



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANA BEATRIZ QUADROS AMORIM LOPES

**PROCESSO PRODUTIVO DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO: PRINCIPAIS IMPACTOS
AMBIENTAIS ASSOCIADOS E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO ADOTADAS PELAS
EMPRESAS QUE ATUAM NO BRASIL**

FORTALEZA

2022

ANA BEATRIZ QUADROS AMORIM LOPES

PROCESSO PRODUTIVO DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO: PRINCIPAIS IMPACTOS
AMBIENTAIS ASSOCIADOS E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO ADOTADAS PELAS
EMPRESAS QUE ATUAM NO BRASIL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L85p Lopes, Ana Beatriz Quadros Amorim.
 Processo produtivo do alumínio primário : principais impactos ambientais associados e medidas de
 mitigação adotadas pelas empresas que atuam no Brasil / Ana Beatriz Quadros Amorim Lopes. – 2022.
 41 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
 Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2022.
 Orientação: Profa. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes.
1. Indústria do Alumínio. 2. Impactos Ambientais. 3. Medidas Mitigatórias. 4. Relatórios de
 Sustentabilidade. I. Título.

CDD 628

ANA BEATRIZ QUADROS AMORIM LOPES

PROCESSO PRODUTIVO DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO: PRINCIPAIS IMPACTOS
AMBIENTAIS ASSOCIADOS E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO ADOTADAS PELAS
EMPRESAS QUE ATUAM NO BRASIL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Aprovada em: 15/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Chaves Penner
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Monica Cristina de Araújo Nunes

A Deus e Meishu-Sama que são meus alicerces perante todas as purificações a quem devo toda minha gratidão. À minha família por todo suporte que me ofertaram. Ao meu noivo por todas as vezes que me ofereceu acolhimento e cuidado. Às minhas amigas e meus amigos que representaram minha família longe de casa e tornaram a graduação mais leve e feliz.

AGRADECIMENTOS

A Deus e Meishu-Sama, por serem minha fortaleza diante de todas as dificuldades, pelo acolhimento frente aos medos e frustrações, por serem a certeza de que a minha vida está entregue aos melhores cuidados.

À minha mãe, Abnilce Quadros Amorim Lopes, por zelar e orar incansavelmente pelas minhas vitórias e conquistas, por suportar a distância e todas as preocupações, se fazendo presente através de palavras e conselhos preciosos que me guiaram a ser quem eu sou. Ao meu pai, Douglas de Assunção Gomes Lopes, pelas risadas proporcionadas nos momentos mais improváveis e pelo cuidado a sua maneira única de ser.

À minha tia e madrinha, Amancia Quadros Amorim Lopes, pelo apoio incondicional para que o início e a conclusão da minha graduação fossem possíveis e pelo exemplo de força e coragem que representa em minha vida. Às minhas irmãs, Társila Maria Quadros Amorim Lopes e Andréa Raquel Quadros Amorim Lopes, por acreditarem e se orgulharem de mim.

Ao meu noivo, Italo Gabriel Almeida Castro, pelo companheirismo, cuidado, paciência, lealdade; por suportar junto comigo todo o processo de evolução que foi necessário passarmos devido à distância; e por acreditar e incentivar todos meus sonhos e aspirações, até mesmo quando eu duvido deles.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) Engenharia Ambiental UFC, por ter sido a primeira e melhor experiência acadêmica que pude vivenciar; por me proporcionar o senso de coletividade, liderança, profissionalismo, responsabilidade e tantos outros; por me ofertar conhecimentos técnicos e de vida; e por me fazer sentir pertencente à uma verdadeira família em Fortaleza.

À minha tutora, orientadora e professora, Ana Bárbara de Araújo Nunes, pelos conselhos, oportunidades, orientações e paciência; por ser uma das minhas inspirações profissionais; e por ter reinventado o PET Engenharia Ambiental UFC, utilizando-se de muita expertise, criatividade, escuta e dinamismo.

A todas as minhas amigas e amigos petianos, em especial à Suiane Melo Albuquerque, pela lealdade e companheirismo perante todos os obstáculos, por compartilhar de momentos únicos dentro e fora da universidade e por me acolher sempre que eu precisei; à Andréa Gisele Limeira Paz, pelos conselhos diante das incertezas, por se fazer presente quando a sensação de solidão surgia e por ser um grande motivo de orgulho e inspiração; à Amanda Ingrid Sousa Duarte, por ser uma das pessoas que mais me impulsiona diante meus objetivos e ter ser um ser humano incrível que me ensina muito sobre amor e cuidado.

É realmente verdade que gratidão gera gratidão e lamúria atrai lamúria. Isto ocorre porque o coração agradecido comunica-se com as forças divinas, e o queixoso, com as forças malignas. Assim, quem vive agradecendo, torna-se naturalmente feliz e quem vive lamuriando torna-se infeliz. (MOKITI OKADA, p. 53)

RESUMO

Devido à elevada abundância do minério de bauxita, do qual se obtém o alumínio, e da interessante combinação de propriedades químicas e físicas que o constituem, o alumínio é um dos metais mais produzidos no mundo inteiro. Ao passo que a cadeia produtiva do alumínio primário se demonstra lucrativa e economicamente relevante para as economias locais onde estão instaladas, esse tipo de indústria, promove também uma significativa gama de impactos ambientais associados às suas operações que afetam não só a fauna e a flora, como também as comunidades instaladas próximas a essas operações. Dessa maneira, o presente trabalho busca levantar os principais impactos ambientais intrínsecos à cadeia produtiva do alumínio primário, além de entender como as empresas desse ramo vêm atuando na mitigação desses impactos, seja com medidas preventivas, corretivas ou compensatórias. Para tal objetivo, desenvolveu-se uma pesquisa bibliográfica descritiva, tendo como base referencial os relatórios de sustentabilidade das duas empresas que atualmente produzem alumínio no Brasil, conforme os dados da ABAL, referentes ao ano de 2020, a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) e a Norsk Hydro Brasil Ltda. Dessa maneira, foi possível levantar as estratégias e metas sustentáveis das empresas selecionadas em relação aos principais aspectos associados à produção do alumínio primário, permitindo uma análise do cenário atual, oportunidades de melhorias e compartilhamento de inovações do setor.

Palavras-chave: indústria do alumínio; impactos ambientais; medidas mitigatórias; relatórios de sustentabilidade.

ABSTRACT

Due to the abundant availability of bauxite ore, from which aluminum is obtained, and the interesting combination of chemical and physical properties that constitute it, aluminum is one of the most produced metals worldwide. While the primary aluminum production chain has proven to be profitable and economically relevant for the local economies where they are installed, this type of industry also promotes a significant range of environmental impacts associated with its operations that affect not only the fauna and flora, but also the communities located near these operations. Thus, the present work seeks to identify the main environmental impacts intrinsic to the primary aluminum production chain, in addition to understanding how companies in this industry have been acting to mitigate these impacts, whether with preventive, corrective or compensatory measures. To this end, a descriptive bibliographic research was developed, using as a reference basis the sustainability reports of the two companies that currently produce aluminum in Brazil, according to the data from ABAL, referring to the year 2020, Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) and Norsk Hydro Brasil Ltda. Thus, it was possible to survey the sustainable strategies and goals of the selected companies in relation to the main aspects associated with the production of primary aluminum, allowing an analysis of the current scenario, opportunities for improvement and sharing of innovations in the industry.

Keywords: aluminum industry; environmental impacts; mitigation measures; sustainability reporting.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ASI	<i>Aluminium Stewardship Initiative</i>
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CEBDS	Centro Empresarial Brasileiro de Desenvolvimento Sustentável
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CSBI	<i>Cross Sector Biodiversity Initiative</i>
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
ICMM	Conselho Internacional de Mineração e Metais
IPIECA	<i>International Petroleum Industry Environmental Conservation Association</i>
MRN	Mineração Rio Norte
ONU	Organização das Nações Unidas
PEA	Programa de Educação Ambiental
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
RGC	Revestimento Gasto de Cuba
SEMAS	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará
UFV	Universidade Federal de Viçosa
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WWF	<i>World Wide Fund For Nature</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma dos processos produtivos para obtenção do alumínio.....	6
Figura 2 – Minério de bauxita	7
Figura 3 – Alumina calcinada ou óxido de alumínio	9
Figura 4 – Lingotes de alumínio.....	11
Figura 5 – Produção de bauxita no Brasil em 2020.....	13
Figura 6 – Produção de alumina no Brasil em 2020	14

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Objetivo Geral	3
1.2	Objetivos Específicos.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Sustentabilidade.....	4
2.2	Processo produtivo de alumínio primário.....	5
2.2.1	Mineração.....	6
2.2.2	Refinaria.....	7
2.2.3	Redução	9
2.3	Panorama da Indústria de Alumínio no Brasil.....	11
3	METODOLOGIA	15
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
4.1	Consumo de água e geração de efluentes	17
4.2	Geração de resíduos	19
4.3	Consumo de energia e emissões atmosféricas	21
4.4	Supressão de vegetação e manejo de fauna.....	25
5	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais produzidos no mundo, estando atrás apenas do ferro. Isso ocorre devido à abundância do minério de bauxita na crosta terrestre, do qual se obtém o alumínio, bem como suas notáveis propriedades para os setores de construção civil, transportes, embalagens e bens de consumo em geral. No cenário global, o Brasil destaca-se por possuir uma das maiores reservas de bauxita e estar entre os maiores produtores de alumina (óxido de alumínio) do mundo.

O complexo processo produtivo para obtenção do alumínio primário é constituído primeiramente pela mineração da bauxita, seguida pelo refino através do processo Bayer e finalizado com a eletrólise, cujo processo é denominado Hall-Hérout. Dessa maneira, apesar da incontestável relevância econômica, a cadeia produtiva do alumínio também possui significativos impactos socioambientais associados às suas operações.

Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de analisar os principais impactos ambientais intrínsecos às etapas de produção do alumínio primário e identificar as medidas mitigadoras que estão sendo aplicadas pelas empresas desse setor a fim de minimizar esses impactos, quando não há possibilidade de evitá-los totalmente.

A fim de alcançar o objetivo proposto, o presente trabalho utilizou como metodologia a pesquisa bibliográfica descritiva, que consiste em realizar o levantamento de dados e informações pré-existentes encontrados em teses, artigos, periódicos e *sites* institucionais, com o intuito de analisar e estabelecer relações sobre o tema proposto. Elegeu-se como fonte de embasamento para as discussões, os relatórios das duas empresas que produziram alumínio em 2020 conforme dados da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) e a Norsk Hydro Brasil Ltda, uma vez que estas operam todas as etapas da cadeia produtiva desse metal e possuem semelhanças na estrutura dos relatórios ao descreverem os impactos, as medidas de mitigação e metas estabelecidas.

Dessa forma, o trabalho descreve primeiramente o desenvolvimento do conceito de sustentabilidade ao longo das décadas, uma vez que este proporcionou a incorporação de uma gestão voltada para os aspectos sociais e ambientais para além do econômico. Além disso, também apresenta o detalhamento do processo produtivo do alumínio primário e o panorama desse setor industrial no Brasil.

1.1 Objetivo Geral

- Identificar e analisar as medidas mitigadoras referentes aos principais impactos associados às etapas de produção do alumínio primário, que estão sendo aplicadas pelas empresas da cadeia produtiva do alumínio instaladas no Brasil

1.2 Objetivos Específicos

- Levantar os principais impactos ambientais associados ao processo produtivo do alumínio primário;
- Avaliar os relatórios de sustentabilidade das empresas produtoras de alumínio primário no Brasil;
- Identificar as principais medidas mitigatórias aplicadas pelas empresas produtoras de alumínio com o objetivo de prevenir, corrigir, minimizar ou compensar os impactos causados pelas suas operações no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade

A Revolução Industrial iniciada na Inglaterra durante o século XVIII, apesar de promover um grande avanço tecnológico e crescimento econômico através do surgimento e desenvolvimento das indústrias, também trouxe como consequência os significativos impactos ambientais por meio da exploração dos recursos naturais, emissão de poluentes, desequilíbrios na biodiversidade e problemas sociais oriundos das desigualdades sociais (PEREIRA, 2009).

Segundo Nascimento (2012) ao longo do século XX, perante a percepção da inviabilidade dos padrões de produção e consumo, emergiu a consciência sobre finitude dos recursos naturais e os riscos ambientais envolvidos nesse modelo produtivo, fomentando assim as primeiras reflexões e discussões acerca do futuro das gerações e a noção de sustentabilidade.

Dessa forma, o primeiro registro formal quanto às preocupações ambientais surgiu através do chamado Clube de Roma, criado em 1968 pelo empresário Aurelio Peccei, que reunia cientistas, pedagogos, economistas, humanistas, industriais e funcionários públicos com o objetivo de discutir a crise atual e futura da humanidade. Em 1972, o Clube de Roma publicou seu primeiro relatório, intitulado “*Limits to Growth*” (“Os limites do crescimento”), que causou grande impacto perante a sociedade científica por alertar para a possibilidade de um futuro mundial catastrófico caso o padrão de desenvolvimento vigente na época permanecesse inalterado (KRÜGER, 2001).

No mesmo ano, em Estocolmo, Suécia, foi realizada a primeira Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, onde surge o entendimento que desenvolvimento possui, além de um contexto ambiental, uma dimensão social (NASCIMENTO, 2012). Já em 1987, foi publicado o Relatório “Nosso Futuro Comum”, através da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que foi responsável por estabelecer o conceito de Desenvolvimento Sustentável. Este, por sua vez, determina que desenvolvimento sustentável seja “[...] aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO – CMMAD, 1991, p. 46).

Segundo Jabbour e Santos (2006) a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também conhecida como ECO-92, realizada em 1992 no estado do Rio de Janeiro, reforçou a importância do comprometimento com o desenvolvimento sustentável, cujos princípios estão baseados em mudanças na forma de

promover ações econômicas, políticas e sociais, considerando os possíveis impactos dessas atividades sobre o meio ambiente.

Portanto, a fim de operacionalizar esse conceito na esfera empresarial, o sociólogo inglês John Elkington fundador da consultoria *SustainAbility*, desenvolveu o conceito do *triple bottom line*, ou tripé da sustentabilidade, que determina que o bom desempenho sustentável de uma empresa só é verdadeiramente possível a partir da integração entre as dimensões econômica, humana e ambiental, com o propósito atender aos interesses, de forma equilibrada, das pessoas, do planeta e do lucro. Esse modelo de mudança social foi alicerçado na percepção de que as organizações devem medir o valor que geram ou o que destroem, não apenas da dimensão econômica, mas também nos aspectos ambientais e sociais (SUSTAINABILITY, 2008; ELKINGTON, 1999).

2.2 Processo produtivo de alumínio primário

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (2022), o alumínio possui características que permitem sua ampla aplicabilidade em diversos mercados, como o setor de embalagens, automotivos e transportes, construção civil, energia e bens de consumo em geral. Dentre suas principais vantagens o alumínio pode ser transformado com facilidade em qualquer espessura, formato e comprimento, além de ser um material leve, impermeável, durável, resistente a corrosão, com elevadas condutividades elétrica e térmica e alta reciclabilidade permitindo sua reciclagem por várias vezes sem perdas significativas de material ou qualidade.

Apesar do alumínio ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, ele não é encontrado naturalmente em estado metálico no ambiente. Logo, para a sua obtenção, é necessário que ocorra uma sequência de processos iniciada pela mineração da bauxita (minério formado principalmente de óxidos de alumínio) que segue posteriormente para o processamento nas operações da refinaria e redução (SANTOS E SILVA, 2020). A demonstração desse processo pode ser observada através da Figura 1, que apresenta as etapas para produção do alumínio primário desde a mineração até a aplicação de soluções em produtos transformados, apesar de o presente trabalho focar somente até a etapa de redução.

Figura 1 – Fluxograma dos processos produtivos para obtenção do alumínio.



Fonte: Relatório Anual da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), 2020.

2.2.1 Mineração

A primeira etapa para obtenção do alumínio é a extração da bauxita, um minério que pode ser encontrado em três grupos climáticos: Mediterrâneo, Tropical e Subtropical e apresenta uma característica rochosa avermelhada como pode ser observado na Figura 2. No que se refere às reservas brasileiras estas, além de possuírem um minério de ótima qualidade, estão entre as maiores do mundo, de acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2022).

Segundo a Mineração Rio Norte (MRN, 2022), a bauxita pode ser encontrada a cerca de oito metros de profundidade da superfície do solo. Dessa forma, o primeiro passo configura-se pelo afastamento da fauna, seguido pela remoção planejada da vegetação, bem como a camada de solo orgânico a qual é armazenada para futuro processo de reflorestamento. Após essas etapas, é realizada a retirada das camadas superficiais do solo constituídas de argilas e lateritas até atingir a profundidade em que o minério se encontra. Este, por sua vez, é escavado e transportado até o local para beneficiamento.

Após a lavra, esse material passa pelo processo de britagem para redução do minério através de moinhos e, em seguida, pelo processo de lavagem com água, que tem por objetivo retirar resíduos de argila e reduzir o teor de sílica, quando necessário. Por fim, a bauxita pode seguir em forma de polpa através de minerodutos, ou ainda passar por uma última etapa de secagem antes de ser transportada via modal ferroviário ou aquaviário (ABAL, 2022).

Figura 2 – Minério de bauxita



Fonte: Hydro, 2022.

O processo de mineração apresenta como principal aspecto ambiental a elevada geração de rejeitos de bauxita, uma vez que aproximadamente 25% do volume da massa sólida (argila), após a lavagem do minério, é considerada rejeito. Este material em consistência de polpa é disposto em barragens, localizadas em áreas já mineradas, onde recupera-se cerca de 80% da água reutilizada no processo. Esses reservatórios, ao atingirem sua capacidade máxima, são descaracterizados e reabilitados para que retornem o mais próximo possível das suas características originais (MRN, 2022).

Acerca da destinação dos rejeitos desse processo através de barragens, a ABAL (2022) explica:

Na etapa primária de beneficiamento da bauxita, o único rejeito proveniente da lavagem do minério é a argila, sem qualquer aditivo químico. Nesses depósitos, o rejeito é adensado (compactado) e parte da água recuperada é reaproveitada no processo, o que reduz o risco de vazamento nas barragens. Com o tempo, essa argila sedimenta e seca no reservatório. A água residual vai sendo eliminada até que haja condições para o replantio de vegetação sobre o antigo depósito, o que possibilita a reintegração da área ao meio ambiente.

2.2.2 Refinaria

Como mencionado anteriormente, o alumínio metálico não ocorre naturalmente, dessa forma, primeiramente é necessário remover as impurezas da bauxita através de um complexo processo químico, patenteado pelo austríaco Karl Joseph Bayer em 1888, conhecido por Processo Bayer, que tem como princípio básico a elevada solubilidade dos minerais de alumínio em soda cáustica (MARQUES, 2013).

O processo Bayer acontece na refinaria, onde se promove a transformação da bauxita em alumina (produto intermediário) por meio de quatro principais etapas: digestão, clarificação,

precipitação e calcinação. Ao iniciar o processo, a bauxita estocada na fábrica é encaminhada aos moinhos de martelos (AGUIRRE, 2015).

Segundo Silva (2010) a moagem do minério possui extrema importância, pois permite aumentar a superfície de contato entre a bauxita e a soda cáustica, resultando em uma maior eficiência da etapa digestão. Nesta, por sua vez, a bauxita moída recebe uma solução de NaOH (hidróxido de sódio, também conhecida como soda cáustica) aquecida, promovendo a dissolução da alumina e formando o aluminato de sódio. Os demais componentes da bauxita, considerados impurezas como ferro inerte, óxidos de titânio e compostos de sílica permanecem no estado sólido constituindo o resíduo do processo Bayer, conhecido por “lama vermelha”.

A polpa resultante da etapa de digestão é resfriada em expansores (tanques *flash*) à temperatura de 100°C e segue para a etapa de clarificação que busca separar o produto gerado até então em duas fases: licor - rico em aluminato de sódio - e o resíduo conhecido como lama vermelha - rico em óxido de ferro (SILVA, 2010). A etapa de clarificação envolve sedimentação e espessamento, em que primeiramente decanta-se o resíduo de bauxita, encaminhado, em seguida, para os lavadores, a fim de aumentar o teor de sólidos e recuperar as maiores frações de soda cáustica. Após esse processo, a lama vermelha é bombeada para as áreas de disposição de resíduos bauxita onde é possível recolher o sobrenadante alcalino ao passo que a fração sólida sedimenta (AGUIRRE, 2015).

A solução de aluminato de sódio (licor verde) por sua vez é encaminhada para etapa de precipitação, que consiste essencialmente em precipitar a alumina trihidratada através de condições controladas de temperatura, agitação, carga de semente (hidratos que já passaram pela precipitação, mas não atingiram a granulometria necessária para seguir até a calcinação e servem como catalisadores), tempo de residência e concentração cáustica. O produto dessa etapa precisa atender aos padrões esperados em relação à granulometria, resistência, quebra e grau de pureza. Após passar pelos precipitadores, a suspensão constituída de alumina trihidratada e soda é enviada para uma sequência de hidrociclones responsáveis pela separação da fração grosseira (*underflow*), que após passar por uma filtração poderá seguir dois caminhos, ser seco, ensacado e vendido na forma de hidrato ou hidróxido de alumínio, ou encaminhado para etapa de calcinação para formação do óxido de alumínio, necessário para a produção do alumínio primário (SILVA, 2010).

O produto da precipitação segue para a etapa final, a calcinação, onde o hidrato chega aos calcinadores que atinge temperaturas na ordem de 1000°C, a fim de retirar a umidade e a água ligada dos cristais do hidróxido de alumínio, resultando assim no óxido de alumínio (Al_2O_3) ou também chamado de alumina de alta pureza, que posteriormente será encaminhada

para etapa de redução eletrolítica (SILVA, 2010). O óxido de alumínio, comumente chamado de alumina, é o produto final da refinaria e apresenta a característica de um fino pó branco, conforme pode ser visto na Figura 3.

A geração de resíduos de bauxita durante a produção de alumina é o maior aspecto ambiental negativo associado ao processo da refinaria, uma vez que a cada 2 toneladas de bauxita, 50% resulta na produção de alumina e os 50% restante torna-se resíduo, sendo essa proporção variável conforme a qualidade da matéria-prima e futuro empobrecimento do minério (GARCIA, 2010)

Além disso, devido à natureza cáustica do processo, a disposição desse tipo de resíduo representa um grande desafio econômico e ambiental, sendo necessário direcionar esse material para as chamadas Áreas de Disposição de Resíduos de Bauxita que são grandes estruturas devidamente licenciadas pelos órgãos ambientais e projetadas para garantir os padrões de segurança. A disposição dos resíduos poderá ser feita via úmida com baixa concentração de sólidos (*wet disposal*), ou via seca através de filtros-presas (*dry disposal*), esta última possui uma tecnologia mais avançada e segurança associada à vida útil das barragens, sendo mais recomendada.

Figura 3 – Alumina calcinada ou óxido de alumínio



Fonte: Hydro, 2022.

2.2.3 Redução

A operação da redução da alumina para obtenção do alumínio primário em escala industrial se tornou viável a partir de 1886, quando o francês Paul Louis Héroult e o americano, Charles Martin Hall descobriram, de forma independente, que a criolita (Na_3AlF_6) atua

reduzindo de aproximadamente 2000°C para cerca de 1000°C o ponto de fusão da alumina, se colocada juntamente a esta. O processo ficou conhecido como Processo Hall-Héroult, sendo amplamente utilizado e destacando-se devido ao elevado consumo de energia elétrica por tonelada de produto fabricado, sendo necessário em média 14,8kWh para a produção de 1kg de alumínio primário (ABAL, 2007).

O processo se inicia quando a alumina resultante da refinaria é dissolvida em um banho de criolita (Na_3AlF_6), cujo ponto de fusão é 1009°C. A fim de reduzir a temperatura de fusão do banho eletrolítico para a faixa de 940°C a 980°C, adiciona-se fluorita (CaF_2) e fluoreto de alumínio (AlF_3), de modo que ele seja fundido em baixa tensão, constituindo assim a solução no interior das cubas eletrolíticas (SILVA, 2010).

As cubas são tanques de aço onde encontra-se o compartimento catódico que funciona como polo negativo. Já os ânodos são compostos por uma mistura de coque e piche, que atuam como polo positivo, sendo consumidos durante o processo e encontram-se suspensos no banho eletrolítico. A corrente elétrica passa pelo ânodo e, em seguida, atravessa o cátodo, seguindo em direção ao ânodo da cuba subsequente, constituindo um circuito em série, sendo necessários milhares de ampères para realizar a dissociação da alumina (SHREVE, 1984; SORLIE, 1989).

A passagem de corrente elétrica na célula eletrolítica promove a redução não espontânea da alumina, que se encontra fundida no banho eletrolítico, decantando o alumínio metálico no fundo da célula e o oxigênio liberado combina-se com o carbono do ânodo, formando predominantemente dióxido de carbono (CO_2) (SHREVE, 1984; SORLIE, 1989).

Dessa forma, obtém-se a reação global da redução da alumina (Reação 2.1):



O alumínio líquido é coletado e encaminhado por meio de cadinhos para o lingotamento onde é resfriado e moldado em lingotes.

De acordo com a ABAL (2007) para o processo completo de obtenção do alumínio são necessários 5 kg de bauxita para produzir 2 kg de alumina, que por sua vez é capaz de produzir 1 kg de alumínio primário.

Figura 4 – Lingotes de alumínio



Fonte: Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), 2022.

2.3 Panorama da Indústria de Alumínio no Brasil

Conforme os dados disponibilizados no *site* institucional da ABAL (2022), o Brasil é o terceiro produtor de alumina do mundo, estando atrás apenas da China e Austrália; quarto produtor de bauxita, atrás da Austrália, Guiné e China e décimo quinto produtor de alumínio primário, precedido pelos países: China, Rússia, Índia, Canadá, Emirados Árabes, Austrália, Bahrein, Vietnã, Noruega, Estados Unidos, Arábia Saudita, Malásia, Islândia e África do Sul.

Segundo Henriques e Porto (2012) embora os volumes de produção tanto de bauxita quanto de alumina e alumínio primário sejam elevados, no Brasil existem poucos grupos que operam nessa cadeia de suprimentos. Estes grupos são formados por empresas e capitais nacionais e internacionais, sendo que algumas vezes se encontram associados em consórcios (HENRIQUES; PORTO, 2012).

A seguir, serão apresentados alguns dos principais grupos empresariais presentes no Brasil dos quais as informações obtidas são resultantes de pesquisas nos *sites* institucionais de cada companhia.

A Mineração Rio do Norte (MRN) atua desde 1979 no distrito de Porto de Trombetas, com operações nos municípios de Oriximiná e Terra Santa, oeste do Estado do Pará, com produção anual de 12 milhões de toneladas pelas operações de extração, beneficiamento e transporte de bauxita para estados do Brasil e para vários países do mundo. A MRN possui uma composição acionária formada por 5 empresas: Vale (40%), South32 (33%), Rio Tinto (12%), CBA (10%), Hydro (5%).

A Hydro, por sua vez, iniciou seus investimentos no Brasil no final de 1970 e atualmente opera em todas as etapas da cadeia de valor do alumínio, desde a mineração de bauxita em

Trombetas e Paragominas, essa última 100% propriedade da Hydro, como também na produção de alumina através da Alunorte, a segunda maior refinaria de alumina do mundo, onde a Hydro possui 91,2% das ações. No que se refere a produção de alumínio primário, a Hydro é a acionista principal da Albras juntamente com a NAAC, formada por um consórcio de empresas japonesas. A Albras é a maior produtora de alumínio primário no Brasil e, assim como a Alunorte, fica localizada em Barcarena, no estado do Pará. Além de todas as aplicações descritas, a Hydro possui acordos com a Vale através dos quais adquiriu diversos ativos da cadeia de alumínio no Brasil antes de propriedade da Vale, incluindo a participação de 40% das ações na MRN.

Já a Alcoa opera no Brasil desde 1965 e possui 3 unidades produtivas espalhadas pelo território brasileiro: Poços de Caldas (MG), São Luís (MA) e Juruti (PA), escritórios em São Paulo (SP), Poços de Caldas (MG) e Brasília (DF). A planta de Poços de Caldas foi a primeira a unidade instalada no Brasil em 1965 e possui operações de mineração, refinaria e redução. A ALUMAR, unidade instalada em São Luís, iniciou sua operação em 1984, constituída de um complexo industrial produtor de alumina e alumínio primário que compreende o Porto, a Refinaria, a Redução e o Parque Ambiental. Na área de produção de alumina (Refinaria), o Consórcio é composto pela Alcoa (54%), South32 (36%) e Rio Tinto (10%). No setor de alumínio é formado pela Alcoa (60%) e a South32 (40%). Por fim a unidade em Juruti realiza operação de mineração e beneficiamento de bauxita desde 2009 no estado do Pará com uma reserva potencial de 700 milhões de toneladas métricas de bauxita. A planta de beneficiamento é composta por plantas de britagem e lavagem, bacias de rejeitos associadas e pátios de estocagem de bauxita.

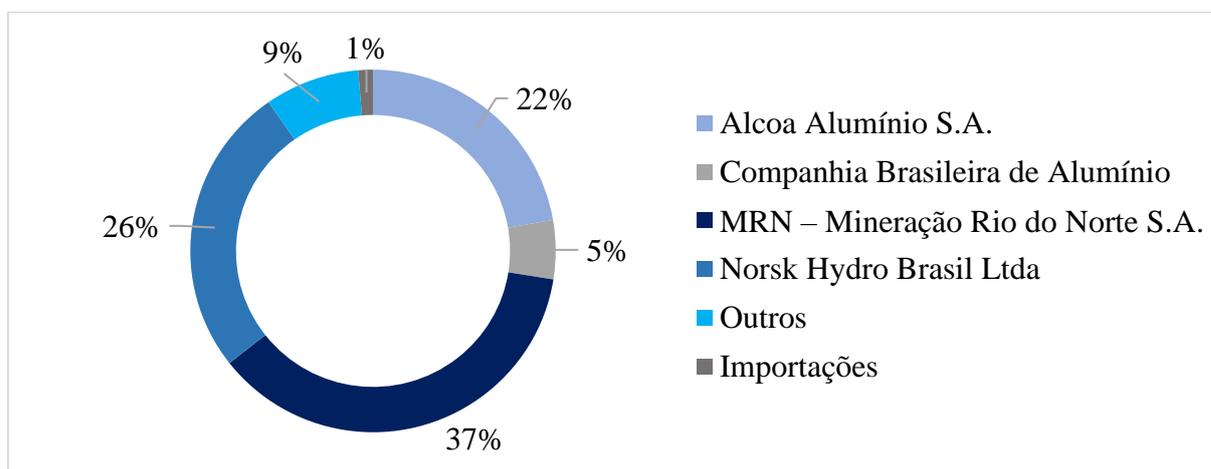
A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), gerenciada pelo Grupo Votorantim, iniciou suas operações através da mineração em Poços de Caldas em 1941 e hoje já conta também com extração de bauxita em Itamarati de Minas (MG), Mirai (MG) e Barro Alto (GO). A Fábrica da CBA fica localizada na cidade paulista de Alumínio, em São Paulo, e é constituída de uma planta integrada desde o processamento da bauxita recebida, produção de alumina até a transformação desta em alumínio primário e transformado. Além da unidade de Alumínio, a CBA possui uma planta em Araçariguama (SP), especializada em reciclagem de alumínio, e uma planta em Itapissuma (PE) destinada a produção de chapas e folhas de alumínio. A empresa também detém 10% de participação na MRN além de 21 hidrelétricas que atendem praticamente toda a demanda energética requerida pelo processo de produção de alumínio.

Segundo a ABAL, em 2020, o Brasil apresentou uma produção de 10,184 milhões de toneladas de alumina e 685,1 mil toneladas de alumínio primário. Por outro lado, o suprimento

de bauxita no país atingiu um total de 33,33 milhões de toneladas no mesmo ano, sendo apenas 432,7 mil toneladas advindas de importação.

A Figura 5 apresenta a porcentagem de produção de bauxita pelas empresas em 2020, sendo possível verificar que a MRN (12.289 milhões de toneladas) foi a maior produtora, seguida pela Norsk Hydro Brasil Ltda (8,640 milhões de toneladas) através da Mineração Paragominas S.A da qual detém todas as ações. A Alcoa representa 22% da bauxita produzida, somando um total de 7,421 milhões de toneladas, vindas 95% da mina de Juruti e apenas 5% da mina em Poços de Caldas. Por fim, verifica-se a autossuficiência das reservas de bauxita no Brasil, uma vez que as importações corresponderam apenas a 1% do quantitativo total de suprimento desse minério para o ano de 2020.

Figura 5 – Produção de bauxita no Brasil em 2020

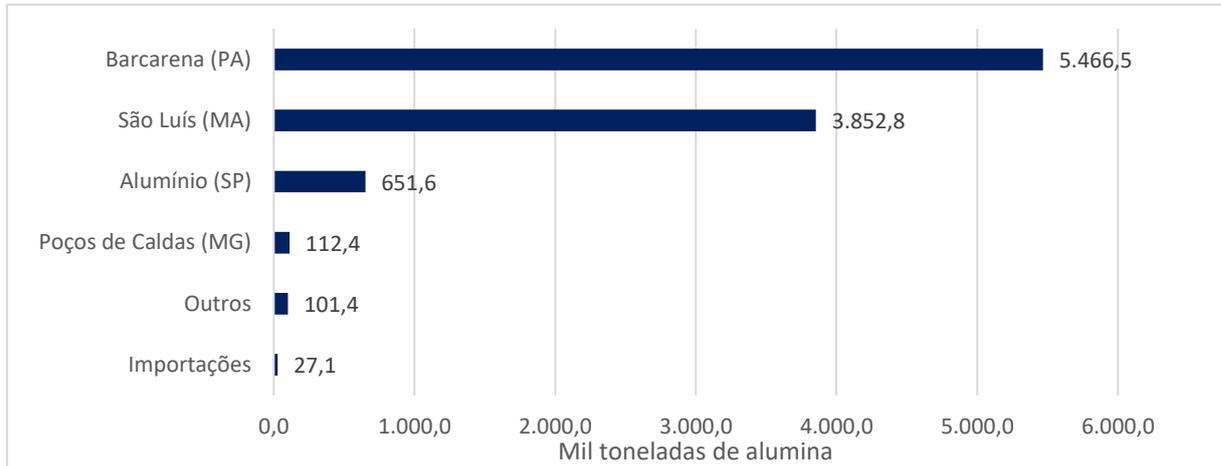


Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Quanto à produção de alumina no Brasil para o mesmo ano, verifica-se, através da Figura 6, que a maior produção se deu no estado de Barcarena (PA) onde localiza-se a refinaria da Alunorte – Alumina do Norte do Brasil S.A, subsidiária da Norsk Hydro Brasil Ltda. com um quantitativo de 5,466 milhões de toneladas de alumina produzida. A segunda maior produção ocorreu em São Luís (MA) com 3,852 milhões de toneladas de alumina produzida em 2020 pela ALUMAR, consórcio entre as proprietárias Alcoa (54%), South32 (36%) e Rio Tinto (10%). Na sequência, encontram-se as refinarias em Alumínio (SP), unidade da CBA com 651,6 mil toneladas e Poços de Caldas (MG), unidade da Alcoa com 112,4 mil toneladas. Do quantitativo total de alumina produzida em 2020 no Brasil aproximadamente 86% foi exportada para outros países.

Por fim, a produção de alumínio primário em 2020 no Brasil somou 685,1 mil toneladas sendo 378,9 mil toneladas produzidas pela Albras - Alumínio Brasileiro S.A. e 306,2 mil toneladas produzidas pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA).

Figura 6 – Produção de alumina no Brasil em 2020



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho pode ser classificado como uma pesquisa descritiva com base em seus objetivos e como uma pesquisa bibliográfica considerando o procedimento técnico utilizado.

Segundo Gil (2010) as pesquisas descritivas apresentam como objetivo principal analisar e descrever as relações ou características de determinado tema, bem como as associações entre variáveis. Enquanto Marconi; Lakatos (2010) afirmam que as pesquisas bibliográficas não se constituem apenas de meras repetições do que já fora dito, mas permitem uma nova abordagem e ótica sobre o tema propiciando soluções inovadoras.

Dessa forma, a fim de compreender o contexto da indústria de alumínio no Brasil e a importância da gestão sustentável como forma de minimizar os impactos causados ao decorrer do processo produtivo desse suprimento, foi realizado um levantamento de informações e dados através de teses, artigos, periódicos e *sites* institucionais com o objetivo de compreender as etapas que compõe o processo produtivo do alumínio primário, o panorama desse tipo de indústria no mercado nacional e, a partir disso, analisar como as principais empresas do ramo atuam diante dos impactos socioambientais associados ao processo.

Assim, a fim de correlacionar os principais aspectos envolvidos ao longo da produção do alumínio primário com as medidas de mitigação e metas estabelecidas para redução dos impactos associados, utilizou-se como fonte de estudo os relatórios anuais de sustentabilidade das principais empresas que atuam no Brasil. Para definir as empresas de maiores expressividades no cenário nacional, elegeu-se como critério norteador a produção de alumínio em 2020, dados mais recentes disponibilizados pela ABAL, dessa maneira foram selecionados os relatórios das empresas: Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) (Relatório Anual da Companhia Brasileira de Alumínio, 2020) e Norsk Hydro Brasil Ltda (Relatório de sustentabilidade das operações da Hydro no Brasil, 2019). A escolha dessas empresas também se deu pelo fato de que elas operam todas as etapas da cadeia produtiva do alumínio primário; possuem semelhanças na estrutura dos relatórios ao descreverem os impactos, as medidas de mitigação e metas estabelecidas; além do período de referência serem próximo, já que a CBA apresenta informações de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2020, enquanto a Hydro relata sobre as operações em 2019 com inclusão de informações até agosto de 2020.

Os aspectos escolhidos para avaliação das estratégias sustentáveis foram: consumo de água e geração de efluentes; geração de resíduos, consumo de energia e emissões atmosféricas; e supressão de vegetação e manejo de fauna. A definição desses aspectos se deu

a partir da significância dos impactos gerados não somente em intensidade, como também em relação a recorrência destes durante o processo produtivo, já que a maioria deles é difuso, pois estão presentes em todas ou quase todas as etapas da operação. Além disso, todos os aspectos escolhidos são abordados em ambos os relatórios das empresas eleitas, viabilizando assim a comparação entre elas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais impactos intrínsecos ao processo produtivo de alumínio são, em sua maioria, difusos e presentes em todas as etapas, desde a mineração até a redução. Dessa maneira, serão apresentados e discutidos a seguir os principais aspectos e impactos associados ao processo produtivo do alumínio primário, bem como as medidas e metas estabelecidas pelas empresas selecionadas objetivando a mitigação destes.

4.1 Consumo de água e geração de efluentes

Entre os principais aspectos associados à produção de alumínio primário destacam-se a captação de água e a geração de efluentes, que podem ocasionar a redução da disponibilidade do recurso hídrico e a alteração da qualidade da água, respectivamente. O consumo de água durante o processo de produção de alumínio é difuso, uma vez que está presente desde usos para consumo humano até a utilização nas etapas de processo seja da mineração, refinaria e redução. A geração de efluentes também possui uma característica difusa, pois é ocasionada tanto por atividades humanas dentro das plantas quanto industriais.

A empresa Hydro (2019) informa, através do seu relatório de sustentabilidade, que, de acordo com uma ferramenta global do Conselho Empresarial Mundial para Desenvolvimento Sustentável (*World Business Council for Sustainable Development – WBCSD*), suas unidades não estão localizadas em áreas com escassez hídrica. Além disso, em 2017, a Hydro desenvolveu uma ferramenta para análise do risco da água envolvendo tanto a gestão do excesso de água como também a qualidade dos corpos hídricos em que são feitas as descargas líquidas. Por fim, o relatório ressalta que boa parte do fornecimento de água para a refinaria de alumina da Hydro (Alunorte) é realizado através da lama de bauxita que é transportada da sua unidade de mineração em Paragominas via mineroduto. Os usos das águas de ambas as unidades estão próximos dos seus limites regulamentares atuais. Apesar de as licenças de extração de água do rio Parariquara pela unidade de Paragominas terem sido revisadas em 2018, a bacia hidrográfica em questão encontra-se sobrecarregada e ameaçada caso outro usuário solicite extração na mesma, além de haver histórico de retirada de água pela unidade de Paragominas acima do limite autorizado em 2017 e lançamento de efluentes no rio Pará através do chamado Canal Velho e tubulação em desuso, ambas identificadas em 2018, que colaboraram com o embargo da Alunorte.

No ano de 2019, referente ao relatório em análise, a Hydro encontrava-se em fase de implementação das metas de gestão de água e, como primeiro passo, afirmava estar fortalecendo os relatórios atuais na época e as práticas de gestão com objetivo de apresentar o relatório de melhores práticas da indústria sobre a água em 2021. No entanto, não foi possível localizar este relatório, correspondente às operações no Brasil, no *site* institucional da empresa.

Por sua vez, a Companhia Brasileira de Alumínio (2020) afirma seu compromisso em minimizar os impactos e reduzir a pressão sobre os recursos hídricos e, para isso, possui diretrizes internas estabelecidas para gestão de água e efluentes. Com esse propósito, em setembro de 2020 iniciou a operação do projeto Circuito Fechado, que consiste em recolher a água da chuva, evitando a captação de cerca de 15.000 m³ de água nova por outros meios.

A CBA possui como meta para 2025 reduzir o consumo bruto de água nova em 22%, comparando com o ano base de 2017 e vem caminhando para alcançar a meta imposta, uma vez que em 2020 a companhia atingiu uma redução de 20,9%. Além disso, na estratégia de ESG (Environmental, Social and Governance) foi definido que a CBA deverá reduzir em 20% a intensidade de água nova por tonelada de alumínio (m³/t Al) na Fábrica de Alumínio até 2030, tendo como base o ano de 2019. Com esse objetivo, a empresa afirma elevar os esforços na redução de desperdícios, aumento da eficiência do processo e intensificar a utilização de água pluvial. Dessa forma, a empresa conta também com o desenvolvimento do projeto *Update* da tecnologia das Salas Fornos (*Green Soderberg*) que visa contribuir com o atingimento desta meta através da redução de mais de 120.000 m³ previstos de água consumida por ano.

O relatório da CBA também informa acerca das ações de educação ambiental voltadas para o tema de recursos hídricos, ao longo do ano de 2020 e descreve como se dá as entradas e saídas de água e efluentes em cada uma das unidades produtivas com consumo significativo. Por fim, o relatório menciona que a CBA está desenvolvendo um projeto de adaptação às mudanças climáticas, que envolve o estudo de risco hídrico baseado em modelos matemáticos para cada uma das suas unidades.

Dessa forma, diante dos resultados encontrados para o aspecto consumo de água e geração de efluentes, é possível verificar que a Hydro não apresenta em seu relatório de sustentabilidade metas bem definidas para redução do consumo de água, apesar de encontrar-se em situação de estresse hídrico devido à baixa disponibilidade desse recurso na bacia hidrográfica da qual a unidade de Paragominas capta água para operação do seu mineroduto de bauxita. A CBA, por sua vez, apresenta em seu relatório metas estabelecidas para 2025 e 2030, em que no primeiro caso já se encontra próximo de atingir. Além disso, a empresa descreve projetos como captação de água da chuva e otimização de processos que estão em andamento

e possuem foco na redução do consumo de água demonstrando estratégias e ações efetivas nesse âmbito.

4.2 Geração de resíduos

A obtenção da bauxita e sequencialmente da alumina apresentam como principal impacto a geração de resíduos proveniente dos processos de mineração e refino do minério de bauxita. O rejeito originado pela extração da bauxita é composto basicamente por resíduos minerais, água e floculante, enquanto o resíduo gerado a partir da refinaria na etapa de clarificação, conhecido como lama vermelha, é constituído das consideradas impurezas da bauxita e possui elevado teor cáustico. A geração dos demais resíduos durante a operação configura-se como um aspecto difuso resultante de diversas atividades humanas rotineiras e de atividades industriais, no entanto destaca-se o Revestimento Gasto de Cuba (RGC) ou *Spent Pot Lining* (SPL) resultante da quebra do revestimento das cubas eletrolíticas no processo de redução.

A Hydro informa, através do seu relatório, que, em relação aos rejeitos gerados pela mineração em Paragominas, o armazenamento é realizado em barragens que promovem a sedimentação das partículas sólidas enquanto a água é coletada em um tanque e reutilizada. Por outro lado, o resíduo de bauxita resultante do refino é lavado com água para reduzir a alcalinidade e recuperar a soda cáustica para reuso. Por fim, é realizada a disposição em 2 depósitos de resíduos sólidos (DRS 1 e DRS 2) através do empilhamento a seco, uma tecnologia avançada que utiliza filtros de tambor rotativo e filtros-prensas capazes de reduzir o teor de umidade dos resíduos para 36% e 22%, respectivamente.

A segurança e conformidade das barragens e áreas de disposição de resíduos de bauxita são asseguradas pela Hydro através de inspeções e auditorias regulares pela própria empresa e autoridades brasileiras, conforme consta no relatório de sustentabilidade de 2019. Entretanto, o relatório também apresenta a situação que levou ao embargo da Alunorte em 2018, quando após fortes chuvas em fevereiro daquele ano, os níveis de “*free board*” da bacia de contenção de água da chuva drenada do DRS1 foram excedidos por alguns dias, levando a notificação por parte da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS) para redução em 50% da produção da refinaria e suspensão da operação do DRS2. Após várias inspeções de autoridades locais e nacionais, nenhum vazamento foi encontrado nas áreas de armazenamento de resíduo de bauxita. A partir de informações do *site* institucional da Hydro, é possível verificar a ordem cronológica desde as acusações que despertaram o embargo

imposto, como também, as irregularidades constatadas pelos órgãos ambientais e por fim os acordos assinados com o Governo do Pará e o Ministério Público visando a suspensão do embargo e retomada da produção da Alunorte. Diante do todo exposto a Hydro afirma investimentos em projetos internacionais para busca de possibilidades de uso para o resíduo de bauxita assim como lançou uma meta para utilizar 10% dos resíduos de bauxita gerados a partir de 2030.

Em relação aos outros tipos de resíduos, o relatório de sustentabilidade da Hydro (2019) destaca os Revestimentos Gastos de Cuba (RGC) (*Spent Pot Lining – SPL*) resultante do processo de redução para produção do alumínio primário que são caracterizados como resíduo perigoso e apresenta-se em grande estoque na Albras. Conforme o relatório, esse resíduo está sendo direcionado para indústria de cimento no Brasil como matéria-prima, promovendo uma redução do seu estoque de escória de 1319 para 36 toneladas métricas, desde 2016. Além disso, a planta implantou um programa para a redução de resíduos perigosos baseados em controles de processo que vem proporcionando resultados positivos desde setembro de 2018.

A CBA informa em seu relatório (2020) que os rejeitos de bauxita e lama vermelha derivados dos seus processos produtivos são encaminhados para barragens. Entretanto, a empresa afirma estar conduzindo estudos para aproveitamento do rejeito da mineração na construção civil em parceria com uma *startup* e, para a lama vermelha, estão sendo realizados estudos que buscam viabilizar seu uso no cimento. Além disso, a unidade Alumínio investiu na instalação de um sistema de filtro-prensa, alterando a atual disposição do resíduo chamada *wet disposal*, (disposição úmida com baixa concentração de sólidos) para *dry disposal*. Dessa forma, a maior parte da água retornará para o processo produtivo e somente os resíduos secos com aproximadamente 75% de concentração de sólidos serão dispostos na Barragem do Palmital. Entre as vantagens, pode-se destacar o aumento da vida útil e segurança da barragem, além da maior recuperação de soda cáustica, melhorando a excelência do processo e reduzindo os custos. A implantação do sistema iniciou em 2019 e espera-se que seja concluída até 2024 e, com esse objetivo, a CBA vem reduzindo o volume de água da barragem que em 2020 foi 80% menor se comparado à 2017. A Companhia estabeleceu como objetivo da sua estratégia ESG até 2030 passar a não dispor resíduos em barragens, destinando 100% do resíduo seco da lama vermelha ao reaproveitamento.

Em relação ao demais resíduos gerados, a CBA possui, desde 2020, uma equipe multidisciplinar especializada na gestão resíduos gerados, a fim de encontrar destinações que agregam valor, seja pela reutilização interna ou pela venda, proporcionando ganhos ambientais e financeiros. Essa iniciativa já promoveu bons resultados como o reaproveitamento dos

resíduos de incrustações dos tanques de processo na etapa de moagem, ao invés de destinar em barragens, venda de refratário das reformas dos fornos da fundição que antes eram armazenados em um aterro de inertes interno e a segregação dos resíduos das cubas das salas de fornos a fim de reaproveitar internamente uma fração do material enquanto o restante é comercializado. A CBA reforça que todas as diretrizes internas e requisitos legais são seguidos rigorosamente para garantir a destinação correta dos resíduos e que para isso possuem uma equipe interna que realiza auditorias periódicas nas empresas envolvidas nesse processo. Por fim, a CBA informa que sua meta para 2025 é reduzir em 35% a geração bruta de resíduos nas minerações e nas fábricas, tendo como base os dados de 2017.

Portanto, verificou-se que em relação ao aspecto de geração de resíduos, destacam-se os rejeitos da mineração, os resíduos de bauxita e o revestimento gasto de cubas ou SPL, que se caracterizam por serem resíduos perigosos, de grande geração e difícil reutilização. A Hydro apresenta em seu relatório medidas mitigadoras satisfatórias para os resíduos de bauxita, uma vez que aplica a técnica de disposição a seco (*dry disposal*) através do uso filtros de tambor rotativo e filtros-prensas que possuem alta tecnologia e eficiência na recuperação da água, reduzindo a área necessária para destinação destes, além de promover maior estabilidade das estruturas. A Hydro estabeleceu como meta reduzir 10% a geração desse resíduo a partir de 2030. Enquanto em relação ao SPL, a Hydro realiza a destinação desse resíduo perigoso para uma indústria de cimento no Brasil, reduzindo esse passivo anteriormente estocado. As medidas de mitigação relacionadas à gestão dos resíduos de bauxita adotadas pela CBA se assemelham às da Hydro uma vez que a empresa está implementando o sistema de filtros-prensas com previsão de finalização em 2024, promovendo o aumento da vida útil e da segurança das barragens, além de estar desenvolvendo pesquisas para aproveitamento do rejeito da mineração na construção civil e da lama vermelha para a produção de cimento, uma vez que a empresa possui como meta até 2030 realizar o reaproveitamento de 100% do resíduo seco da lama vermelha. No que se refere aos demais resíduos, como o revestimento gastos de cubas, incrustações dos tanques de processos e refratários dos fornos de fundição a CBA realiza também sua comercialização e uma parte é reaproveitado internamente.

4.3 Consumo de energia e emissões atmosféricas

A indústria do alumínio é considerada intensiva em uso de energia e emissões atmosféricas. Quando se trata do processo da refinaria, os impactos no consumo de recursos não renováveis e alterações da qualidade do ar são verificados principalmente nas etapas de

geração de vapor pelas caldeiras, e na etapa de calcinação da alumina. Já em relação às operações da redução, o maior consumo de energia elétrica ocorre na sala de cubas devido o processo de eletrólise não ser espontâneo, e em relação ao consumo de combustíveis fósseis, ocorre no cozimento do ânodo (matéria-prima para redução da alumina em alumínio e oxidação do carbono em CO₂). Em termos de emissões, são verificadas emissões nas mesmas etapas. Portanto, as empresas que atuam nesse ramo devem possuir estratégias e planos bem definidos quanto ao consumo de energia e ao controle dos gases de efeito estufa (GEE) e outros poluentes.

Dessa forma, verifica-se através do relatório da Hydro (2019) que a empresa possui como meta estratégica reduzir as emissões de gás de efeito estufa em 10% até 2025 e 30% até 2023, considerando como base os valores de 2017 para Paragominas, Albras e Alunorte devido ao embargo nesta última e à redução da produção nas outras duas, e de 2018 para as demais unidades. Esse objetivo equivale a 13,3 milhões de toneladas de CO₂, levando em consideração emissões diretas e indiretas (escopo 1 e 2) a partir da geração de energia. Para atingir as metas estabelecidas, a Hydro informa estar analisando projetos que envolvem um mix de energia mais verde para as reduções de emissões na Alunorte. Além disso, a empresa busca por fontes mais verdes na posição de compradora de matérias-primas e energia, bem como a possibilidade de fornecer eletricidade com menos intensidade de carbono, metal frio com uma menor pegada de carbono e elevar o uso de sobras pós-consumo na produção de metal.

Desde 2013 a Hydro trabalha visando a neutralidade do carbono em uma perspectiva de ciclo de vida, conforme a visão de balanço entre as emissões diretas e indiretas geradas pelas suas próprias operações e a economia da aplicação do metal produzido na fase de utilização. Dessa forma, a Hydro informa que em 2019 tornou-se neutra em carbono na perspectiva de ciclo de vida definida pela própria empresa. Entretanto, também afirma ter iniciado um programa de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) a fim de alcançar um processo livre de CO₂ analisando diferentes estratégias, como captura e estocagem de carbono e ânodos em biomassa, para que seja possível o atingimento da meta da redução das emissões até 2030.

A Companhia Brasileira de Alumínio, por sua vez, declara em seu relatório anual de 2020 que seu produto final é de baixo carbono, uma vez que sua principal fonte de energia é limpa, proveniente das próprias hidrelétricas, caracterizando como um diferencial competitivo no mercado. Percebe-se esse fato através do seu inventário de emissões de gases de efeito estufa no Programa Brasileiro GHG *Protocol*, que recebeu o certificado de Selo Ouro pelas informações completas referentes aos escopos 1 e 2 (o primeiro se refere às emissões resultantes diretamente das operações da empresa, enquanto o segundo está relacionado às emissões indiretas advindas da energia elétrica adquirida para uso).

Além disso, em 2020, a CBA apresentou uma redução de 13,3% nas emissões de escopos 1 e 2 se comparadas às de 2019. Grande parte dos resultados se deve à implantação da Caldeira à Biomassa, que promoveu uma redução significativa do consumo de gás natural na refinaria de alumina e pela redução na produção neste período. A caldeira, que iniciou sua operação em março de 2020, é abastecida por biomassa de cavaco de madeira substituindo as antigas caldeiras movidas a gás natural e a óleo diesel, promovendo a redução de emissões (0,55 para 0,31 tCO₂e/t óxido de alumínio em relação a 2019) e de custos quando comparada aos combustíveis fósseis.

A CBA também possui um projeto de eficiência energética e redução de emissões chamado *Upgrade* da tecnologia das Salas Fornos (*Green Soderberg*) que é baseado em um sistema de alimentação pontual (óxido de alumínio e banho eletrolítico) dos fornos eletrolíticos através de quantidades e intervalos de tempo regulares. O projeto previsto para finalizar em 2029 apresenta um investimento total de aproximadamente R\$ 373 milhões. Até 2020, 36 das 1.040 cubas já haviam sido adaptadas e otimizadas ao novo modelo de alimentação que promete reduzir as emissões de GEEs, material particulado e flúor e aumentar a eficiência e a segurança, além proporcionar maior produtividade e redução de custos e consumo de água com o desligamento dos sistemas de tratamento de gases a úmido. Atrelado ao *Green Soderberg*, há também o projeto de Pasta Semi-seca que consiste na utilização de uma pasta anódica com menor teor de piche para melhor eficiência de funcionamento do sistema de alimentação automático. Essa redução do teor de piche também apresenta potencial de redução dos gases de efeito estufa. Todos esses projetos visam contribuir para a redução das emissões, bem como o aumento da eficiência energética da CBA que, de acordo com o Anuário de Energéticos por Município no Estado de São Paulo de 2019, o município de Alumínio foi o segundo maior consumidor de energia elétrica do estado, sendo 99,5% correspondente às operações da CBA.

No cenário mundial, a CBA se destaca positivamente pela baixa taxa de emissões no processo de eletrólise (2,66 tCO₂e/t Al líquido em 2020), etapa de maior consumo de energia na produção de alumínio líquido, se comparada à média mundial que chega a 12 tCO₂e/t Al líquido e ao padrão do Performance da ASI (*Aluminium Stewardship Initiative*) determina que empresas com emissão superior a 8 tCO₂e/t AL primário no processo de eletrólise devem apresentar um plano de redução para que possam ser certificadas.

Apesar de suas emissões estarem entre as mais baixas em relação à média do setor, a CBA afirma manter esforços para reduzi-las ainda mais, através das metas de redução de 16% nas emissões brutas de GEE das minerações e das fábricas (escopos 1 e 2) até 2025, tendo como base o ano de 2017, e como estratégia de ESG 2030 reduzir 40%, em relação aos resultados de

2019, a média dos produtos fundidos, desde a etapa de mineração. Além disso, vinculado a essas metas, a CBA tem como objetivo a criação de uma linha de produtos carbono neutro, a busca pela neutralidade das emissões no processo até 2050 e um plano de adaptação às mudanças climáticas.

Outro compromisso assumido pela CBA em 2020 foi com a iniciativa *Business Ambition for 1,5°* que se refere a uma proposta do Pacto Global da ONU, CDP, *World Resources Institute* e *World Wide Fund for Nature (WWF)*, com objetivo de traçar planos e cumprir metas de redução de emissões de GEEs a fim de limitar o aumento da temperatura no planeta em 1,5 °C através da metodologia *Science Based Targets*. A CBA também participa dos: encontros da Câmara Ambiental de Mudanças Climáticas pela adesão ao Acordo Ambiental de São Paulo; da Simulação de Comércio de Emissões do Centro de Pesquisa em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (FGV); do Grupo Temático de Energia e Clima do Pacto Global; e do grupo de trabalho do Centro Empresarial Brasileiro de Desenvolvimento Sustentável (CEBDS).

Dessa forma, que se diz respeito ao aspecto de consumo de energia e emissões atmosféricas, ambas as empresas apresentam metas de redução de emissões bem definidas (Hydro: 10% até 2025 e 30% até 2030. CBA: 16% até 2025 e 40% até 2030) além de ações e projetos que já estão colaborando para o alcance das porcentagens supracitadas. A Hydro afirma estar trabalhando em busca de fontes mais verdes tanto em matéria-prima como em energia, além do fornecimento de eletricidade com menos intensidade de carbono, metal frio com uma menor pegada de carbono e uso de sobras pós consumo na produção. A Hydro também alega estar em neutralidade de carbono conforme a perspectiva de ciclo de vida definida pela própria empresa, no entanto não descreve detalhes sobre como é feito esse balanço entre as emissões. Em contrapartida, a CBA demonstra diversas estratégias com foco na redução do consumo de energia e emissões atmosféricas, como por exemplo, a implantação da caldeira à biomassa substituindo as caldeiras a gás natural e à óleo diesel, promovendo ganhos ambientais e econômicos. Além desta, também podem ser citados os projetos em fase de implantação que se baseiam no uso da tecnologia para otimização de processos que devem elevar a produtividade e minimizar a emissão de poluentes e o consumo de água durante o processo de eletrólise. A CBA mostra-se engajada em diversos pactos e acordos a favor do clima além de se destacar com inovações pioneiras nesse ramo.

4.4 Supressão de vegetação e manejo de fauna

O processo mineração para obtenção da bauxita está intrinsecamente associado aos impactos na fauna e flora locais, como perda de nutrientes do solo, alteração do relevo e das características naturais do solo de compactação e fertilidade biológica devido aos aspectos de supressão vegetal, retirada de solo e manejo ou afugentamento da fauna. Dessa forma, os empreendimentos com atividade minerária devem minimizar os impactos relacionados e garantir o retorno das condições ambientais o mais próximo possível do anterior às intervenções através dos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD).

A Hydro realiza atividades de mineração na cidade de Paragominas no estado do Pará e fica localizada dentro da Bacia Amazônica, incrementando ainda mais a relevância da reabilitação das áreas impactadas. Dessa forma, a empresa afirma ter uma meta contínua visando a reabilitação 1:1 das áreas em duas estações hidrológicas, após liberação referente ao tempo necessário para garantir a qualidade da restauração da biodiversidade, pois quando as barragens de rejeito são encerradas precisam ser preservadas de pelo menos 5 anos para ficarem disponíveis para reabilitação.

De acordo com seu relatório (2019), a Hydro utiliza 3 tipos diferentes de metodologias de reabilitação em Paragominas: a reabilitação tradicional, a vegetação natural e o método de nucleação. Porém, desde 2013, o método de nucleação vem sendo prioritário na reabilitação de áreas em Paragominas que, por sua vez, consiste em distribuir de forma desigual uma camada de solo fértil a fim de simular uma paisagem natural e facilitar a captação de água da chuva. Posteriormente, são distribuídas pilhas de lenhas com o objetivo de criar abrigos para a fauna e facilitar o cultivo de algumas espécies de plantas. Esse método tem como objetivo restaurar florestas com a mesma estrutura das originárias e proteger a biodiversidade local. Dessa forma, a nucleação vem sendo testada na MRN e em Paragominas com resultados promissores.

Em relação às participações e iniciativas, a Hydro faz parte da Iniciativa de Biodiversidade entre Setores (CSBI – *Cross Sector Biodiversity Initiative*) estabelecida pelo ICMM (Conselho Internacional de Mineração e Metais), IPIECA (Associação Global da Indústria de Petróleo e Gás Sem Fins Lucrativos) e a Associação dos Princípios do Equador. Além disso, em 2013 criou o Consórcio de Pesquisa em Biodiversidade Brasil-Noruega (BRC) composto pela Universidade de Oslo, Museu Paraense Emílio Goeldi, Universidade Federal do Pará e Universidade Federal Rural da Amazônia e pela Hydro. O objetivo do consórcio é desenvolver um programa de pesquisas científicas ligados às operações de mineração da Hydro, apoiando a capacidade de preservação da biodiversidade e melhorando as formas de

recuperação das áreas de afetadas pelas atividades minerárias, até a data do relatório em análise já existiam 13 projetos de pesquisa em andamento, com o registro de 2 novas espécies de insetos.

Por sua vez, a Companhia Brasileira de Alumínio possui duas metas estratégicas bem definidas em relação ao tema da biodiversidade:

- Criar ou ampliar 1 hectare de corredor ecológico a cada 10 hectares minerados e recuperados;
- Ter 10% dos clientes e fornecedores-chave coinvestindo em projetos florestais e de biodiversidade.

Além disso, cada unidade de mineração possui seu Procedimento de Gestão de Biodiversidade e o seu Programa de Educação Ambiental (PEA) bem como metas específicas em relação a reconformação topográfica e reabilitação de áreas minerárias.

O processo de recuperação das áreas degradadas se dá após a exaustão dos corpos minerais (em que o ciclo de extração é de três a seis meses). Assim, são realizados processos de reconformação, topografia, correção do solo, plantio e manutenções. Porém, a retomada das atividades produtivas na área leva em torno de 3 a 5 anos variando com a cultura agrícola acordada. A CBA disponibiliza as terras para produção juntamente com cartilhas de orientações técnicas, ambientais e legais ao proprietário rural. Através dos dados disponibilizados no relatório de 2020, a CBA tem recuperado áreas através de culturas agrícolas como café (tempo médio de retomada da produção em 5 anos) e principalmente através do plantio de eucaliptos ou pastagem (3 anos para retomada das atividades), como é possível verificar no caso de Poços de Caldas, com 24,33 hectares reabilitados, 16,46 destinados ao plantio com eucalipto e 7,87 utilizados para pastagens. A CBA também informa que realiza o monitoramento da fauna como bioindicador da qualidade ambiental das áreas reabilitadas cujo indicador atinge 96,8% nos períodos estipulados, além de manter áreas experimentais no contexto de agricultura familiar em parceria com a Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Além disso, a CBA é proprietária do Legado Verdes do Cerrado, uma Reserva Particular de Desenvolvimento Sustentável de 32 mil hectares localizado em Goiás, e uma das fundadoras do Legados das Águas, uma área de proteção permanente de 31 mil hectares de Mata Atlântica localizada no estado de São Paulo. Tais iniciativas são compromissos com a Meta de Aichi de proteção de ecossistemas, da biodiversidade e da diversidade genética; com Protocolo de Quioto, visando a diminuição das emissões de gases de efeito estufa; e com o Pacto Global. Essas reservas apresentam uma grande relevância socioambiental para as áreas onde estão inseridas, uma vez que contribuem para conservação dos biomas, recarga hídrica, geração de

renda para as comunidades locais, redução dos efeitos das mudanças climáticas e desenvolvimento de pesquisas e inovação acadêmica.

O Legado Verdes do Cerrado possui 80% do seu território destinados à conservação do Cerrado nativo, enquanto 20% estão voltados para a agricultura, pecuária e silvicultura, onde são realizadas diversas pesquisas como por exemplo agrofloresta, qualidade dos solos das regiões cársticas, biodiversidade e endemismo, alometria no Cerrado, BioLeve, monitoramento do Rio Traíras e soja de baixo impacto. Em 2020, cerca de R\$ 1,8 milhões foram investidos no projeto, que apesar das dificuldades impostas pela pandemia do coronavírus, vem promovendo ótimos resultados, como o aumento em 10 hectares de agroflorestas, parceria com o Programa ReDes (Redes para o Desenvolvimento Sustentável) através da doação de todas as frutas colhidas para uma cooperativa local, entrega de mais de 50 mil árvores em municípios de Goiás e projetos de conscientização com foco em combate às queimadas com uma estimativa de que 10 mil hectares do Legado poderiam ter sido queimados se não fossem essas iniciativas com a comunidade local e o uso de caminhões-pipas e bombas de água.

O Legado das Águas também enfrentou dificuldades e restrições durante a pandemia, precisando buscar alternativas digitais como *lives* para manter a interação e disseminação de conhecimento sobre o parque e pesquisas lá desenvolvidas. Assim, em setembro de 2020, o Legado reabriu com limite para 40% de ocupação nas trilhas e pousadas, além do retorno dos projetos de reflorestamento e compensação ambiental. Dessa forma, desde dezembro do mesmo ano estão sendo vendidas plantas nativas criadas nos viveiros do Centro de Biodiversidade da Mata Atlântica do parque que possui uma capacidade produtiva de 200 mil mudas por ano, de mais de 80 espécies diferentes para projetos paisagísticos e de reflorestamento. Dentre os projetos de pesquisa desenvolvidos no Legado das Águas pode-se citar estudos sobre controle de zoonoses e impactos ambientais causados por fauna doméstica, fertilização do solo e dispersão de fungos micorrízicos por mamíferos na Mata Atlântica, monitoramento de fauna, produtividade da violácea, pragas e tratamento de semente da violácea e taxa de sucesso na realocação de orquídeas.

Diante do exposto, no que se refere ao aspecto de supressão da vegetação e manejo de fauna, percebe-se uma grande preocupação das empresas com o processo de recuperação das áreas degradadas pelo processo de mineração. A Hydro, por estar localizada em uma região amazônica, apresenta maiores restrições e critérios rigorosos a serem seguidos, implementando métodos elaborados para a restauração mais próxima possível da original, a fim de proteger a diversidade da fauna e flora locais. Enquanto a CBA tem realizado a recuperação de áreas degradadas através do plantio de monoculturas (como café e eucalipto) e pastagem, medidas

menos sustentáveis quando se compara à reabilitação através de florestas nativas heterogêneas, podendo até mesmo prejudicar a biodiversidade local devido a inserção de espécies exóticas como o eucalipto. Ambas as empresas demonstram comprometimento com a produção acadêmica e pesquisas científicas. A CBA é detentora de uma Reserva Particular de Desenvolvimento Sustentável localizada no bioma Cerrado e uma das fundadoras de uma área de proteção de Mata Atlântica.

5 CONCLUSÃO

A abordagem utilizada pelo presente estudo torna-se de extrema relevância visto que o Brasil possui elevado potencial de produção desse metal, devido à grande abundância e qualidade reservas de minério de bauxita, matéria-prima do alumínio, encontrada no território nacional. Além disso, verifica-se a importância das ações de minimização dos impactos ambientais intrínsecos ao processo pelas empresas que operam essas atividades no Brasil, uma vez que os impactos negativos são de elevada significância e recorrência ao longo das etapas produtivas.

Dentre os impactos ambientais associados aos processos produtivos do alumínio primário foram eleitos quatro principais aspectos que podem resultar em impactos negativos significativos ao meio ambiente: consumo de água e geração de efluentes; geração de resíduos; consumo de energia e emissões atmosféricas; e supressão de vegetação e manejo de fauna. A escolha destes aspectos está relacionada a severidade dos efeitos adversos resultantes assim como a elevada recorrência deles em diversas atividades e etapas do processo industrial.

Em relação aos relatórios de sustentabilidade das empresas analisadas neste trabalho, verificou-se similaridades na estruturação dos tópicos relacionados aos impactos elegidos, facilitando a análise destes, bem como as medidas estratégicas e ações desenvolvidas com o objetivo mitigar os impactos associados às suas operações.

Entre as medidas e estratégias aplicadas com a finalidade de minimizar os impactos do consumo de água em seus processos, se destacaram o projeto Circuito Fechado que objetiva no aproveitamento da água da chuva, e o *Update* da tecnologia das Salas Fornos (*Green Soderberg*) que visa reduzir o uso da água através da otimização tecnológica na alimentação das cubas ou fornos eletrolíticos, ambos projetos desenvolvidos pela CBA. Já em relação a gestão de resíduos gerados pelo processo da refinaria, conhecido como lama vermelha, verificou-se que a utilização de filtros-prensas demonstra alta eficiência, aumentando a segurança e a vida útil das barragens. No que se refere ao consumo de energia e emissões atmosféricas notou-se o comprometimento das empresas com o impacto causado e as metas estipuladas para redução deste, ressaltando a inovação promovida pela CBA através da implementação da caldeira à biomassa que promoveu significativa diminuição as emissões de GEEs. Por fim, o aspecto que diz respeito aos impactos na biodiversidade verificou-se que a Hydro se compromete com a recuperação das áreas degradadas aplicando métodos elaborados para o retorno das características mais próximas ao estado natural do local afetado, enquanto a

CBA utiliza-se de técnicas de recuperação menos sustentáveis que não garantem a diversidade vegetal da área impactadas.

Diante de todo exposto, o presente estudo possibilitou o mapeamento do cenário atual da cadeia de valor do alumínio, proporcionando a identificação e compartilhamento das iniciativas tecnológicas das empresas e a avaliação de possíveis oportunidades de melhorias das medidas de mitigação propostas por estas.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio: Promovendo o alumínio para um futuro sustentável.** 2022. Disponível em: <<https://abal.org.br/>>. Acesso em: 12 abr. 2022.

ABAL. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio.** 2007. Disponível em: <https://www.academia.edu/14874898/Fundamentos_e_Aplica%C3%A7%C3%B5es_do>. Acesso em: 08 mai. 2022.

AGUIRRE, Marcos. **RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DA LAMA VERMELHA.** 2015. 136 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7239/TeseMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 28 mai. 2022.

AMBIENTE, Comissão Mundial Sobre Meio. Desenvolvimento – CMMAD. (1991). **Nosso futuro comum**, v. 2.

CBA. **Relatório Anual 2020: um alumínio melhor para um mundo melhor.** Disponível em: <https://cba.com.br/wp-content/uploads/2021/04/RA_CBA_2020_port_FINAL_1.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2022.

GARCIA, M. C. S. **CARACTERIZAÇÃO COLOIDAL DO RESÍDUO DE BAUXITA GERADO NO PROCESSO BAYER.** 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Foz do Iguaçu, 30 maio 2010. Disponível em: <https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/54/03-040.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2022.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** 5 ed. São Paulo: Atlas, 2010. 184 p

MATOS, Amanda Carolina Santos; TEIXEIRA, Rebeca Rodrigues Crespo; TAVARES, Florene Belato; LIMA, Isaac da Silva; ANDRADE, Ana Livia Cantuária; AZEVEDO, Luiz Eduardo Chaves; FARRINELLI, Giannberni Furtado Beanni. Processo produtivo da bauxita e da alumina: impactos socioambientais, formas de mitigação e o caso de barcarena, Pará, Brasil. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 29644-29654, 21 maio 2020. *Brazilian Journal of Development*. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n5-425>. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/10399>>. Acesso em: 22 mai. 2022.

MRN. **Mineração Rio do Norte: Conheça as etapas do nosso processo produtivo.** 2022. Disponível em: <<https://www.mrn.com.br/index.php/pt/o-que-fazemos/processo-produtivo>>. Acesso em: 08 mai. 2022.

SANTOS, Jadir Perpétuo dos; SILVA, Jonas José da. Melhorando a capacidade produtiva na refusão para Fabricação de tarugos de alumínio – estudo de caso Alcoa. **Research, Society And Development**, v. 9, n. 8, 17 jul. 2020. *Research, Society and Development*. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5638>. Disponível em:

<<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5638/5183>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

ELKINGTON, J. *Cannibals with forks* Canada: New Society. 1999.

HENRIQUES, Alen Batista; PORTO, Marcelo Firpo Souza. A insustentável leveza do alumínio: impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 18, p. 3223-3234, 2013.

HYDRO. Relatório de Sustentabilidade das Operações da Hydro no Brasil - 2019.

Disponível em: <<https://www.hydro.com/globalassets/07-media/news/2020/relatorio-de-sustentabilidade-das-operacoes-da-hydro-no-brasil-2019.pdf>> . Acesso em: 10 jun. 2022.

JABBOUR, Charbel José Chiappetta; SANTOS, Fernando César Almada. Evolução da gestão ambiental na empresa: uma taxonomia integrada à gestão da produção e de recursos humanos.

Gestão & Produção, v. 13, n. 3, p. 435-448, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO).

<http://dx.doi.org/10.1590/s0104-530x2006000300007>.

KRÜGER, Eduardo L. Uma abordagem sistêmica da atual crise ambiental. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 4, 2001.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 297 p.

MARQUES, Fábio Vinicius dos Reis. **A Produção de Alumínio no Brasil**. 2013. 45 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/4758/1/MARQUES%2c%20F.V.R.pdf>>. Acesso em: 19 mai. 2022.

NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. **Trajatória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico**. Estudos avançados, v. 26, p. 51-64, 2012.

PEREIRA, João Victor Inácio. Sustentabilidade: diferentes perspectivas, um objetivo comum. **Economia Global e Gestão**, v. 14, n. 1, p. 115-126, 2009.

SHREVE, Randolph Norris. *Shreve's Chemical Process Industries*. New York: McGraw-Hill, 1984. 859p. SORLIE, M., OYE, H. A. Cathodes in aluminium electrolysis. Dusseldorf, Germany: Aluminium-Verlag Publishers, 1989. 294p.

SILVA, Darllan Collins da Cunha. **Estudo sobre a vulnerabilidade sócio-ambiental no município de Alumínio, São Paulo, a partir da poluição do ar**. 2010.

SUSTAINABILITY. About sustainability. London, 2008. Disponível em:

<<http://www.sustainability.com.br>>. acesso em: 18 de jun. de 2022.