lama ainda presentes no licor são removidas. Na filtração, a solução rica em aluminato é resfriada em tanques flash por expansão á vácuo, para promover o sentido inverso da reação ocorrida na etapa da digestão. O vapor liberado pela expansão é aproveitado para pré-aquecer a solução cáustica que vai no sentido da digestão e moagem. A solução cáustica rica em aluminato resfriado, é enviado para cristalizadores que junto com a semente de hidróxido de alumínio, promovem a precipitação do hidróxido de alumínio.

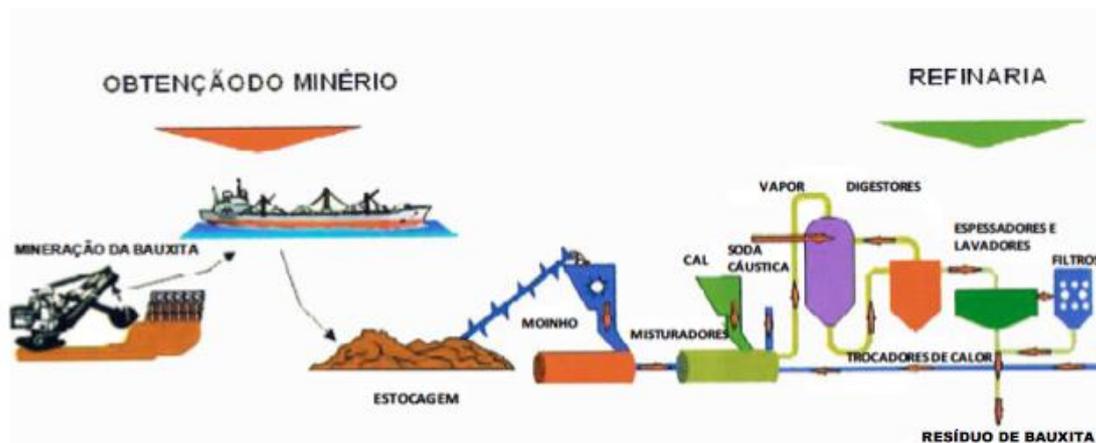


Figura 2 Fluxograma do processo Bayer  
 Fonte: Fortes et al. (2006).

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO RESÍDUO DE BAUXITA

Apesar dos processos de filtração para redução do seu teor cáustico, o resíduo permanece com alta alcalinidade e sodicidade no momento da sua estocagem (POWER et al., 2011). As propriedades físico-químicas do resíduo de bauxita são determinadas pela natureza da própria bauxita e pelos efeitos do próprio processo Bayer. A composição do resíduo de bauxita irá depender do método de processamento da bauxita na refinaria assim como das características do minério, porém sua sodicidade e salinidade tendem a ser semelhantes. Segundo Kirwan (2013) a alcalinidade do resíduo de bauxita é o resultado da reação do hidróxido de sódio com os componentes do minério de bauxita no processo Bayer. Devido à lavagem incompleta do material antes da sua disposição final, uma certa quantidade de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e aluminato de sódio ( $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ ) permanecem na fase líquida. Em geral, os elementos mais abundantes no resíduo de bauxita são  $\text{Fe} > \text{Si} \sim \text{Ti} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Na}$ , sendo que em média 70% consiste em fase cristalina e 30% em materiais amorfos (GRAFE et al. 2009). Na tabela abaixo são apresentadas as principais características dos resíduos de bauxitas dos maiores produtores mundiais.

Tabela 1 Exemplos da composição química do resíduo de bauxita entre os maiores países produtores

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O
Austrália	23,0 - 36,2	17,1 - 30	13,0 - 54	1,0 - 8,3	0,4 - 11,0
China	5,0 - 9,0	6,4 - 9,2	20,5 - 25,9	2,9 - 7,3	2,4 - 3,2
Grécia	39,3 - 48,0	15,6 - 16,9	6,9 - 9,2	4,8 - 7,1	2,4 - 3,3
Índia	24,5 - 54,8	14,8 - 24,3	6,2 - 7,3	13,5 - 18,0	3,3 - 5,3
Jamaica	53,5 - 64,2	2,1 - 8,2	0,6 - 1,3	10,9 - 13,3	0,3 - 0,8
Brasil	60,4 - 71,9	6,8 - 13,5	0,6 - 3,4	7,8 - 10,9	0,4 - 1,5
Turquia	37,6 - 39,8	17,3 - 20,2	15,2 - 17,1	4,1 - 4,9	7,1 - 12,1
Barcarena PA	40,20	19,25	16,40	5,7	9,40

Embora a literatura apresente informações controversas, segundo a *Environmental Protection Agency* (EPA) o resíduo de bauxita não é classificado como perigoso (EPA, 2005). Em alguns países como Canadá, Estados Unidos e União Europeia o resíduo é classificado como não perigoso, não havendo também controles regulatórios para o seu transporte (KLAUBER; GRAFE; POWER, 2011). No Brasil, apesar da Resolução CONAMA nº 452 de 02 de julho de 2012 não tratar especificamente deste material, o mesmo se enquadra em seu Anexo III como resíduo corrosivo, que pode provocar sérios danos quando em contato com tecidos vivos e como resíduo ecotóxico, que se liberado ao meio ambiente pode ocasionar efeitos tóxicos à biota. Alguns autores consideram o resíduo de bauxita como tóxico, devido ao elevado teor de hidróxido de sódio, que pode ocasionar sérios danos ambientais (HIND; BHARGAVA; GROCCOTT, 1999).

### 2.2.1 Características físicas do resíduo de bauxita

A distribuição do tamanho da partícula do resíduo de bauxita depende do processo de separação das partículas de areia após a etapa de extração da alumina do minério. Há algumas divergências na literatura quanto ao tamanho das partículas, por exemplo, Menzies, Fulton e Morrel (2004) mostram em seu estudo que o resíduo apresentou uma distribuição entre 10µm e ≥1000µm com mais de 50% das suas partículas sendo maiores que 250µm. Em contrapartida, as menores frações observadas variaram de ≤0,1µm a 100µm. Snars e Gilkes (2009) publicaram um trabalho no qual foram coletadas 11 amostras de diferentes refinarias divididas em 3 classes de tamanho (<2µm, 2-20µm e

>20 $\mu$ m). Em média, 31% das partículas foram classificadas como <2 $\mu$ m, 46% entre 2-20- $\mu$ m e 23% eram >20 $\mu$ m. Esta grande variação do tamanho das partículas se deve às diferenças nas tecnologias adotadas no processo, parâmetros operacionais e qualidade do minério da bauxita em si. Além disso, Fuller e Richardson (1986) também demonstrou que o método de estocagem do resíduo também pode influenciar em sua textura. A tabela abaixo apresenta a análise textural do resíduo de bauxita.

Tabela 2 Análise textural de resíduos de bauxita

Origem do resíduo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Australia - Gove	13	40	47
Australia - Kwinana	30	30	40
Canada	0	47	36
Jamaica	4 ~ 9	9 ~ 19	71 ~80
Espanha	12	50	38
Estados Unidos - Texas	8	66	26
Hydro Alunorte	15	54	31

Fonte: Wehr et al. (2006); Fortes et al. (2000)

A densidade do resíduo varia com as condições físicas, como a textura, matéria orgânica, porosidade e método de disposição do resíduo. Segundo Nguyen e Boger (1998), em média os resíduos de bauxita possuem 2,5 $\pm$ 0,7g cm<sup>-3</sup>. A comparação da densidade do resíduo de bauxita entre alguns estudos pode ser problemática devido a alguns autores falharem ao não especificar sob quais condições de umidade a densidade superficial do resíduo foi medida. Consequentemente encontra-se variação média de densidade entre 1,6g cm<sup>-3</sup> e 3,5g cm<sup>-3</sup> (M.GRAFE; C. KLAUBER, 2011). Densidades superficiais superior a 1,5g cm<sup>-3</sup> dificultam a penetração das raízes no solo, impedindo assim o estabelecimento da vegetação (NIKRAZ et al. 2007).

A alta densidade, resultante principalmente das partículas finas presentes no resíduo, podem se agregar formando uma massa sólida que contém baixa porosidade, resultando também em uma baixa condutividade hidráulica (Xue, Shegguo et al., (2015). Bell e Meecham (1978) demonstraram que a condutividade hidráulica do resíduo de bauxita fica abaixo de 0,003cm min<sup>-1</sup>. Em tais condições poucas espécies vegetais poderiam sobreviver, devido à baixa taxa de infiltração de água no solo. Baixas taxas de condutividade

hidráulica também podem dificultar a drenagem, favorecendo a formação de pontos de encharcamento (JONES; HAYNES 2011). A superfície dos depósitos do resíduo de bauxita são favoráveis para o acúmulo de água durante os períodos chuvosos, o que demonstra a necessidade da instalação de drenagens para assegurar que o estabelecimento da vegetação não seja comprometida (XUE et al., 2015).

### 2.2.2 Propriedades químicas do resíduo de bauxita

Segundo Xue et al. (2015) os resíduos de bauxita tem alta alcalinidade, com pH que varia entre 9.7 e 12.8. O alto pH é devido a formação de múltiplos sólidos alcalinos no processo Bayer onde há adição de NaOH e outros produtos químicos. Grafe (2011) denomina o pH como a variável mestre, pois segundo o autor a maioria das reações são dependentes do pH da solução. Ainda, o mesmo autor avalia que a média do pH dos resíduos de bauxita varia entre 10.3 e 12.3 devido às concentrações remanescentes de NaOH e Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> oriundos do processo Bayer. Os principais ânions alcalinos na solução do resíduo de bauxita são OH<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> /HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> / Al(OH)<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>. O elevado pH (concentração de OH<sup>-</sup>) assim como a concentração de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> na solução do substrato pode levar à efeitos fitotóxicos na planta, causando inibição no desenvolvimento radicular e conseqüentemente inibição do crescimento da parte aérea (JONES; HAYNES, 2011)

A salinidade geralmente é mensurada pela condutividade elétrica (CE) da solução. Segundo o sistema brasileiro de classificação de solo os solos são normalmente classificados como salinos quando a sua CE ultrapassa 4dS/m. Apesar de ocorrer diferentes tolerâncias entre espécies vegetais, geralmente os efeitos no desenvolvimento são leves entre 2 – 4dS m, severo entre 4 – 6dS m e muito severo, com alto potencial de mortalidade, em taxas superiores a 6mS cm<sup>-1</sup> (MAAS, 1990). Em resíduos de bauxita esses valores podem atingir entre 30 – 40 dS m (WOODWARD, 2008). A falta de agregação estrutural, a cimentação e a formação de poeira na camada superficial do resíduo de bauxita são algumas das características associadas à presença elevada de Na<sup>+</sup>, que por sua vez proporcionam elevada CE. A presença do Na<sup>+</sup> no meio é um grande inibidor na formação de agregados estruturais e da condutividade

hidráulica, desfavorecendo o desenvolvimento vegetal. O principal efeito negativo na planta em alta salinidade é o estresse hídrico e o baixo crescimento radicular e da parte aérea (JONES; HAYNES, 2011).

Estudos conduzidos por Fuller et al. (1982), em refinarias da Alcoa, demonstraram que as concentrações de  $\text{Na}^+$  em solução alcançam valores de 17 a  $200\text{mmolL}^{-1}$ , excedendo 2 a 4 vezes mais as concentrações de  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ , demonstrando que carbonatos de cálcio e magnésio possuem baixa solubilidade em  $\text{pH} > 10$ . A excessiva concentração de  $\text{Na}^+$  pode resultar na inibição das reações enzimáticas no citoplasma e diminuir a retirada de outros elementos como K, Mg, e Ca pela planta (BUCHER et al. 1985)

Segundo (SUMMER, 1995) a sodicidade é classificada pela porcentagem de sódio trocável (PST) ou pela taxa de absorção do sódio (TAS). Os solos são classificados geralmente como sódicos quando o seu PST é maior que 15% ou seu TAS maior que 13. Há muitas maneiras da salinidade influenciar o desenvolvimento do vegetal de forma negativa, sendo a toxicidade ou desequilíbrio nutricional das plantas uma das primeiras consequências devido ao alto teor de  $\text{Na}^+$  no solo (NAIDU; RENGASAMY, 1995). Segundo Keren (2000), o acúmulo de sal no citoplasma pode interromper atividades enzimáticas enquanto o seu acúmulo nas folhas pode levar à desidratação e morte das células foliares. Além disso, a alta concentração do  $\text{Na}^+$  na solução do solo reduz a absorção do Ca pela planta, levando à sua deficiência no vegetal (KOPITTKE ; MENZIES, 2005; QADIR; SCHUBERT, 2002). A deficiência do Ca afeta a permeabilidade das células vegetais e conseqüentemente diminui o transporte e absorção de nutrientes essenciais para a planta. Levy (2000) também demonstrou que a deficiência do Ca leva a deficiência de outros elementos como K, Zn, Cu e Mn.

### 2.2.3 Características biológicas

As características do resíduo de bauxita como a sua baixa retenção de água, alta alcalinidade e baixo aporte de nutrientes são fatores que inibem as atividades microbiológicas e limitam o crescimento vegetal no resíduo (JONES et al. 2010). Segundo Krishna (2005), o resíduo de bauxita sem nenhum tipo de tratamento é um substrato ambientes praticamente estéril para o

desenvolvimento microbiológico e vegetal. Em alta alcalinidade, salinidade e deficiência nutricional poucos microrganismos conseguem sobreviver, sendo que para os microrganismos heterotróficos, a ausência de fonte energética, incluindo carbono e nitrogênio, são os fatores mais limitantes para seu sucesso (GRAFE; KLAUBER, 2011).

O sucesso de uma revegetação tem sido baseado em indicadores visuais como o crescimento vegetal e as propriedades físico-químicas do solo. No entanto, mais recentemente as atenções começaram a ser focadas no desenvolvimento do solo interagindo com toda a sua biota. As atividades microbianas são essenciais para sustentar uma cobertura vegetal em resíduos de bauxita. Os microrganismos desempenham um papel crucial na formação do solo, ciclagem de nutrientes e para a estabilidade do ecossistema a longo prazo (SHMALENBERGER et al., 2013). Adicionalmente, o uso da microbiota como indicador de sucesso de reabilitação assim como a presença de certos microrganismos fornecerem informações sobre o desenvolvimento da restauração ambiental (HARRIS, 2009; LEWIS, 2010).

Em trabalho realizado por Schmalenberger (2013), as análises taxonômicas revelaram que o processo de reabilitação resultou em uma maior acumulação de população de bactérias típicas do solo, incluindo *Acidobacteriaceae*, *Nitromosomonadaceae* e *Caulobactereaceae*. Por outro lado, em áreas de resíduos sem reabilitação foram encontradas bactérias comuns de áreas associadas à alta salinidade e alcalinidade como *Acetobactereaceae* e *Chitinophagaceae*. Em outro trabalho realizado por Krishna (2005) foi testado o uso do *Aspergillus tubingensis* na tentativa de reduzir o pH do resíduo de bauxita e aumentar o crescimento e taxa de sobrevivência das plantas. Esta espécie possui a capacidade de liberar componentes ácidos para o meio, o que resultou na redução do pH em amostras de solo misturado com diferentes porcentagens de resíduos de bauxita (0, 25, 50 e 75%). Além disso, foi verificado a capacidade de acumular diferentes metais em seu micélio, consequentemente elevando o sucesso de desenvolvimento vegetal.

### **3 DEPÓSITOS DE RESÍDUO DE BAUXITA**

Os depósitos de resíduos sólidos são caracterizados como barragens de contenção, cujas estruturas são construídas para conter os materiais produzidos, paralelamente ao produto final no processo de beneficiamento da bauxita. As barragens de resíduos industriais são reconhecidas por gerarem um impacto ambiental significativo. Neste sentido, a gestão destes depósitos tem se tornado um dos critérios pelos quais o desempenho ambiental da empresa é julgado pelos órgãos ambientais licenciadores.

No intuito de regulamentar a segurança de barragens foi estabelecido na Lei Nº12.334/2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens, diretrizes para que fossem garantidas os meios necessários a sua segurança e capacitar profissionais para a tarefa de implementação da lei e monitoramento dos resultados almejados. A lei ainda transfere ao órgão fiscalizador do empreendimento a competência para determinar o Plano de Ação de Emergência – PAE, em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem, devendo ser exigido sempre que a barragem seja classificada como dano potencial alto.

No processo de refino da bauxita para a obtenção da alumina, denominado processo Bayer, é utilizada soda cáustica, a qual contamina os resíduos gerados pelo processo. Os resíduos da bauxita, contaminados com soda cáustica, são dispostos por via úmida em áreas impermeabilizadas e dotadas de sistemas de drenagem de fundo denominados comumente de Área de Disposição de Resíduos Sólidos (ADRS) ou Depósito de Resíduo de Sólidos (DRS).

No início da década de 70 eram conhecidos somente dois métodos de disposição do resíduo de bauxita, a descarga marinha no qual o resíduo era descartado diretamente ao fundo dos oceanos, praticado principalmente pela França e Japão, e a disposição em lagos de rejeito em que o resíduo era descartado em barragens formada em depressões e vales naturais, comumente adotado nos Estados Unidos (GRAFE; KLAUBER 2011). Devido aos grandes volumes atualmente produzidos e pelos riscos ambientais inerentes, a disposição do resíduo de bauxita se tornou o maior desafio para a

sustentabilidade da indústria de alumínio (KUMAR et al., 2006). Há pelo menos 4 tipos de disposição do resíduo de bauxita, incluindo estocagem a seco e o empilhamento a seco, além dos anteriormente citados, sendo que o Brasil utiliza atualmente o método de estocagem à seco ou empilhamento à seco.

O descarte de resíduos sólidos em ambientes marinhos não necessita de áreas físicas para disposição do resíduo, com isso não há planos de descomissionamento ou de reabilitação. Em comparação com os outros métodos de disposição do resíduo também é o que possui os custos mais baixos de operação. No entanto, os riscos contaminação do ecossistema marinho por metais pesados e pelo alto teor cáustico é elevado. Adicionalmente, o aumento da turbidez da água na área de descarte pode comprometer a sobrevivência de espécies marinhas. Por estes fatores, desde a década de 80, órgãos internacionais vem desencorajando as empresas a continuarem com este tipo de disposição do resíduo (POWER et al., 2011; XUE et al., 2015)

A disposição do resíduo de bauxita com baixo teor de sólidos também é conhecido na literatura como *lagooning*, no qual o resíduo é estocado em forma líquida em vales naturais ou bacias de rejeito. Dentre os métodos de disposição em terra firme é o que possui o menor custo de implantação, haja vista que não é necessário a filtração do resíduo antes da sua estocagem. Para evitar a contaminação do solo e da água subterrânea, materiais selantes são instalados no fundo destas áreas. Devido ao alto teor de líquido, este método requer uma grande área para disposição do resíduo. Também por este motivo o fechamento e a reabilitação da área utilizada é complexa, sendo, para isto, necessário um planejamento de longo prazo (POWER; GRAFE; KLAUBER., 2011; NGUYEN; BOGER, 1998).

O conceito da estocagem do resíduo conhecido como *Dry Stacking* é significativamente diferente em comparação aos anteriores. O seu teor de sólidos é geralmente entre 48 e 55%. Como resultado do aumento dos sólidos, o tamanho da área necessária para estocagem do resíduo é minimizada e os riscos de contaminação por vazamentos são consideravelmente diminuídos, embora o planejamento para o seu descomissionamento, exige filtração prévia

antes do descarte e a dificuldade do estabelecimento da vegetação no resíduo sejam seus pontos críticos (POWER; GRAFE; KLAUBER, 2011).

Por último, o método de estocagem denominado como *Dry Cake Stacking* consiste na disposição de um resíduo com percentual de sólidos ainda maior ( $\geq 65\%$ ) através da remoção mecânica do líquido (NIKRAZ et al., 2007). Este método diminui a probabilidade de colapsos das barragens e sua área útil é menor dentre as práticas apresentadas. O seu teor de cáusticos é ainda menor, pois parte do licor presente no resíduo é retornado para o processo Bayer. Atualmente o método de disposição do resíduo de bauxita utilizado na Hydro Alunorte é o *Dry Cake Stacking* com teor de sólidos chegando a 65% e para ser descomissionado o depósito de resíduos precisa ser revegetada. O processo de estabelecimento de uma vegetação sobre o resíduo é facilitado pela possibilidade da utilização de equipamentos agrícolas e pela sua menor alcalinidade.

#### **4 ALUNORTE: PROCESSO, PRODUÇÃO DE RESÍDUO, DEMANDA TECNOLÓGICA PARA REVEGETAÇÃO E ESTUDOS CONDUZIDOS**

A Hydro Alunorte está localizada no distrito de Murucupí, cidade de Barcarena que está a uma latitude 01°30'21" sul, longitude 48°37'33" oeste, e a uma altitude de 15 metros em relação do nível do mar. A empresa está configurada como uma refinaria de alumina - óxido de alumínio, de fórmula química  $Al_2O_3$  e aplica o processo desenvolvido pela ALCAN. A Hydro é detentora de tecnologia e tem pleno domínio de toda a cadeia do alumínio, desde a extração da bauxita até a produção de utensílios em alumínio.

O modelo de produção adotado pela Hydro Alunorte identificado como "Processo Bayer", foi descoberto no final do século XIX pelo químico austríaco Karl Joseph Bayer e consiste na lixiviação alcalina da bauxita (tratamento com soda do minério) para extração da alumina contida no minério. A alumina produzida na Hydro Alunorte é classificada como do tipo sandy, sendo o principal insumo à produção do alumínio primário, em processos eletrolíticos ou reduções.

As operações da fábrica foram iniciadas em Julho de 1995, tendo sido submetidas, até hoje, a três grandes expansões que a colocaram na posição de maior produtora de alumina do mundo. Após o término da terceira expansão, em Agosto de 2008, a capacidade de produção da empresa passou a ser de 6,3 milhões de toneladas de alumina por ano, tornando-se responsável por 7% da produção mundial de alumina.

A bauxita processada na Hydro Alunorte é proveniente de duas jazidas, ambas situadas no Estado do Pará. O minério é recebido da Mineração Rio do Norte – MRN, em forma de bauxita úmida, através de navios graneleiros que descarregam no Porto de Vila do Conde, a jazida está localizada as margens do Rio Trombetas em Oriximiná. A outra fornecedora de minério é a Hydro Paragominas, onde a bauxita é recebida na forma de polpa diluída em água através de um mineroduto com 244 quilômetros de extensão, cuja especificação para cada um dos componentes químicos presentes no minério apresenta variabilidade dentro das expectativas em função da boa qualidade da jazida. Em seu processo, a empresa gera em média 1t de resíduo a 65% de concentração de sólidos para cada tonelada de alumina produzida, gerando anualmente um volume aproximado de 6 milhões de m<sup>3</sup> de resíduo de bauxita.

Atualmente na Alunorte, este resíduo é transportado, via caminhões com teor de sólidos de aproximadamente 65%, para uma área denominada Depósito de Resíduos Sólidos (DRS), localizada a aproximadamente 1500 m da fábrica e depositado pela técnica conhecida como dry stacking. A área do DRS utiliza a tecnologia de impermeabilização e é dotada de um sistema de drenagem de fundo que mantém a fração líquida do resíduo em circuito fechado, oferecendo vantagens operacionais e ambientais. O DRS possui uma área de 320 ha que e em seu entorno imediato há um grande cinturão verde com espécies pioneiras da região, característica da floresta amazônica. Devido à aproximação do final da sua vida útil, o DRS1 passará pela fase de descomissionamento.

O uso futuro inicialmente proposto no Plano Conceitual de Descomissionamento do DRS pela Hydro Alunorte consistiu na preservação do platô, transformando a área em um mirante. Esse mirante poderá ter utilidades múltiplas, tais como: desenvolvimento de atividades educacionais, implantação de museu, implantação de horto florestal e/ou de atividades recreativas de lazer para a empresa. Tendo em vista propósito do plano de descomissionamento, entende-se que a técnica ser adotada para área de disposição de resíduo de bauxita será sua revegetação.

Para elaboração uma proposta técnica definiu-se os principais objetivos que deverão ser atingidos após o desenvolvimento do trabalho, tais como:

- Estabilidade física da área;
- Estabilidade química da área;
- Estabilidade biológica da área.

Neste sentido, existe a demanda tecnológica para promover a revegetação do local estudado, buscando sempre o melhor custo-benefício e garantindo que o descomissionamento do DRS1 não comprometa a qualidade ambiental futura através de eventuais passivos ambientais, sociais e econômicos.

A Hydro Alunorte, em parceria com a Embrapa Agrobiologia, desenvolveu estudos de revegetação no DRS, tendo como objetivo desenvolver um plano de revegetação calcado na dinâmica de populações de ecossistemas florestais, ou seja, na sucessão ecológica.

Sabe-se que o crescimento das espécies vegetais neste substrato é limitado pelo pH alcalino, pela baixa disponibilidade de água e principalmente em função da elevada presença de íons como o sódio e o carbonato, que podem se tornar tóxicos. Tendo em vista esta situação, no ano de 2000 a ALUNORTE em parceria com a EMBRAPA Agrobiologia-PA, estabeleceu um amplo programa experimental neste local, orientando-se em duas linhas de trabalho:

1<sup>a</sup>) Reabilitação do substrato removendo o excesso de Na<sup>+</sup> e reduzindo o índice do pH, para possibilitar o crescimento das espécies vegetais. Adotando medidas adicionando grandes quantidades de íons com cargas superiores ao

do Na<sup>+</sup>, por exemplo, o cálcio aliado a um excesso de água, apresentando resultados em médio prazo (18 meses);

2ª) Uma outra linha de trabalho foi relacionada à seleção de espécies mais resistentes às condições excessivas de concentrações alcalina e salina. Para este tipo de situação, as espécies de melhor adaptabilidade são aquelas pertencentes à família das leguminosas, tendo em vista maior representatividade em clima tropical, densidade, diversidade, e principalmente pela existência de espécies arbóreas de rápido crescimento que possibilita elevada deposição de material orgânico no solo, além de sistema radicular de grande plasticidade e associação com microrganismos como bactérias fixadoras de nitrogênio do ar e fungos micorrízicos.

Já em 2014, a Hydro Alunorte conduziu testes de revegetação sobre o DRS através de uma empresa contratada, no qual o objetivo foi avaliar a eficiência de diferentes métodos de revegetação e o desenvolvimento de diferentes espécies de gramíneas e leguminosas tropicais sobre o resíduo de bauxita.

Os estudos foram executados em uma área de 10.000m<sup>2</sup> alocada no topo do depósito, em região favorável para realização dos experimentos. A área foi subdividida em seis tratamentos: cobertura com placa de gramas com aplicação de adubo (T1); cobertura com placa de gramas sem aplicação de adubos (T2); semeadura direta com adubo mineral (T3); Semeadura direta sem adubo mineral (T4); aplicação de manta sintética (T5) e hidrossemeadura (T6).

Cada técnica foi avaliada quanto a rapidez no revestimento, melhora instantânea no efeito estético e proteção contra os efeitos erosivos. Além disso, as técnicas foram avaliadas quanto ao seu custo de aplicação, visando determinar o(s) método(s) de revegetação que oferece(m) a melhor relação custo benefício (EcoFlorestal, 2014)

Como resultado deste estudo, dentre as técnicas experimentadas as que apresentaram os melhores resultados foram os métodos de hidrossemeadura e a aplicação de placas de grama. Foi verificado que as duas técnicas conferiram maior proteção do terreno contra erosão provocada pelo vento. Além disso, o melhor custo benefício ficou com a hidrossemeadura.

## **5 O STATUS TECNOLÓGICO DA REABILITAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA**

A melhor destinação para o resíduo de bauxita seria o uso industrial como matéria prima para outras aplicações, porém a não ser que exista uma sinergia muito grande entre duas indústrias, uma produtora e outra consumidora do resíduo de bauxita à uma curta distância, a aplicabilidade do material se torna praticamente inviável para ambas as partes. É relevante ainda considerar que há poucas evidências do sucesso para a aplicação do resíduo de bauxita em outras indústrias, seja devido à enorme quantidade produzida ou pela dificuldade logística. Atualmente, a quantidade de resíduo de bauxita produzida no mundo supera inúmeras vezes a sua demanda, agravado pela necessidade de que as áreas de disposição da refinaria sejam revegetadas após o seu descomissionamento (WARD, 1987; WILLIAMS, 1996).

A transformação de um material potencialmente nocivo ao meio ambiente em uma forma que possa suportar a vida vegetal por meio de reabilitação, possivelmente é a maneira mais sustentável de destinação do resíduo de bauxita. A sobreposição de camadas de materiais férteis sobre o resíduo auxilia no estabelecimento de plantas, além de que o manejo contínuo da área reabilitada é de extrema importância para a efetividade do desenvolvimento vegetativo. Segundo Wehr, Fulton e Menzies (2006) o sucesso da reabilitação também depende da drenagem da área e da habilidade da vegetação em resistir ao ressurgimento de alcalinidade oriunda de camadas mais inferiores do resíduo.

A revegetação dos depósitos de resíduos é capaz de estabilizar a superfície extremamente susceptível ao vento, e causa redução das emissões de particulados. A cobertura vegetal também é capaz de limitar a erosão hídrica nos resíduos, auxilia na estabilização e segurança dos taludes, melhora a estética do depósito esse processo é conhecido como fitoestabilização. No entanto, como já visto, o resíduo de bauxita possui características extremamente desafiadoras para a estabilização da vegetação devido à sua alta alcalinidade, salinidade, altas concentrações de  $\text{Na}^+$ , alta condutividade

elétrica, alta densidade, baixa retenção de água e ausência de camada orgânica em sua superfície.

Uma revegetação bem sucedida deve envolver o desenvolvimento de um volume de matéria orgânica nas camadas superiores, que seja capaz de permitir o crescimento de comunidades microbianas que irão conduzir a ciclagem de nutrientes para que se garanta o fornecimento de nutrientes para as plantas a longo prazo. As espécies vegetais a serem selecionadas também devem ser capazes de suportarem a salinidade e alcalinidade de forma que possam se estabelecer e crescer nestes ambientes. A revegetação em áreas de estocagem de bauxita também irá depender, em parte, de uma fonte eficaz de nutrientes para as plantas. Alguns estudos prévios indicam que fertilizantes e compostos orgânicos trazem grandes benefícios à revegetação.

As diretrizes para o fechamento do DRS são voltadas, principalmente, para a estabilização das condições geoquímicas e geotécnicas da área impactada pela disposição dos resíduos e para a revegetação do local buscando o equilíbrio paisagístico. O conjunto dessas medidas abrange o final da operação e o descomissionamento do depósito, bem como, a revegetação e o monitoramento da área, assegurando, assim, o sucesso do fechamento. Em síntese, as atividades de fechamento e revegetação devem ser planejadas de maneira a atender aos seguintes pontos:

- Tornar a área afetada pela operação da estrutura do DRS capaz de oferecer condições de estabilidade, segurança e sustentabilidade ao longo do tempo;
- Preservar o meio ambiente dos agentes de deterioração química e física;
- Restabelecer a drenagem da área;
- Recompôr a vegetação em todos os locais possíveis;

## 5.1 CONDICIONAMENTO DO RESÍDUO DE BAUXITA

Há muitos estudos visando a melhoria da camada superficial do resíduo de bauxita, seja pela adição de fertilizantes, materiais orgânicos, lodo ou cobertura por *top soil* (FULLER; RICHARDSON, 1986; COURTNEY; TIMPSOM, 2005; WEHR; FULTON; MENZIES, 2006; JONES et al., 2012). A aplicação de resíduos orgânicos em solos salino-alcálinos é considerada como uma boa prática para a remediação do solo (WU et al., 2015). De fato, há vários métodos para o tratamento das características físico-químicas e biológicas do resíduo, no entanto é importante considerar sua especificidade, assim como o local no qual o depósito a ser reabilitado está inserido, visando o melhor custo benefício e a efetividade dos resultados.

Há alguns estudos que apontam a aplicação do gesso em resíduo de bauxita como na redução do seu pH (BARROW, 1982; HO et al 1989; WONG; HO, 1993; COURTNEY; TIMPSON, 2005). O gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) normalmente é aplicado em resíduos com alta alcalinidade. O resíduo de bauxita possui aproximadamente pH 11, e, com a aplicação do gesso ocorre uma redução para aproximadamente 8.5 – 9,0 (KIRWAN et al., 2013). A capacidade do gesso em reduzir o pH está relacionada à capacidade do material em dissolver e liberar  $\text{Ca}^{2+}$  na solução para reagir com o  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ . (GRAFE et al., 2011).

Kirwan et al. (2013) examinaram diferentes agentes neutralizantes para mensurar a eficiência da queda do pH do resíduo de bauxita e verificou que além do gesso reduzir o seu pH, pode ser também uma fonte de suprimento de  $\text{Ca}^{2+}$  a longo prazo, com potencial de sustentar um pH baixo. No entanto, o autor admite que para alcançar este objetivo uma alta dosagem de gesso pode ser necessária. Courtney e Kirwan (2012) investigaram a capacidade do gesso em reduzir o pH do resíduo de bauxita e do Al disponível para a planta. Os resultados demonstraram que o pH abaixou para patamares que possibilitaram o desenvolvimento vegetal. Foi verificado que com o passar do tempo os níveis de Al e Na decresceram. Courtney et al (2013) avaliou 5 diferentes amostras de resíduo de bauxita com diferentes doses de gesso e cronologias distintas. Em todas as amostras houve a redução do pH do meio assim como expressivo

decréscimo da condutividade elétrica. Chauhan et al (2011) avaliou 4 diferentes tipos de combinações de gesso e vermicomposto sobre o desenvolvimento de 5 espécies vegetais, sendo que a combinação de 20% de gesso e 10% de vermicomposto apresentou melhores resultados em relação às outras proporções de gesso e vermicomposto avaliados.

A matéria orgânica pode fornecer nutrientes para as plantas, através da sua mineralização, diminuir a retenção de água devido à redução da compactação, estimular a agregação do solo, estabilizar a sua estrutura e fornecer energia para os microrganismos (XUE et al., 2015). Estudos realizados por Wong e Ho (1992, 1993, 1994) investigaram as propriedades físico-químicas do resíduo de bauxita após a utilização de gesso e lodo de esgoto e seus efeitos no desenvolvimento de gramíneas, mostrando que além de consideráveis diminuição do pH pela adição do gesso, o lodo auxiliou na diminuição do Na trocável tornando-o menos disponíveis aos vegetais. Fuller et al (1982) avaliaram o crescimento de *Distichlis spicata* var. *Stricta* através da produção de massa seca pela aplicação de lodo de esgoto como fertilizador, e observou significativo aumento de biomassa, o que foi em parte atribuído à capacidade do lodo reagir com o Al do resíduo. Jones et al., (2011) avaliaram o efeito da incorporação de composto orgânico sobre as características físico-químicas do resíduo de bauxita e sobre o desenvolvimento de *Acacia Saligna* e *Lolium rigidum*. A adição do composto orgânico aumentou os níveis de Mg, K, Na e Ca, diminuiu a concentração do Al e aumentou consideravelmente o teor do C orgânico e a relação C/N, sendo que a produção da biomassa vegetal aumentou aproximadamente 20% em comparação ao controle.

Wher et al (2006) demonstrou que a revegetação em resíduos de bauxita usando cobertura com *top soil* trazia benefícios. A análise de crescimento radicular das plantas (*Chloris gayana* Kunth) mostrou que apesar do resíduo ter características indesejáveis para a vegetação, as plantas foram capazes de retirar o nutriente do solo e penetrar raízes até 60cm abaixo da camada do resíduo de bauxita. Segundo Jones e Haynes (2011), a camada de *top soil* varia de 20 a 200cm, promovendo condições para o desenvolvimento das raízes das plantas. Um solo raso irá desenvolver apenas coberturas com

gramíneas, enquanto um solo mais profundo é capaz de suportar uma vegetação mais robusta composta por árvores, arbustos e gramíneas.

Devido à baixa disponibilidade de nutrientes no resíduo de bauxita, aplicações de fertilizantes são necessárias em ordem a favorecer o estabelecimento da vegetação. Usualmente, as taxas de aplicações de nutrientes em áreas de reabilitação de resíduo de bauxita estão entre 250–270 kg/ha N, 200–300 kg/ha P, 97–300 kg/ha K, 30 kg/ha Mg, 6–15 kg/ha Mn, 6–16 kg/ha Mg, 6–10 kg/ha Ca, 0.2–0.25 kg/ha Mo, e 1.0–1.5 kg/ha B (EASTHAM; MORALD, 2006; MEECHAM; BELL, 1977). No entanto, segundo Jones e Haynes (2011), em áreas que receberam incorporações de compostos orgânicos, as doses de fertilizantes poderão ser reduzidas devido à capacidade de suporte nutricional do material orgânico.

Courtney et al (2009) observaram a importância na continuidade de aplicação de fertilizantes com o objetivo de manter a cobertura vegetal a médio prazo (5-10 anos) após verificarem que as análises de tecido vegetal revelaram várias deficiências nutricionais após este período. Assim, rotina de monitoramento da disponibilidade de nutriente no resíduo e do desenvolvimento da vegetação é aconselhável em áreas de reabilitação. Tal estratégia, bastante comum em campos agrícolas, permite uma melhoria da estimativa da quantidade de fertilizantes a ser aplicada em uma determinada área, de acordo com as análises de rotina. A formação de um banco de dados ou normas sobre a composição do resíduo em relação aos macro e micro nutrientes disponíveis e dos fatores potencialmente fitotóxicos em relação a um tipo de vegetação, é de grande auxílio para a estratégia de fertilização e eficácia da revegetação (JONES; HAYNES, 2011). Eastham et al (2006) compararam os resultados da biomassa vegetal após aplicação de fertilizantes inorgânicos e compostos orgânicos. Foi observado que o crescimento das espécies vegetais foram semelhantes nas amostras que utilizaram esterco de galinha em comparação aos fertilizantes inorgânicos. No entanto, o custo de aplicação do fertilizante inorgânico foi consideravelmente menor do que a aplicação do esterco de galinha, mostrando a importância desta estratégia.

Eastham, Morald e Aylmore (2006) questionam o uso de fertilizantes a base de  $\text{NH}_4^+$  em áreas de reabilitação de resíduos de bauxita. Segundo os autores, a baixa taxa de nitrificação e o alto pH podem promover a perda gasosa de N através da volatilização da amônia. Ainda, Bell e Meecham (1977) descobriram toxicidade em algumas espécies de gramíneas após aplicação de fertilizantes a base de  $\text{NH}_4^+$  em resíduo de bauxita. Eles sugeriram que este fato ocorria por que o N era aplicado como  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  e as grandes perdas em produção de biomassa, em aplicações maiores que  $200\text{kg N ha}^{-1}$ , eram devidas a toxicidade por  $\text{NH}_4^+$ , em razão da falta de bactérias nitrificantes capazes de converterem  $\text{NH}_4^+$  em  $\text{NO}_3^-$ . A aplicação de compostos orgânicos no resíduo de bauxita provavelmente pode contribuir para diminuir a toxicidade por  $\text{NH}_4^+$ , por favorecer a ocorrência de bactérias nitrificantes e pela diminuição da concentração do  $\text{NH}_4^+$  na solução do solo.

O aumento do pH e a concentração do  $\text{OH}^-$  leva ao equilíbrio químico para a direita, assim promovendo a acumulação de  $\text{NH}_{3(\text{aq})}$  e  $\text{NH}_{3(\text{g})}$  no solo e perda de  $\text{NH}_{3(\text{g})}$  para a atmosfera. A incorporação de  $\text{NH}_4^+$  no *topsoil* irá reduzir as perdas, em função da redução na concentração de amônia próximo a superfície. Assim, nos primeiros anos de reabilitação do resíduo de bauxita é prudente evitar a incorporação de fertilizantes a base de  $\text{NH}_4^+$ .

Ressalta-se que no experimento realizado pela EMBRAPA-PA, citado no capítulo 4, os tratamentos de campo que apresentaram os melhores resultados foram a) a cobertura do resíduo sólido com material proveniente do horizonte A de um Planossolo; b) a cobertura do resíduo sólido com 30 cm de terra vegetal e c) a cobertura do resíduo sólido argiloso com o resíduo sólido arenoso.

As adubações na cova, testadas pela Embrapa (100 g de fosfato de rocha, 10 g de micronutrientes na forma de FTE-Br-12 e 25 g de calcáreo) e pela ALUNORTE (200 g de gesso na cova, espalhados no fundo e nas laterais, 5 L de composto orgânico, 100 g de fosfato de rocha, 25 g de cloreto de potássio, 25 g calcário dolomítico e 10 g de micronutrientes FTE-BR 12), atenderam as exigências das mudas na fase inicial de estabelecimento (2 a 3 anos).

Além disso, o estudo da EMBRAPA concluiu que o uso isolado de matéria orgânica na cova de plantio apresentou efeito linear positivo em função da quantidade aplicada, sendo que a combinação da cobertura com solo (40 cm) mais a aplicação de composto orgânico (5 L) mostrou-se como o melhor tratamento em condições de campo. Além disso, o uso de areia como camada de cobertura sobre o resíduo sólido permitiu o estabelecimento de algumas espécies mais agressivas e tolerantes à salinidade, sem contudo apresentarem uma boa taxa de crescimento.

Já no estudo realizado pela empresa Ecoflorestal, não houve adição de top soil ou material orgânico sobre o resíduo de bauxita para condução de espécies forrageiras. O condicionamento utilizado no método que obteve o melhor resultado (hidrossemeadura) é apresentado abaixo (tabela 03).

Tabela 3 Insumos utilizados na hidrossemeadura para em uma área de 1000 m<sup>2</sup>

ADUBOS	Uréia - Nitrogênio	kg	50
	Cloreto de Potássio - KCl	kg	50
	Super Fosfato Simples - Fósforo	kg	50
	Yorim	kg	25
	Fixador Orgânico	l	9

Assim, temos resumidamente, a síntese dos principais métodos para condicionamento do resíduo de bauxita com suas respectivas melhorias observadas.

Tabela 4 Estratégias para melhoria do resíduo de bauxita

<b>Técnicas aplicadas</b>	<b>Melhorias observadas</b>	<b>Autores</b>
Gesso	Redução do pH, fonte de suprimento de cálcio para os vegetais, capacidade de reduzir a disponibilidade do Al	Kirwan et al (2013)
Gesso + lodo	Além da redução pH, o lodo diminui a disponibilidade do Na para as plantas	Wong e Ho (1992, 1993, 1994)
<i>Top soil</i>	Auxila no desenvolvimento radicular dos vegetais, banco de sementes, aumento de atividade biológica do solo	Wher et al (2006)

Fertilizantes	Acelera o crescimento do vegetal, estabilidade do vegetal a longo prazo, diminui deficiências nutricionais	Eastham e Morald, 2006; Meecham e Bell, 1977
---------------	--	--

Considerando a boa localização geográfica da Hydro Alunorte e a facilidade em obtenção de gesso em grande escala, a sua aplicação pode ser bastante interessante se considerarmos o custo benefício demonstrados nos trabalhos anteriores que o gesso poderá trazer para a revegetação do DRS. Adicionalmente, o grande estoque de *top soil*, devido à supressão vegetal e limpeza da área onde será construída o DRS 2, poderá servir como um insumo de baixíssimo custo e de grande vantagens nutricionais para a condução da revegetação, visto que o custo de transporte entre DRS 1 e DRS 2 seria irrisório para o processo. As vantagens a longo prazo que o fertilizante poderá trazer à revegetação torna o insumo interessante do ponto de vista de desenvolvimento vegetal.

## 5.2 SELEÇÃO DE ESPÉCIES VEGETAIS

Segundo Jones e Haynes (2011), a seleção de espécies vegetais é um fator importante para determinar o sucesso de reabilitação dos depósitos com resíduo de bauxita. As plantas escolhidas devem se desenvolver sob alta salinidade e alta concentração sódica. Entretanto, poucas espécies são adaptadas para sobreviverem em ambientes tão hostis. Devido a semelhança das características de solos salinos-alcalinos com o resíduo de bauxita, as plantas halófitas mostram um bom potencial para reabilitação destas áreas (GRAFE; KLAUBER, 2011). Segundo Qadir et al. (2007), a fitoremediação é uma estratégia eficiente para recuperação de solos salino-sódicos, com resultados semelhantes a utilização de corretivos químicos. Como os resíduos de bauxita possuem características relativamente semelhantes aos solos salino-alcalinos, as espécies halófitas apresentam um grande potencial para reabilitação de depósitos de resíduos de bauxita devido a sua capacidade de remover  $\text{Na}^+$  do substrato (GRAFE; KLAUBER, 2011; QADIR et al., 2006). As halófitas possuem alta tolerância para salinidade e alcalinidade, podendo ser capazes de tolerar 17 a 40g  $\text{NaCl L}^{-1}$  como é o caso das espécies *Atriplex sp* (FLOWERS et al., 1977). Além disso, essas plantas também são capazes de exsudar ácidos orgânicos que estimulam o desenvolvimento de população

microbiana no substrato (GRAFE; KLAUBER 2011). Alshaal et al. (2013) utilizou a *Arundo donax* para diminuir o pH e salinidade de solo contaminado por resíduo de bauxita, enquanto foi observado também o aumento da atividade enzimática do solo, e o incremento da população microbiana. Outros estudos, têm demonstrado a efetividade das halófitas em áreas de depósitos de resíduo de bauxita ao reduzir o pH e a salinidade do solo como é o caso da *Echinochloa stagninum*, *Terminalia arjuna*, *Pongamia pinnata* e *Pennisetum pedicellatum* (CHAUHAN e GANGULY 2011; HELALIA et al., 1992). Em estudo conduzido por Leal et al. (2008) para avaliar o potencial da *Atriplex nummularia* na fitorremediação em solo salino-sódico foi observado que a espécie se comportou como planta hiperacumuladora de Na, com alto potencial de uso na fitoextração deste elemento no solo.

Gramíneas e espécies herbáceas tem sido usualmente utilizadas para revegetação de resíduos de bauxita. Em estudo de campo realizado Courtney, Mullen e Harrington (2009) semearam quatro espécies de gramíneas (*Agrostis stolonifera*, *Holcus lanatus*, *Fescue rubra*, e *Lolium perenne*) e duas leguminosas (*Trifolium repens* e *T.Pratense*) em áreas de resíduo de bauxita com adição de gesso. Após um período de 6 a 9 anos, 47 espécies pertencentes a 38 gêneros e 15 famílias foram encontradas nesta área. Dentre estas, 6 espécies de leguminosas estavam presentes, mostrando a sua importância como pioneiras na reabilitação de rejeitos. Fuller e Richardson (1986), por exemplo, apresentou três espécies de gramíneas tolerantes à alto pH (*Distichlis spicata*, *Agropyron elongatum* e *Sporobolus airoides*), que mostram-se promissoras para a reabilitação do resíduo de bauxita. Outras espécies de gramíneas que tem sido usadas com algum sucesso estão *Agropyron elongatum* (Wong e Ho, 1991), *Chloris gayana* (Bell et al., 1989, Meecham e Bell, 1977) *Holcus lanatus*, *Lolium perenne* (COURTNEY; TIMPSOM, 2005), *Lolium rigidum* (EASTHAM; MORALD; AYLMORE, 2006).

Em processos de reabilitação de rejeitos busca-se o reestabelecimento de vegetação arbórea. Isso poderia ser razoavelmente fácil caso houvesse oferta de *topsoil* a ser depositado no local da revegetação (WEHR; FULTON; MENZIES, 2006). Bell et al (1993) realizou um experimento para testar a tolerância de algumas espécies nativas arbóreas do ocidente Australiano.

Como resultado foi observado que as espécies que apresentaram taxa de sobrevivência maior que 80% foram *M. nesophila*, *T. aphylla*, *E. loxophleba*, *Acacia saligna*, *E. gracilis*, *E. conferruminata*, *E. tetragona*, e *E. platypus var heterophylla*. Em outro experimento realizado também pelo mesmo autor em ambiente similar, as espécies que obtiveram o melhor desempenho foram *Eucalyptus camaldulensis*, *E. platypus*, *Casuarina obesa*, e *Melaleuca armillaris* (BELL et al., 1989).

Uma vez que as condições do substrato estejam corrigidas ou atenuadas, a introdução de espécies leguminosas é capaz de permitir a formação de simbioses com bactérias fixadoras de N<sub>2</sub> e fungos micorrízicos constituindo uma estratégia eficiente para acelerar a reabilitação do solo e conseqüentemente iniciar a sucessão natural. Estas simbioses fornecem às espécies leguminosas uma capacidade superior para se desenvolverem rapidamente em substratos pobres. Em estudo conduzido nas áreas mineradas de Porto Trombetas – PA por Franco (1996), foi demonstrado, a nível de campo, que as plantas associadas com bactérias fixadoras de N<sub>2</sub> e os fungos micorrízicos podem revegetar áreas completamente desprovidas de matéria orgânica, sem qualquer adição de terra preta ou composto orgânico. Chaer et al (2010) descreveu alguns casos de sucessos de reabilitação de áreas degradadas utilizando leguminosas fixadoras de N<sub>2</sub>, enfatizando o potencial destas espécies na recuperação do nível de matéria orgânica do solo e na recuperação de outras funções do ecossistema. Seus resultados demonstraram que, após dois anos de reabilitação em áreas mineradas para exploração de ferro, *Acacia angustissima*, *M. artemisiana* e *E. contortisiliquum* (todas fixadoras de N<sub>2</sub>) atingiram alturas superiores a 2m, favorecendo a colonização de espécies nativas através das dispersões naturais. Em experimento realizado por Resende (2010), também foi observado que as espécies fixadoras de nitrogênio como *Mimosa tenuiflora* e *M. Cesalpiniifolia* obtiveram maiores sucesso no processo de reabilitação sob áreas de exploração de piçarra em regiões semi-áridas. Moura (2008) avaliou o desenvolvimento do reflorestamento por estratos sobre um depósito de rejeito de resíduo de bauxita no Maranhão, e verificou que as três famílias mais representativas foram Leguminosae, Bignoniaceae e Urticaceae e que as três

famílias representaram 89,1% do Índice de Valor de Importância. Já as três espécies mais importantes foram *Tabebuia impetiginosa*, *Acacia mangium* e *Cecropia pachystachya*.

No intuito de diminuir a emissão de poeira no DRS1, a empresa Ecoflorestal conduziu um experimento utilizando espécies de gramíneas e leguminosas com diferentes métodos de semeadura das espécies selecionadas. Dentre os métodos estudados a técnica de hidrossemeadura foi a mais eficiente em termos de rapidez no revestimento, o que possibilitou uma melhoria estética e proteção contra efeitos erosivos. Poucos dias após a aplicação foi possível observar o aparecimento de plântulas, com taxa de germinação em torno de 65%, que se desenvolveram de maneira rápida e satisfatória ao longo do período de observação. Além disso, foi possível concluir através deste estudo que a técnica de hidrossemeadura foi a que teve o melhor custo benefício.

Dentro da estratégia adotada pela EMBRAPA – PA, resultados promissores foram alcançados no teste realizado no DRS 1, com o estabelecimento de espécies fixadoras de nitrogênio atmosférico. Destaque merecido deve ser dado às espécies algaroba (*Prosopis juliflora*) e sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*), que se estabeleceram de maneira satisfatória sobre o resíduo sólido sem qualquer condicionador e apenas com uma adubação na cova.

Como a resposta das espécies foi linear à espessura da camada de solo aplicada, pode-se afirmar que tanto as espécies que se destacaram (*Clitoria faichildiana*, *M. caesalpinifloia* e *Muntinjinia calabura*) quanto àquelas que apresentaram performance mediana (*Acacia magium*, *A. auriculiformes*, *Sesbania virgata*, *Sena reticulata*, *Prosopis juliflora*) (Figura 3) podem apresentar maior crescimento e produção de biomassa, se a área forem aplicadas maiores quantidade de solo.

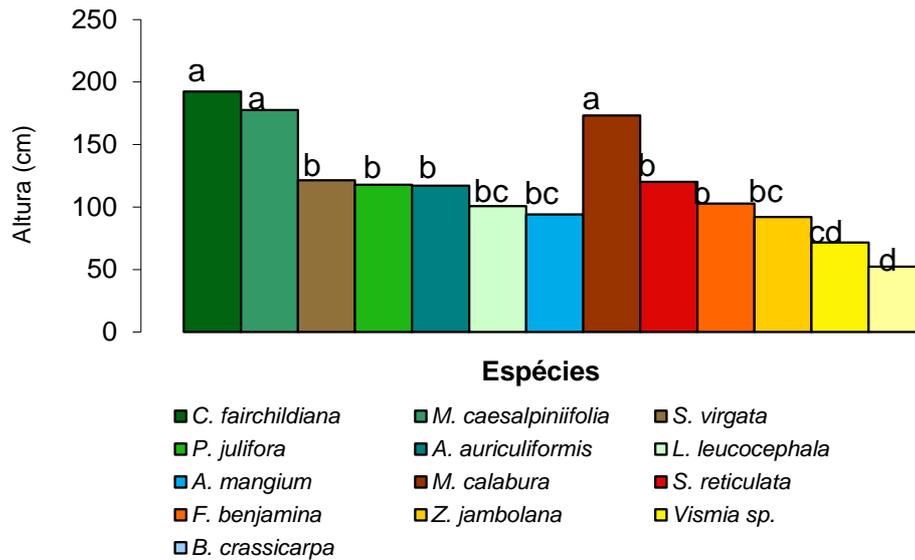


Figura 3 Altura de 13 espécies arbóreas crescendo em resíduo sólido alcalino em Barcarena - PA (Tukey 5%).  
Fonte: Alunorte (2004)

Para a seleção das espécies vegetais deve-se levar em consideração a tolerância das plantas em ambientes com alta concentração de salinidade e sodicidade, e, neste quesito, as espécies halófitas apresentam um grande potencial como espécies pioneiras. Algumas espécies arbóreas também apresentaram bom desenvolvimento sobre o resíduo de bauxita, destaca-se as espécies testadas no estudo conduzido pela EMBRAPA, no qual foram apresentadas 2 espécies com alto potencial, cujos indivíduos inclusive tiveram bons resultados na área que será alvo de revegetação. Ainda, o desempenho das diferentes variações do *Eucalyptus spp*, em resíduo de bauxita foram bastante positivas. Por fim, foi observado através do estudo conduzido pela Ecoflorestal que o uso de gramíneas e leguminosas é altamente recomendado, visto que tais espécies podem modificar não somente o instantaneamente o aspecto visual do local, mas também traz efeitos positivos como a fixação de nitrogênio no resíduo de bauxita. Ressalta-se que não houve condicionamento por *top soil* ou outro material orgânico na hidrossemeadura das espécies apresentadas (tabela 5), demonstrando que mesmo em ambientes hostis o coquetel de espécies teve um bom resultado de germinação.

Tabela 5 Quantidade de sementes utilizadas na técnica de hidrossemeadura em uma área de 1000m<sup>2</sup>.

SEMENTES	B. decumbens	kg	10,28
	B. brizantha	kg	10,28
	B. humidicola	kg	8
	Feijão de Porco ( <i>Canavalia ensiformes</i> )	kg	5
	Feijão Guandú ( <i>Cajanus cajan</i> )	kg	5
	Nabo Forrageiro ( <i>Raphanus sativus</i> )	kg	5
	<i>Crotalaria spectabilis</i>	kg	5
	<i>Crotalaria juncea</i>	kg	5

Visto que não há condicionantes para uso de espécies nativas na revegetação do DRS1, conforme observado nos estudos mencionados, o uso das espécies exóticas poderão auxiliar no condicionamento do substrato a médio prazo, preparando-o para que espécies nativas mais exigentes possam ser introduzidas gradualmente nas áreas revegetadas.

Tabela 6 Principais espécies vegetais utilizadas para revegetação em resíduo de bauxita

Espécies vegetais	Sucesso de desenvolvimento	Autores
<i>Atriplex sp (halófito)</i>	Alta tolerância salina, capaz de exudar ácidos orgânicos,	Flowers et al., 1977
<i>Arundo donax (halófito)</i>	Diminuição do pH, alta tolerância salina, melhoria nas atividades enzimáticas microbianas,	Alshaal et al. (2013)
<i>Atriplex nummularia (halófitas)</i>	hiperacumuladora de Na	Leal et al. (2008)
<i>Distichlis spicata, Agropyron elongatum e Sporobolus airoides (gramíneas)</i>	Tolerantes à pH alto	Fuller et al (1982)
<i>M. nesophila, T. aphylla, E. loxophleba, Acacia saligna, E. gracilis, E. conferruminata, E.tetragona, e E. platypus var heterophylla (arbóreas)</i>	Taxa de sobrevivência acima de 80% em campo	Bell et al (1993)
<i>Mimosa tenuiflora e M. Cesalpiniifolia; Prosopis juliflora</i>	Espécies fixadoras de nitrogênio	Resende (2008)

## **6 RECOMENDAÇÕES**

Este capítulo visa estabelecer uma proposta técnica, apontando diretrizes básicas para o trabalho de revegetação, tendo como subsídios os resultados experimentais desenvolvidos pela HYDRO ALUNORTE em colaboração com a Embrapa e EcoFlorestal. Outros trabalhos foram consultados por meio de revisão de literatura nacional e internacional, visando incluir as alternativas de maior representatividade no contexto de revegetação de áreas com tais características.

### **6.1 PROPOSTA PARA PREPARO DE ÁREA**

Devido ao fato do DRS atual encontrar-se parcialmente em operação, poderá ser adotado o conceito do fechamento progressivo, ou seja, as áreas serão fechadas à medida que forem liberadas pela operação. Essa técnica propicia o acompanhamento progressivo da revegetação, podendo o responsável pela revegetação atuar de forma mais eficaz em possíveis desvios operacionais.

- ÁREA I (setor norte/oeste): 358.745 m<sup>2</sup>;
- ÁREA II (setor sul): 327.913 m<sup>2</sup>;
- ÁREA III (setor norte/leste): 216.925 m<sup>2</sup>;
- ÁREA IV (parte final): 291.749 m<sup>2</sup>.



Figura 4 Segregação das áreas para fechamento progressivo

A escolha pelo início do fechamento ser no setor norte/oeste vem do fato que esta região encontra-se com a capacidade de armazenamento exaurida, portanto não está recebendo mais o resíduo de bauxita.

## 6.2 PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DA CAMADA DE COBERTURA

O sistema de cobertura sugerido tem as seguintes funções: isolar o resíduo do contato direto com o vegetal, controlar o desenvolvimento de processos erosivos e o desenvolvimento da vegetação superficial.

- 1) Aplicação de uma camada de areia de aproximadamente 30cm de espessura cobrindo diretamente o resíduo de bauxita;
- 2) Acima da camada de areia, deverá ser colocado uma camada de solo argiloso (horizonte B), perfazendo uma camada de aproximadamente 60cm.
- 3) Por fim, acima de todas essas camadas, deverá ser disposta o *top soil* (horizonte A) oriundo das áreas de supressão da instalação do DRS2.

A Figura mostra uma ilustração da cobertura barreira capilar proposta para o DRS atual.



Figura 5 Ilustração da proposta para cobertura do DRS1

A aplicação do gesso na lama vermelha é bem difundida e poderia ser utilizada no caso do DRS, uma vez que além do deslocamento do  $\text{Na}^+$  pelo  $\text{Ca}^{+2}$ , há o ânion ( $\text{SO}_4=$ ) que aumenta a mobilidade do mesmo no substrato em direção ao fluxo da água. A utilização do gesso agrícola na camada inferior do top soil em uma concentração mais elevada, promoveria a lixiviação de nutrientes, especialmente a de sódio, que aliado ao fornecimento de enxofre e cálcio, promoveria melhoria significativa no solo/substrato/resíduo. Além disso, o gesso também pode ser incorporado visando o condicionamento das camadas mais profundas, permitindo o estabelecimento de espécies vegetais de raízes profundas. Para que este processo ocorra de maneira satisfatória é necessário que exista macroporosidade suficiente que permita boa movimentação de água e de íons ao longo do perfil, podendo ser necessário aeração do resíduo com o gesso. Outra alternativa, seria o uso intensivo de fertilizantes de reação ácida como as fontes amoniacais de nitrogênio. O fato que se pode questionar é o custo do uso de fontes inorgânicas de N (nitrogênio)

Para reversão de problemas físicos, como baixa porosidade, aeração e retenção de umidade e daqueles relacionados à baixa disponibilidade de nutrientes às plantas, a estratégia que proporciona maior retorno em termos de resposta é a aplicação de matéria orgânica ao substrato. Além de fonte de

nutrientes, a matéria orgânica, por meio da sua microbiota, intensifica a ciclagem de nutrientes e conseqüentemente, a agregação do solo.

O *top soil* ao ser adicionado ao substrato sofrerá oxidação e com isto ocorrerá a liberação de ácidos orgânicos que poderão auxiliar no processo de redução da alcalinidade do meio. Outro aspecto importante é que este material orgânico mostra-se como uma importante fonte de microrganismos, que irão colonizar o substrato exercendo papel fundamental na sua estruturação e na ciclagem de nutrientes.

### 6.3 PROPOSTA PARA REVEGETAÇÃO

A revegetação também será realizada de forma progressiva, atingindo estágios diferenciados ao longo do processo de fechamento do DRS atual. Além disso, deverá conviver com as limitações da cobertura a ser implantada.

Considerando o exposto, os critérios de seleção das espécies foram:

- Possuir um sistema radicular não muito profundo;
- Apresentar boa produção de massa verde que funcionará como fonte de matéria orgânica para o solo em formação;
- Apresentar crescimento rápido para conter processos erosivos;
- Ser capaz de auxiliar no condicionamento do solo a longo prazo;

Deverá ser realizado o plantio das espécies herbáceas e arbóreas selecionadas pelos estudos anteriormente citados, cujas espécies apresentaram excelente desempenho de germinação. O plantio deve ser realizado no início do período chuvoso. As espécies apresentadas na tabela 6 são capazes de melhorar significativamente o condicionamento do solo, assim recomenda-se a utilização das mesmas caso a aquisição de tais espécies seja possível na região. O objetivo desta revegetação inicial é acelerar o processo da sucessão, reduzindo o tempo necessário para a formação de uma mata densa.

Caso os custos para condicionamento do resíduo seja relativamente alto, inviabilizando a revegetação do local, deve-se considerar a aplicação de gesso

diretamente no resíduo e posteriormente o top soil com camada de 40 cm. Neste caso, as espécies a serem utilizadas na revegetação ficarão limitadas. Assim, o processo deverá ser iniciado apenas com espécies herbáceas, que sejam capazes de melhorar as condições da camada de resíduo. A segunda etapa da revegetação seriam iniciadas após 2 a 3 anos do primeiro plantio. Nessa fase, poderá ser indicado uma roçada da vegetação rasteira para reduzir a competição por luz, nutrientes e água com as espécies arbóreas a serem implantadas. Dentre as estratégias de plantio dessa fase serão utilizadas, o plantio de mudas em cova e a formação de ilhas, podendo ser de vegetação nativa ou exótica.

#### 6.4 PROPOSTA DE MONITORAMENTO DA REVEGETAÇÃO

Como estratégia de monitoramento das áreas sugere-se o acompanhamento visual das plantas, por meio de visitação periódica e biometria (determinação da altura e diâmetro do tronco a altura do peito) de indivíduos das principais espécies plantadas. Além disso, amostras em diferentes profundidades devem ser coletadas com o intuito de se identificar os efeitos das plantas e das barreiras propostas sobre propriedades físicas e químicas do substrato.

Avaliações das mudanças na composição florística das diferentes áreas implantadas poderão oferecer subsídios para estratégias futuras de revegetação. Uma vez que a proposta de revegetação é progressiva será possível redefinir a estratégia para próximas áreas a partir dos resultados das revegetações anteriores.

## REFERÊNCIAS

ALUNORTE. Plano de fechamento depósito de resíduos sólidos – DRS área 54A. Alumina Norte do Brasil S/A. 2004

BARROW, N. Possibility Of Using Caustic Residue From Bauxite For Improving The Chemical And Physical Properties Of Sandy Soils. **Australian Journal of Agricultural Research**, 33(2), p. 275-285, 1982.

BELL, D. T. Alkalinity tolerance of woody species used in bauxite waste rehabilitation, Western Australia. **Restoration Ecology**, v. 1, p. 51–58, 1993.

BELL, L. C.; MEECHAM, J. R. Reclamation of alumina refinery wastes at Gladstone, Australia. **Reclamation Review**, v. 1, p. 29 137, 1978.

BELL, L. C. et al. Mine Tailings Reclamation in Australia an overview. In: WALKER, D. G. (Ed.), **Proceedings of the conference: Reclamation, a global perspective**, Edmonton, Canada: RRTAC. 1989. v. 1.

CHAER, M. et al. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil, **Tree Physiology Advance Access**. v. 4., published March , 2010.

Chauhan, S., Ganguly, A., 2011. Standardizing rehabilitation protocol using vegetation cover for bauxite waste (red mud) in eastern India. **Ecol. Eng.** 37, 504–510.

COURTNEY, R.; TIMPSOM, J.; Reclamation of Fine Fraction Bauxite Processing Residue (Red Mud) Amended with Coarse Fraction Residue and Gypsum, **Water, Air & Soil Pollution**. V. 164, p 91 – 102. 2005.

COURTNEY, R.; MULLEN, G.; HARRINGTON T. An evaluation of revegetation Success on Buxite Residue, Department of Life Sciences, University of Limerick, Limerick, Ireland, **Restoration Ecology**, v. 17, n. 3., p. 350–358, 2009

COURTNEY,R.; KIRWAN, L.; Gypsum Amendment Of Alkaline Bauxite Residue – Plant Available Aluminium And Implications For Grassland Restoration; Department of Life Sciences, University of Limerick, Limerick, Ireland, **Ecological Engineering**; 42 (2012) 279 – 282.

EASTHAM, J.; MORALD, T.; AYLMOORE, P. Effective nutrient sources for plant growth on bauxite residue. I. Comparing organic and inorganic fertilizers. **Water Air and Soil Pollution**, v. 176, p. 5–19., 2006.

FLOWERS, T.; The Mechanism of Salt Tolerance in Halophytes, **Annual Review of Plant Physiology** Vol. 28: 89-121,1977.

FULLER, R. D., RICHARDSON, C. J. Aluminate toxicity as a factor controlling plantgrowth in bauxite residue. **Environ. Toxicol. Chem.**, v. 5, p. 905 – 915,

1986.

GRAFE, M.; POWER, G.; KLAUBER. Bauxite Residue Issues: III, Alkalinity and Associated Chemistry. **Hydrometallurgy** 108, p 60-79., 2011

HABASHI, F. A hundred years of the Bayer Process for alumina production. In: Boxall, L.G. (Ed.), **Light Metals**. TMS, Phoenix, p. 3–11. 1988.

HAMADA T. Environmental management of bauxite residue—a review. Kingston: The Jamaica Bauxite Institute, The University of the West Indies, 1986. p. 109-117.

HELALIA A. EL AMIR S.; ABOU-ZEID S.; ZAGHLOU K.; Bio-reclamation of saline-sodic soil by Amshot grass in Nothern Egypt. **Soil and Tillage Research**. V.22, p. 109-115. 1992.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCCOTT, S. C., "The surface chemistry of Bayer process solids: a review", *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, n. 146, pp.359-374, 1999.

JONES, B. E.; HAYNES, R. J; PHILLIPS, I. R. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties, **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 2281 – 2288, 2010.

JONES, B. E.; HAYNES, R. J; PHILLIPS, I. R. (2011) Influence of organic waste and residue mud additions on chemical, physical and microbial properties of bauxite residue sand. **Environ Sci Pollut Res**, v. 18, p. 199–211, 2011.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J. Bauxite Processing Residue: A Critical Review of Its Formation, Properties, Storage, and Revegetation, **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 41, n.3, p. 271-315, 2011.

POWER, G.; GRAFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices, CSIRO Process Science and Engineering, **Hydrometallurgy**, v. 108, p. 33 - 45, 2011.

GRAFE, M. et al. BRaDD: bauxite, residue and disposal database. **CSIRO-Minerals**. 2009.

HARRIS, J. Soil microbial communities and restoration ecology: Facilitators or followers? **Science**, v. 325, n. 5940, p. 573–574, 2009.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J. Bauxite processing residue: a critical review of its formation, properties, storage and revegetation. *Critical Reviews*. in: **Environmental Science and Technology**. 2011.

Keren, R. Salinity. In: SUMNER, M. E. (Ed.). *Salinity*. Boca Raton, FL: CRC Press. p. G3-G25, 2000.

KLAUBER, C. et al. Proposed mechanism for the formation of dust horizons on bauxite residue disposal areas. In: YOUNG, D.H. (Ed.), **Light Metals**. TMS, New Orleans. 2008. p. 19 – 24.

KLAUBER, C., GRAFE, M., POWER, G. Bauxite Residue Issues: II. Options for residue utilization. **Hydrometallurgy**, n. 108, p. 11–32, 2011.

KIRWAN, J. et al. Chemistry of bauxite residue neutralization and aspects to implementation. **Internation Journal of Mineral Processing**, ano 2013, v. 119, p. 40-50, 2013.

KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W. Effect of pH on Na induced Ca deficiency. **Plant Soil**, v. 269, p. 119 – 129, 2005.

KRISHNA P.; REDDY, M. S.; PATNAIK, S. K. Aspergillus tubingensis reduces the pH of the bauxite residue (Red mud) amended soils. **Water Air Soil Pollut.** v. 167, p. 201 – 209, 2005.

KUMAR, S; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A (2006) Innovative methodologies for the utilization of wastes from metallurgical and allied industries. **Resour. Conserv. Recycl.** 48:301-314.

LEVY, G. J. (2000). Sodicity. In: SUMNER, M. E. (Ed.). Sodicity. Boca Raton, FL: **CRC Press**. 2000. p. G27 – G63.

LEWIS, D. et al. A. Soil functional diversity analysis of a bauxite-mined restoration chronosequence. **Microbial Ecol.**, v. 59, n. 4, p. 710 – 723, 2010.

MAAS, E. V. **Crop salt tolerance**. In: TANJI, K. K. (Ed.). Agricultural salinity assessment and management. New York: ASCE. 1990. p. 262 – 304.

MCCONCHIE, D.; CLARK, M.; DAVIES-MCCONCHIE, F. New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud). In: **Proceedings of the 6th international alumina quality workshop**, Brisbane, Australia, p. 327-332, 2002.

MENZIES, N. W., FULTON, I. M., MORRELL, W. J. Seawater neutralization of alkaline bauxite residue and implications for revegetation. **J. Environ. Qual.** v. 33, p. 1877–1884, 2004.

M. GRAFE, C. KLAUBER. Bauxite residue issues: IV. Old obstacles and new pathways for in situ residue bioremediation, CSIRO Process Science and Engineering (Parker CRC), **Hydrometallurgy**, v. 108, p. 46 – 59, 2011.

MOURA, P. A. Fitossociologia e regeneração natural de uma área de deposição de rejeito do refino de bauxita revegetada com leguminosas arbóreas em São Luís, Maranhão. **Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, Instituto de Florestas Curso de Engenharia Florestal, Seropédica – RJ, 2008.

NAIDU, R.; RENGASAMY, P. Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. In: NAIDU, R.; SUMNER, M. E; RENGASAMY, P. (Eds.), **Australian sodic soils: Distribution, properties and management**, p. 127–137. Melbourne, CSIRO. 1995. p. 127 – 137.

NIKRAZ, H. R. Comparison of physical properties between treated and untreated bauxite residue mud. *J. Mater. Civ. Eng.* v. 19, n. 1, p. 2 – 9, 2007.

NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. *Int J Miner Process*, v. 54, p. 217–233. 1998.

PERSIO, S. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA. 1989. v. 1

PRADHAN, J. Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values, **Light Metals**, p. 87-92, 1996.

QADIR, M. et al. Sodicy-induced land degradation and its sustainable management: Problems and prospects. **Land Degrad.Dev.**, v. 17, p.: 661 – 676, 2006

RESENDE, A. S. Use of nitrogen-fixing legume trees to revegetate degraded lands. In **Microbial Ecology of Tropical Soils**. Eds. A.S.F. Araújo and M.V.B. Figueiredo. Nova Publishers, Nova York. 2010

SCHMALENBERGER, A. et al. Bacterial communities established in bauxite residues with different restoration histories. **Environ. Sci. Technol.**, v. 47, p. 7110–7119, 2013.

SOMLAI, J. et al. Radiological aspects of the usability of red mud as building material additive. **J. Hazard. Mater.** v. 150, p. 541 – 545, 2008.

SUMMERS, R. et al. Bauxite residue (red mud) improves pasture growth on sandy soils in Western Australia. **Aust. J. Soil Res.**, v. 34, p. 569 – 581, 1996.

SNARS, K.; GILKES, R. J. Evaluation of bauxite residues (red muds) of different origins for environmental applications. **Appl. Clay Sci.** v. 46, p. 13 – 20. 2009.

TORDOFF, G. M., BAKER, A. J. M.; WILLIS, A. J. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. **Chemosphere**, v. 41, p. 219–228. 2000.

WARD, S. C. Reclaiming bauxite residue disposal areas in south-west Australia. **Mining rehabilitation**, v. 87, p. 61 – 70, 1987.

WEHR, J., FULTON, I., MENZIES, N. Revegetation strategies for bauxite refinery residue: a case study of Alcan Gove in Northern Territory. **Aust. Environ.Manage.** v. 37, n. 3, p. 297 – 306, 2006.

WILLIAMS, D. J. Minimisation and Management of Solid Wastes. In: MULLIGAN, D. **Environmental Management in the Australian Minerals and Energy Industry**. Sydney: UNSW, 1996. p. 157 – 188.

WOODARD, H. J.; HOSSNER, L.; BUSH, J. Ameliorating caustic properties of aluminum extraction residue to establish a vegetative cover. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 43, p. 1157 - 1166, 2008.

WONG, J. W. C., HO, G. E. Effects of gypsum and sewage-sludge amendment on physical-properties of fine bauxite refining residue. **Soil Sci.**, v. 152, p. 326 – 332, 1991.

WONG, J. W. C., HO, G.E. Viable technique for direct revegetation of fine bauxite refining residue. In: Glenister, D. (Ed.), **International Bauxite Tailings Workshop**. Australian Bauxite and Alumina Producers, Perth, WA. 1992.

WONG, J. W. C.; HO, G. E. Use of waste gypsum in the revegetation on red mud deposits: a greenhouse study. **Waste Manage. Res.** v. 11, p. 249 – 256, 1993.

WONG, J. W. C., HO, G. Sewage-sludge as organic ameliorant for revegetation of fine bauxite refining residue. **Res. Cons. Recycl.** v. 11, p. 297–309, 1994.

WONG, J. W. C.; HO, G. E. Effectiveness of acid industrial-wastes for reclaiming fine bauxite refining residue (red mud). **Soil Sci.** v. 158, p. 115 – 123, 1994.

WOODARD, H. J.; HOSSNER, L.; BUSH, J. Ameliorating caustic properties of aluminum extraction residue to establish a vegetative cover. **J. Environ. Sci. Health Part a: Toxic/Hazard. Substances Environ. Eng.** v. 43, p. 1157 – 1166, 2008.

WU, H., ZHANG, J., NGO, H. H., GUO, W., HU, Z., LIANG, S., FAN, J., LIU, H. Review: A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. **Bioresource Technology** 175 (2015) 594–601

XUE, S. et al. A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud). **Environ Sci Pollut Res Int**, v. 23, n. 2, p.32 – 1120, jan. 2015.