



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas . Unifal-MG
Campus Poços de Caldas



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

GUILHERME JOB ZANI
NICOLAS LERIONE N. DA S. NASCIMENTO

**PEGADA DE CARBONO E ECONOMIA CIRCULAR: AVALIAÇÃO DO CICLO DE
VIDA DO ALUMÍNIO NO BRASIL**

POÇOS DE CALDAS - MG

2025

**GUILHERME JOB ZANI
NICOLAS LERIONE N. DA S. NASCIMENTO**

**PEGADA DE CARBONO E ECONOMIA CIRCULAR: AVALIAÇÃO DO CICLO DE
VIDA DO ALUMÍNIO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientadora: Profa Dra. Giselle Patrícia Sancinetti

POÇOS DE CALDAS - MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Job Zani, Guilherme .
PEGADA DE CARBONO E ECONOMIA CIRCULAR : AVALIAÇÃO DO CICLO
DE VIDA DO ALUMÍNIO NO BRASIL / Guilherme Job Zani, Nicolas Lerione N.
da S. Nascimento. - Poços de Caldas, MG, 2025.
52 f. : il. -

Orientador(a): Giselle Patricia Sancinetti.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.
Bibliografia.

1. Sustentabilidade. 2. Alumínio secundário. 3. Descarbonização. 4.
Reciclagem . 5. Economia circular. I. Lerione N. da S. Nascimento, Nicolas .
II. Patricia Sancinetti, Giselle , orient. III. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

**GUILHERME JOB ZANI
NICOLAS LERIONE N. DA S. NASCIMENTO**

**PEGADA DE CARBONO E ECONOMIA CIRCULAR: AVALIAÇÃO DO CICLO DE
VIDA DO ALUMÍNIO NO BRASIL**

A presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 08 de dezembro de 2025

Profa Dra. Giselle Patrícia Sancinetti

Assinatura:

Profa Dra. Alessandra Regina Pepe Ambrozin

Assinatura:

Prof Dr. Marcos Vinícius Rodrigues

Assinatura:

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) teve como objetivo geral avaliar o ciclo de vida do alumínio no Brasil, identificando a contribuição da produção primária e da reciclagem para a pegada de carbono, de modo a evidenciar oportunidades de sustentabilidade alinhadas à economia circular. O tema se justifica pela relevância estratégica do alumínio, um metal infinitamente reciclável, e pela necessidade de mitigar os impactos ambientais da sua produção, especialmente em um país com a singularidade da matriz energética brasileira e a liderança global em reciclagem de latas. A metodologia empregada consistiu em uma revisão bibliográfica sistemática e análise documental, explorando os fundamentos teóricos de Gases de Efeito Estufa (GEE), Pegada de Carbono, Economia Circular e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), além de detalhar o histórico e o perfil da indústria do alumínio no Brasil. Os resultados da análise comparativa demonstram que, embora a produção de alumínio primário no Brasil já possua uma das menores pegadas de carbono do mundo devido à predominância da matriz energética hidrelétrica, a produção de alumínio secundário (reciclado) se estabelece como a rota mais eficaz de descarbonização, consumindo apenas cerca de 5% da energia e evitando uma proporção similar de emissões de GEE em comparação com a produção primária. A discussão da literatura aponta para a necessidade de expandir a circularidade para ligas complexas e produtos de vida útil longa, além de superar desafios como a gestão da lama vermelha e a limitação de dados nacionais para a ACV. Conclui-se que a maximização da reciclagem e a adoção de uma perspectiva de ciclo de vida são cruciais para fortalecer a competitividade da indústria nacional e posicionar o Brasil como um modelo na transição para uma economia de baixo carbono no setor de alumínio.

Palavras-chaves: sustentabilidade; alumínio secundário; descarbonização; reciclagem do alumínio.

ABSTRACT

This Final course project had the general objective of evaluating the life cycle of aluminum in Brazil, identifying the contribution of primary production and recycling to the carbon footprint, in order to highlight sustainability opportunities aligned with the circular economy. The research is justified by the strategic relevance of aluminum, an infinitely recyclable metal, and the need to mitigate the environmental impacts of its production, especially in a country with the unique characteristics of the Brazilian energy matrix and global leadership in can recycling. The methodology employed consisted of a systematic literature review and documentary analysis, exploring the theoretical foundations of Greenhouse Gases (GHG), Carbon Footprint, Circular Economy, and Life Cycle Assessment (LCA), in addition to detailing the history and profile of the aluminum industry in Brazil. The comparative analysis results demonstrate that, although primary aluminum production in Brazil already has one of the lowest carbon footprints in the world due to the predominance of the hydroelectric energy matrix, secondary aluminum production (recycled) is established as the most effective decarbonization route, consuming only about 5% of the energy and avoiding a similar proportion of GHG emissions compared to primary production. The literature discussion points to the need to expand circularity to complex alloys and long-life products, in addition to overcoming challenges such as red mud management and the limitation of national data for LCA. It is concluded that maximizing recycling and adopting a life cycle perspective are crucial to strengthening the competitiveness of the national industry and positioning Brazil as a model in the transition to a low-carbon economy in the aluminum sector.

Keywords: sustainability; secondary aluminum; decarbonization; recycling aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo do sistema circular de produção para o ciclo técnico	21
Figura 2 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida.....	22
Figura 3 - Produção de Alumínio Primário -2024/2023	25
Figura 4 - Produção de bauxita no Brasil em 2020	27
Figura 5 - Produção da Alumina no Brasil em 2020	28
Figura 6 - Regiões com potencial Geológico para acumulação de bauxita	29
Figura 7 - Fluxograma típico de uma refinaria de alumina	30
Figura 8 - Fluxograma Apresentando o Processo Hall-Hérault	32
Figura 9 - Lagoa da disposição da lama vermelha da Alumar (Ilha de São Luís - Maranhão).....	34
Figura 10 - Ciclo de reciclagem do Alumínio	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Etapas de cálculo da Pegada de Carbono	19
Quadro 2 – Empresas do setor brasileiro de alumínio.....	26
Quadro 3 - Comparativo de Impacto: Produção Primária vs. Secundária de Alumínio	40

LISTA DE SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CO2e	Dióxido de Carbono Equivalente
EC	Economia Circular
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESG	Environmental, Social and Governance
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Global Warming Potential
IAI	International Aluminum Institute
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Initiative
MDIC	Ministério do Desenv., Ind., Com. e Serviços
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MRN	Mineração Rio do Norte
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNEP	United Nations Environment Programme
VFV	Veículos em Fim de Vida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVOS GERAIS	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 METODOLOGIA	14
3.1 COLETA DE DADOS E FONTE	14
3.2 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E ANÁLISE	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1 GASES DE EFEITO ESTUFA	16
4.1.1 Pegada de carbono	16
4.1.2 Fronteiras e escopos da emissões de GEE	17
4.1.3 Cálculo da pegada de carbono	18
4.2 ECONOMIA CIRCULAR	20
4.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	21
4.3.1 Métodos para a ACV de um produto	23
4.4. HISTÓRICO DO ALUMÍNIO NO BRASIL	23
4.4.1 Perfil da indústria do alumínio no Brasil e no mundo	24
4.4.2 Matriz energética e emissões	28
4.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO ALUMÍNIO NO BRASIL	29
4.5.1 Obtenção do alumínio	29
4.5.1.1 Mineração	29
4.5.1.2 Refinaria	30
4.5.1.3 Redução	31
4.5.2 Impacto ambiental	32
4.5.2.1 Relação entre alumínio primário e secundario	34
4.5.3 Impacto econômico	35
4.6 PEGADA DE CARBONO DO ALUMÍNIO NO BRASIL	35
4.6.2 Pegada de carbono do alumínio primário	36
4.6.3 Pegada de carbono do alumínio secundário	36
4.7 ECONOMIA CIRCULAR E O ALUMÍNIO NO BRASIL	37
5 DISCUSSÕES DA LITERATURA	39
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA	39
5.2 CENÁRIO BRASILEIRO	40
5.3 ECONOMIA CIRCULAR E POLÍTICAS PÚBLICAS	41
5.4 ANÁLISE CRÍTICA DAS METODOLOGIAS DE PEGADA DE CARBONO	42
5.5 TENDÊNCIAS E OPORTUNIDADES	43
5.6 SÍNTESE FINAL DA DISCUSSÃO	44
6 CONCLUSÃO	45
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	46

REFERÊNCIAS.....	47
------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais utilizados no mundo contemporâneo devido às suas propriedades únicas, como leveza, resistência mecânica, alta condutividade elétrica e térmica, além de ser infinitamente reciclável sem perda significativa de qualidade (Associação Brasileira do Alumínio, 2023). Essas características explicam sua ampla aplicação em setores estratégicos, como transporte, construção civil, embalagens e eletrônicos. No Brasil, o setor do alumínio possui papel de destaque na economia, sendo o país reconhecido como um dos líderes mundiais em reciclagem, especialmente de latas de alumínio para bebidas, alcançando índices que frequentemente superam 97% (Abralatas, 2022).

Entretanto, a produção primária do alumínio, obtida a partir da extração da bauxita e subsequente transformação em alumina e alumínio metálico, é um processo com alto consumo de energia elétrica (International Aluminum Institute, 2023). Estima-se que a produção primária consuma em média 14 MWh por tonelada de alumínio produzido, o que contribui significativamente para sua pegada de carbono. Além disso, o processo gera resíduos como a "lama vermelha", cujo armazenamento e tratamento representam um dos maiores desafios ambientais da indústria (Schlesinger *et al.*, 2011).

Por outro lado, a produção secundária, baseada na reciclagem de sucata de alumínio, demanda apenas cerca de 5% da energia necessária para a produção primária, resultando em uma redução proporcional nas emissões de GEE (United Nations Environment Programme, 2021). Esse diferencial evidencia o papel central da reciclagem na transição para uma economia de baixo carbono, alinhada aos princípios da economia circular, que preconiza a otimização do uso de recursos e a minimização da geração de resíduos (Ellen Macarthur Foundation, 2019). A reciclagem, portanto, não apenas conserva energia, mas também reduz a necessidade de extração de matéria-prima e os impactos ambientais associados.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta fundamental para quantificar os impactos ambientais associados às diferentes rotas de produção do alumínio. Normas internacionais, como a ISO 14040 e ISO 14044, estabelecem as metodologias para a condução da ACV, permitindo comparar de maneira eficiente a pegada de carbono da produção primária com a da

secundária e identificar os pontos críticos para a otimização de processos ao longo da cadeia produtiva (Baumann; Tillman, 2004).

Portanto, o presente trabalho justifica-se pelo fato de que compreender o ciclo de vida do alumínio no Brasil é essencial não apenas para subsidiar políticas públicas de incentivo à reciclagem e à gestão de resíduos, mas também para orientar práticas empresariais mais sustentáveis. Dessa forma, é possível aumentar a competitividade da indústria nacional no mercado internacional, reduzindo custos operacionais e alinhando o setor às crescentes demandas globais por produtos com menor impacto ambiental, além de identificar oportunidades de redução de emissões e de aprimoramento com base nos princípios da economia circular.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar o ciclo de vida do alumínio no Brasil, identificando a contribuição da produção primária e da reciclagem para a pegada de carbono, de modo a evidenciar oportunidades de sustentabilidade alinhadas à economia circular.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar a literatura sobre fundamentos teóricos, métodos de avaliação e análise de impactos ambientais e os processos de produção primária e secundária do alumínio.
- Comparar o consumo energético e a pegada de carbono entre a produção primária e a reciclagem do alumínio no Brasil.
- Identificar os benefícios ambientais e econômicos decorrentes da reciclagem do alumínio, destacando seu papel na economia circular.
- Discutir os principais desafios e oportunidades para ampliar a circularidade do alumínio no contexto brasileiro

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa de natureza exploratória e descritiva, fundamentada em uma revisão bibliográfica sistemática e em análise documental. A abordagem metodológica foi qualitativa, visando compreender e comparar os impactos ambientais e as dinâmicas da cadeia produtiva do alumínio no Brasil.

3.1 COLETA DE DADOS E FONTE

O levantamento de dados priorizou fontes secundárias reconhecidas pela confiabilidade técnica e científica. As fontes consultadas foram divididas em três categorias principais:

- **Literatura Acadêmica:** Artigos científicos, teses e dissertações obtidos em bases de dados como Google Acadêmico, Scielo e ResearchGate, que forneceram o embasamento teórico sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Economia Circular e fundamentos dos processos químicos de produção do alumínio (Processo Bayer e Hall-Héroult).
- **Relatórios Setoriais e Governamentais:** Dados estatísticos de produção, reciclagem e consumo energético foram extraídos de relatórios anuais e anuários estatísticos de entidades como a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), o International Aluminium Institute (IAI) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
- **Documentos Técnicos e Normativos:** Foram consultadas normas técnicas (como a série ISO 14040 para ACV) e relatórios de sustentabilidade de empresas atuantes no setor (como Alcoa, CBA e Hydro) para identificar práticas de mercado e metas de descarbonização.

3.2 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E ANÁLISE

As buscas foram orientadas por palavras-chave em português e inglês, incluindo: "Pegada de Carbono do Alumínio", "Economia Circular", "Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)", "Reciclagem de Alumínio", "Processo Bayer" e "Processo Hall-Héroult". A pesquisa priorizou dados e publicações dos últimos 10 anos (2015–2025)

para garantir dados atualizados, sem excluir obras clássicas fundamentais para a descrição dos processos e conceitos importantes. A análise dos dados foi realizada de forma comparativa, confrontando as informações da rota produtiva primária com a rota secundária. Foram avaliados indicadores críticos como o consumo energético e as emissões de Gases de Efeito Estufa, além dos impactos ambientais associados à gestão de resíduos, como a lama vermelha.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 GASES DE EFEITO ESTUFA

Os gases de efeito estufa (GEE) são compostos atmosféricos capazes de absorver e reemitir radiação infravermelha, contribuindo para o aquecimento global e para as mudanças climáticas. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), os principais GEE associados às atividades humanas são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), os gases fluorados e o vapor d'água, sendo os três primeiros os mais relevantes em termos de impacto climático (IPCC, 2021).

O CO_2 é o gás mais emitido globalmente, decorrente sobretudo da queima de combustíveis fósseis e processos industriais, representando aproximadamente 76% do total das emissões antropogênicas (IPCC, 2021). O metano (CH_4) possui menor concentração atmosférica, mas apresenta potencial de aquecimento global (GWP – Global Warming Potential) 28 vezes maior que o CO_2 em um horizonte de 100 anos, sendo emitido principalmente por atividades agropecuárias, resíduos sólidos e mineração (UNEP, 2021). Já o N_2O possui GWP ainda mais elevado 265 vezes superior ao CO_2 com forte relação às práticas agrícolas, especialmente ao uso de fertilizantes nitrogenados (IPCC, 2021).

4.1.1 Pegada de carbono

A emissão de dióxido de carbono na atmosfera é determinante para alterações climáticas, pois esse composto químico é um dos responsáveis pelo efeito estufa. Diante disso, instrumentos foram criados com o intuito de diminuir as emissões de gás carbônico e, com isso, mitigar os danos causados pela ação antrópica nos ecossistemas. Uma dessas ferramentas é a chamada pegada de carbono, método que pode ser utilizado pelo poder público, empresas e sociedade civil para a melhoria da qualidade ambiental (Braz; Silva, 2020).

Apesar da relevância e da atualidade do tema, ainda não existe uma definição clara do termo, o que gera alguma confusão no que realmente significa e o que mede. Segundo a Carbon Footprint (s.d.), a pegada de carbono se refere ao total de

emissões de gases de efeito estufa (GEE) causadas por um indivíduo, evento, organização, serviço, local ou produto, expresso em dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

A fim de gerenciar e, obrigatoriamente, reduzir as emissões de GEE, pode-se fazer uso dessa ferramenta de avaliação e gerenciamento também nas empresas. Após o cálculo ser realizado, os pontos fracos a serem eliminados ou melhorados são identificados e a empresa age para mitigá-los. Sua aplicação também é adaptável para funcionar como um importante indicador de desenvolvimento sustentável (Radu; Scricciu; Caracota, 2013).

Dzematyi e Ramos (2019) argumentam que a pegada de carbono pode ser encarada de duas maneiras: primeiramente, a pegada de carbono de um produto, na qual o rótulo de carbono é definido pela quantidade total de GEE emitidos ao longo de todo ciclo de vida do produto. A origem dessas emissões pode estar na produção, no transporte, no consumo final, na eliminação de resíduos, entre outros; a segunda maneira é a pegada de carbono de uma empresa, que também avalia as emissões de GEE, mas no estágio da produção.

Com base nessa distinção, o presente trabalho concentra-se na primeira abordagem, ou seja, na avaliação da pegada de carbono do produto (alumínio).

4.1.2 Fronteiras e escopos da emissões de GEE

Segundo Frutuoso (2024), a avaliação da pegada de carbono requer a definição de fronteiras para abranger as operações diretas da organização, englobando as emissões de instalações próprias. Essa delimitação possibilita uma análise mais precisa das fontes controladas pela organização que contribuem para as emissões de GEE.

As emissões de GEE de Escopo 1 são emissões diretas, liberadas no ambiente como resultado das atividades diretas da organização, como o consumo de combustíveis fósseis. As emissões de Escopo 2 são emissões indiretas de GEE associadas ao consumo de eletricidade e outras formas de energia (Topcheva, 2023).

Ao aplicar a ACV a um produto ou serviço, a análise da pegada de carbono se torna mais completa. Esse conceito avalia as emissões “do berço ao caixão”, examinando todas as etapas que geram impactos ao longo do ciclo de vida. Isso é

fundamental para orientar práticas sustentáveis tanto no desenvolvimento quanto no uso do produto ou serviço (Roy *et al.*, 2009).

O Escopo 3 amplia a avaliação para além das fronteiras organizacionais, incorporando emissões indiretas que ocorrem ao longo da cadeia de abastecimento, quer a jusante quer a montante, que não são abrangidas no Escopo 2. Esta análise mais abrangente proporciona uma visão holística e responsável do impacto ambiental associado a todas as atividades da organização (Topcheva, 2023).

4.1.3 Cálculo da pegada de carbono

No cálculo da pegada de carbono, a unidade mais utilizada é o CO₂e, que é determinada recorrendo ao potencial de aquecimento global (GWP), um índice utilizado para medir a quantidade de radiação térmica infravermelha um gás do efeito estufa (GEE) absorveria durante um determinado período de tempo após ter sido adicionado na atmosfera. Este indicador é frequentemente aplicado na ACV para indicar potenciais impactos nas alterações climáticas (Baumann; Tilman, 2004).

Relacionando com a pegada de carbono, o LCA (Life Cycle Assessment) calcula os GEE emitidos em cada etapa do ciclo de vida do produto. Contudo, cada fase do ciclo de vida de um produto ou evento pode estar relacionada a outras fases, as quais ainda podem estar conectadas a outras fases e assim sucessivamente, o que pode tornar complexa a avaliação (Pandey *et al.*, 2011).

O processo de cálculo da pegada de carbono pode ser feito através das principais etapas ilustradas na Tabela 1, que representam um fluxo de trabalho para a análise da pegada de carbono, desde a identificação das fontes de emissões de GEE, passando pela quantificação das fontes e das emissões, até ao relatório final. Cada uma destas etapas possibilita que a pegada de carbono seja calculada e documentada, abordando tanto as emissões diretas (Escopo 1) como as indiretas (Escopos 2 e 3) (Mohan *et al.*, 2021).

No âmbito empresarial, especialmente em relação aos setores de aço, alimentos, alumínio, cimento, tecidos, químicos e vidros, destaca-se o Sistema ABNT de Medição e Certificação da Pegada de Carbono de Produtos. Esse sistema tem como finalidade permitir às organizações interessadas compilar e avaliar as entradas, saídas, e os potenciais impactos de GEE do processo produtivo ao longo do ciclo de vida de um determinado produto. Além de fornecer os requisitos e orientações para a

quantificação e comunicação da pegada de carbono de um produto e estabelecer a sistemática para concessão e manutenção da certificação de pegada de carbono de produtos. O Quadro 1 apresenta as etapas de cálculo da pegada de carbono

Quadro 1 - Etapas de cálculo da Pegada de Carbono

1 – Identificação	<ul style="list-style-type: none"> • Rastreamento das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE); • Definição do limite do sistema para a análise da pegada de carbono; • Identificação das emissões dos Escopos 1, 2 e 3.
2 – Quantificação da Fonte	<ul style="list-style-type: none"> Desenvolvimento do inventário para o uso de combustível no local; • Quantificação do uso de eletricidade nas operações da planta; • Contabilização do transporte veicular total, considerando tipo de veículo e distância percorrida; • Quantificação das emissões de metano provenientes do tratamento biológico; • Contabilização de possíveis emissões de metano do descarte de efluentes parcialmente tratados.
3 – Quantificação da Emissão	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação de fatores de emissão para cada tipo de combustível utilizado; • Uso do fator de emissão específico do país para eletricidade; • Quantificação das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O provenientes do transporte veicular.
4 – Relatório Final	<ul style="list-style-type: none"> • Conversão das emissões de CH₄ e N₂O para CO₂ equivalente; • Cálculo da emissão total em toneladas de CO₂e em horizonte de 100 anos; • Definição clara do limite do sistema e listagem de todas as premissas adotadas.

Fonte: - adaptado (Mohan *et al.*, 2021).

4.2 ECONOMIA CIRCULAR

Os recursos materiais e energéticos utilizados hoje em dia nas indústrias são finitos e estão cada vez mais ameaçados de se esgotarem, principalmente devido ao modelo linear de negócios, resultando no aumento do preço e na volatilidade das commodities e insumos. Dessa forma, a instabilidade gerada no mercado fez com que surgisse um novo modelo econômico, a economia circular, que aborda uma nova maneira de utilizar matérias primas e energia (Ellen Macarthur Foundation 2015; Leitão, 2015)

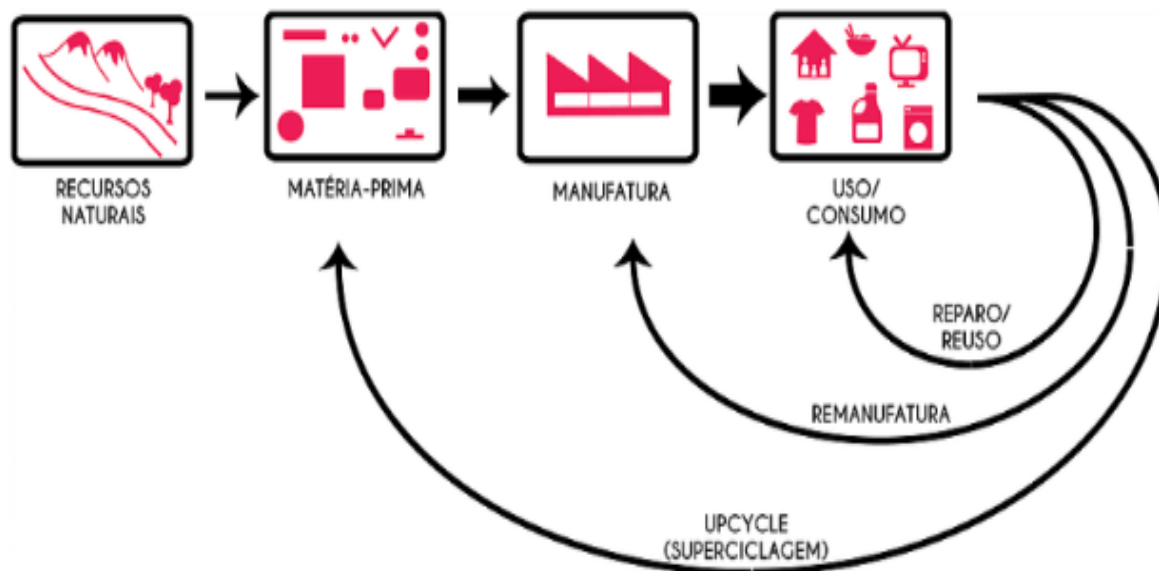
O conceito de Economia Circular, enquanto proposta inovadora de implementação de um sistema de processo produtivo, propõe modificações estruturais significativas e surge como um novo modelo para contradizer o sistema usual da Economia Linear. Este último, já consolidado por suas práticas e aplicabilidades disseminadas na maioria dos países e que são definidas pelo paradigma de “ciclo fechado”: extrair-produzir-descartar (Abdalla; Sampaio, 2018).

A Economia Circular visa, portanto, possibilitar o aproveitamento e reaproveitamento sistemático de produtos industrializados, bens duráveis e não-duráveis, desde a etapa de concepção de projeto, até mesmo após a sua reutilização (ciclo de vida útil) (Abdalla; Sampaio, 2018).

Assim sendo, a economia circular é um modelo econômico, que propõe novas oportunidades de negócios, trabalho colaborativo, preservação e aumento do capital natural, além de contribuições significativas para a sustentabilidade social, econômica e ambiental. A Economia Circular ultrapassa o âmbito e foco estrito das ações de gestão de resíduos e de reciclagem, visando uma ação mais ampla, “circulando” o mais eficientemente possível produtos, componentes e materiais nos ciclos técnicos e/ou biológicos (Monteiro, 2018).

Para Ellen MacArthur Foundation (2015), a economia circular busca a separação do desenvolvimento econômico do consumo de recursos finitos. Esse modelo está diretamente relacionado ao crescimento, à criação de empregos e à redução dos impactos ambientais. A Figura 1 apresenta um modelo de sistema circular de produção.

Figura 1 - Modelo do sistema circular de produção para o ciclo técnico



Fonte: Ideia Circular (2015).

4.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é conhecida internacionalmente por LCA (Life Cycle Assessment), consistindo num instrumento de avaliação do impacto ambiental associado a um produto ou processo que compreende etapas que vão desde a retirada das matérias-primas elementares da natureza, que entram no sistema produtivo (berço), à disposição do produto final após o uso (túmulo) (Chehebe, 1998).

A ACV é considerada um método sistemático para avaliar os encargos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, identificando e quantificando a energia e os materiais consumidos e os resíduos liberados para o meio ambiente (Tan; Khoo, 2005).

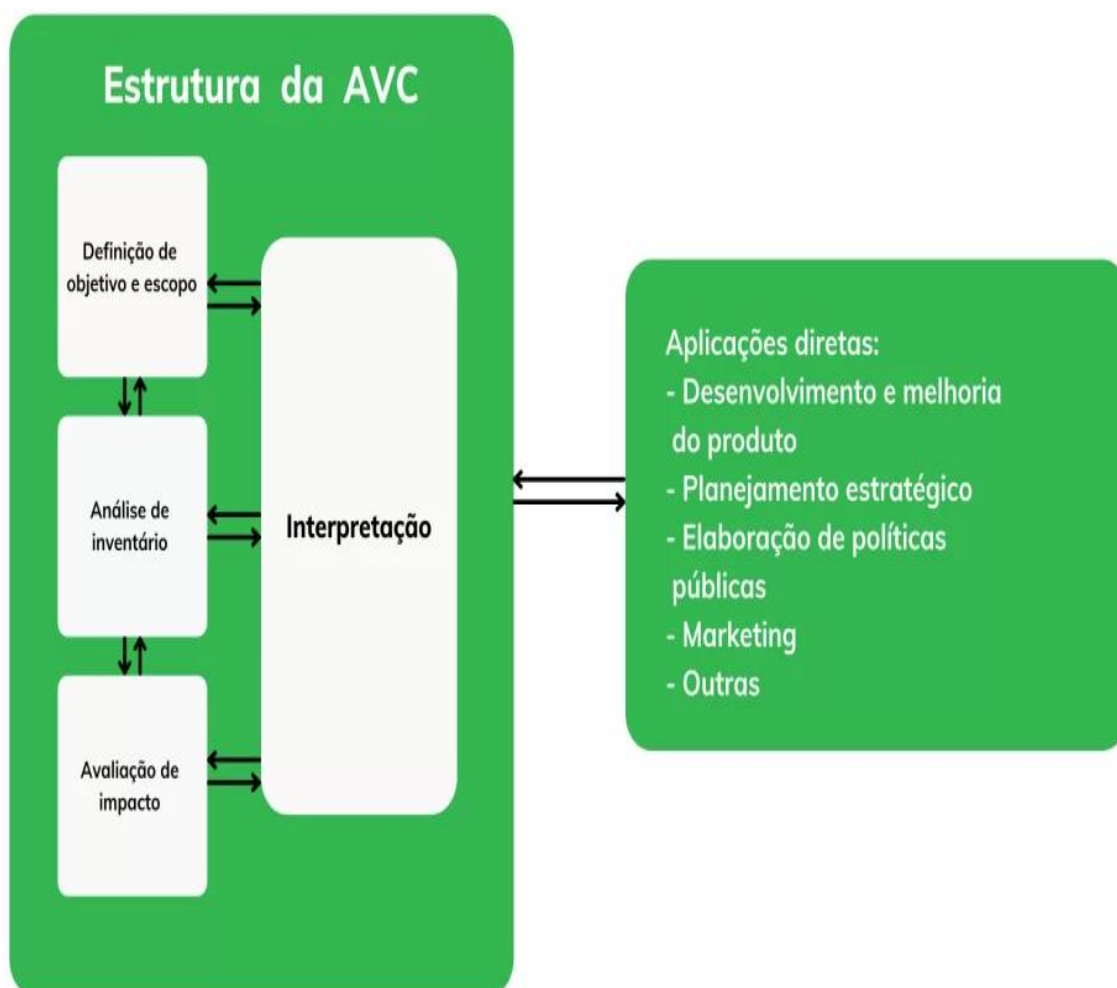
Para TAN e KHOO (2005), um estudo completo de ACV envolve quatro etapas: definição de objetivo e escopo; inventário do ciclo de vida (coleta de dados); avaliação de impacto ambiental e, por fim, interpretação (incluindo recomendações). Segundo a ABNT NBR ISO 14040 (2014, p. 2), a ACV pode ser definida como “Compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”.

Conforme a empresa Valle (2002), o processo de ACV deve avaliar não só os impactos ambientais causados, mas também as oportunidades de melhorias que

deveriam ser realizadas para reduzi-los. Sendo assim, esta análise deve considerar: o consumo de matérias-primas, seus processos de extração e produção; o processo de fabricação dos materiais utilizados na fabricação do produto; todo processamento de materiais até chegar ao produto final; utilização do produto durante sua vida útil; e reciclagem, tratamento e a disposição dos materiais resultantes do produto descartado.

Além disto, o *United Nation Environmental Program* (Unep) e a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (Setac) lançaram uma Parceria Internacional de Ciclo de Vida, batizada como *Life Cycle Initiative* (LCI), ou Iniciativa Ciclo de Vida, com o objetivo de viabilizar a prática efetiva do *life cycle thinking*. A Figura 2 a seguir apresenta as quatro fases da avaliação do ciclo de vida de um produto.

Figura 2 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: Recicla Club (2021).

4.3.1 Métodos para a ACV de um produto

Há no mercado, atualmente, diversos tipos de *softwares* específicos para a realização de ACVs, os quais trabalham com bancos de dados e possuem informações referentes a diversos processos produtivos. Esses bancos de dados são escolhidos pelo usuário para elaborar um sistema de produto relacionado às respectivas categorias de impacto ambiental. Depois de efetuados os cálculos por meio de modelos de caracterização, os valores de impacto ambiental do produto de cada uma das categorias escolhidas são apresentados pelo *software* (Enciclo, 2015).

Segundo Herrmann e Moltesen (2015), SimaPro e GaBi são as principais ferramentas de *software* usadas para avaliações de ciclo de vida. Esses *softwares* utilizam avaliações de sistemas de produtos que aplicam exatamente a mesma base de processo unitário e devem render conjuntos de resultados comparáveis com qualquer ferramenta.

4.4. HISTÓRICO DO ALUMÍNIO NO BRASIL

A história da indústria do alumínio no Brasil surgiu na segunda década do século XX. As primeiras toneladas do metal foram produzidas em 1945, graças às iniciativas do empreendedor Américo Giannetti, na Eletro Química Brasileira S/A – Elquisa, primeira indústria de alumínio primário do Brasil, e que foi construída em Saramenha, no município de Ouro Preto, Minas Gerais (ABAL, 2020).

Contudo, a consolidação da indústria de alumínio no Brasil só ocorreu com a chegada, no país, da ALCAN Aluminium LTDA, em 1940, quando fundou a Alumínio do Brasil S.A. – Alubrasil em São Paulo. Em 1950, a Alcan comprou a Elquisa e, em 1951, iniciou a produção regular em Minas Gerais (Observatório Social, 2002).

Outro marco importante nesse cenário foi a entrada em operação da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), empresa ligada ao grupo Votorantim, implantada no município de Alumínio, em São Paulo, e que se destaca como única empresa de produção de alumínio primário de capital exclusivamente nacional até os dias de hoje. A Alcan e a CBA dominaram o mercado de alumínio primário até 1970, quando entrou em operação uma fábrica da Aluminum Company of America (Alcoa), no município de Poços de Caldas, Minas Gerais (Costa, 2022a).

Em 1983, o Brasil passou de grande importador de alumínio a um dos principais exportadores mundiais, graças aos contínuos investimentos das empresas do setor. Três anos depois, o país tornou-se o quinto produtor mundial de alumínio primário. Esses são apenas alguns dos resultados da união dos produtores primários e transformados em torno do foro que na década de 70 levou à fundação da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) para discutir e conciliar os interesses comuns, com representação junto ao governo e à comunidade (Costa, 2022a).

4.4.1 Perfil da indústria do alumínio no Brasil e no mundo

Conforme os dados disponibilizados no Anuário Estatístico da ABAL (2024) e monitoramento setorial recente, o Brasil se mantém como o terceiro maior produtor de alumina do mundo, atrás apenas da China e da Austrália. Na produção de bauxita, o país ocupa a quarta posição global, precedido por Austrália, Guiné e China. Já na produção de alumínio primário, o Brasil apresentou uma recuperação expressiva e alcançou a nona posição no ranking mundial em 2024, com uma produção de 1,1 milhão de toneladas, sendo precedido por países como China, Índia, Rússia, Canadá, Emirados Árabes Unidos, Austrália, Bahrein e Noruega.

Segundo estatísticas da *International Aluminum Institute* (2024), o Brasil produziu 626 mil toneladas de alumínio primário, como apresentado na Figura 3, um número 5% maior do que em 2023, quando produziu 596 milhões.

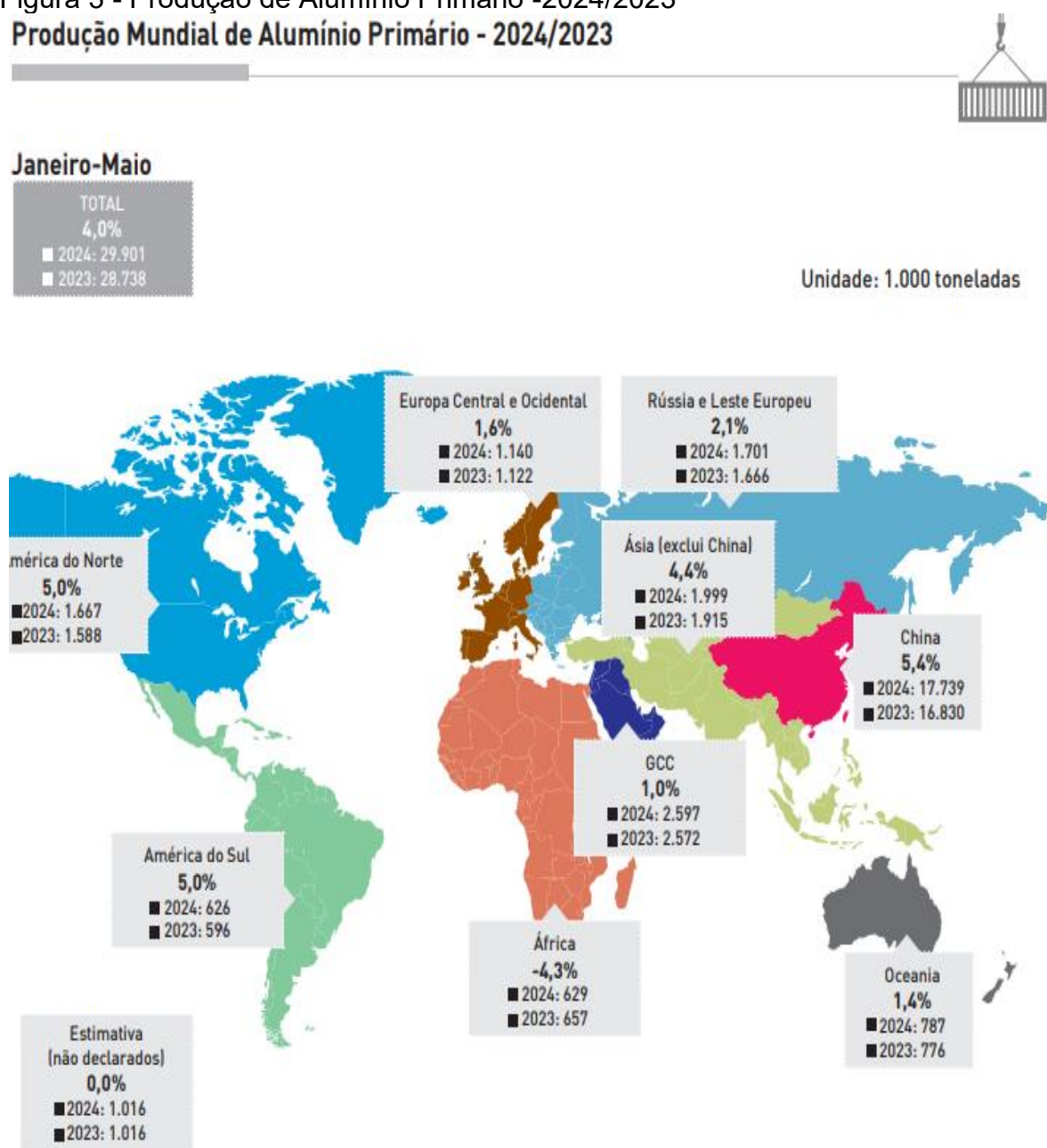
Segundo o 54º Anuário Estatístico da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2024, *apud* Revista Alumínio, 2025), o faturamento do setor alcançou a marca de R\$159,3 bilhões no ano de 2024, um crescimento de 21,2% em relação a 2023. E o destaque ficou por conta do consumo de produtos transformados, que atingiu um recorde histórico em 2024, totalizando 1,9 milhões de toneladas, aumentando 13,5% quando comparado ao ano anterior, impulsionado pela demanda aquecida em setores como embalagens, construção civil, transportes e eletricidade.

Os resultados positivos também se refletem nos investimentos brutos do setor, que apresentaram expressivo crescimento, alcançando R\$6,4 bilhões e ultrapassando os R\$5,5 bilhões registrados no ano anterior (ABAL, 2024, *apud* Revista Alumínio, 2025).

Além disso, a importância do alumínio para a economia brasileira ficou ainda mais evidente em 2024, pois a participação do setor no Produto Interno Bruto (PIB) do país alcançou 1,4%, chegando a 6,4% do PIB Industrial (Revista Alumínio, 2025).

A indústria também contribuiu significativamente para os cofres públicos, com R\$53,8 bilhões em impostos pagos, um aumento de 37,6% em relação a 2023. No campo social, o setor gerou 141 mil empregos diretos em 2024, representando um crescimento de 3,4% perante o ano anterior (Revista Alumínio, 2025).

Figura 3 - Produção de Alumínio Primário -2024/2023
Produção Mundial de Alumínio Primário - 2024/2023



Fonte: IAI (2024).

O Quadro 2 apresenta as maiores empresas do setor brasileiro de alumínio, considerando a mineração, o refino de alumina e a produção de alumínio primário em 2019.

Quadro 2 – Empresas do setor brasileiro de alumínio em 2019

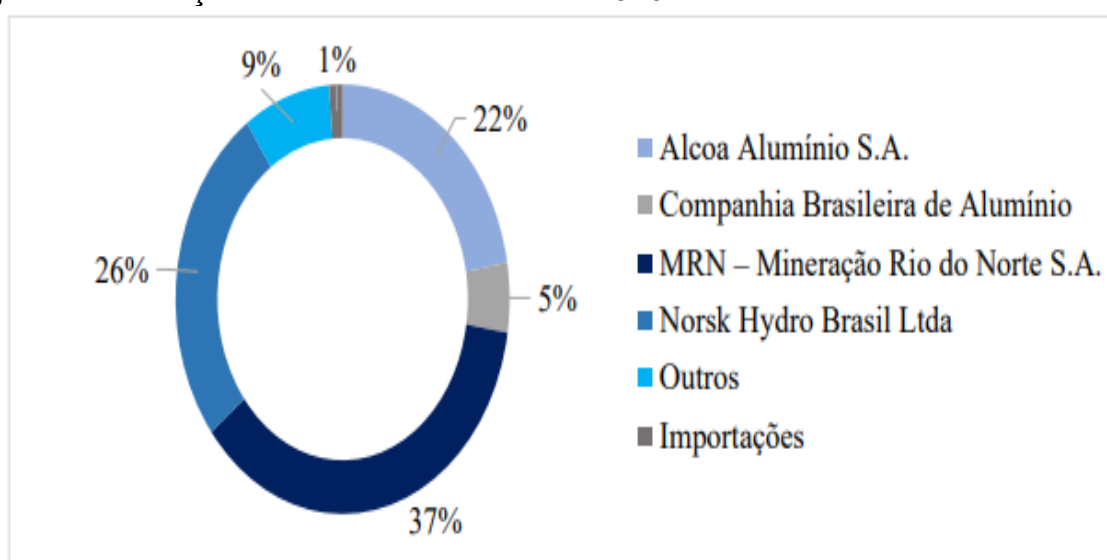
Empresa	Segmento	Localização	Produção (10³ toneladas)
Albras	Alumínio primário	Barcarena – PA	326,6
Companhia Brasileira de Alumínio – CBA	Alumínio primário	Alumínio – SP	323,6
Alcan Alumina Ltda.	Alumina	São Luís – MA	387,2
Alcoa Alumínio S.A.	Alumina	Poços de Caldas – MG e São Luís – MA	2.147,80
Companhia Brasileira de Alumínio	Alumina	Alumínio – SP	702,5
Norsk Hydro Brasil Ltda. Alunorte – Alumina do Norte do Brasil S.A.	Alumina	Barcarena – PA	4.530,10
South32 Minerals S.A.	Alumina	São Luís – MA	1.321,80
Hindalco do Brasil	Alumina	Ouro Preto – MG	101,4
Alcoa Alumínio S.A.	Bauxita	Poços de Caldas – MG e Juruti – PA	7.444,70
Companhia Brasileira de Alumínio	Bauxita	Poços de Caldas – MG, Miraf – MG, Itamarati – MG e Barro Alto – GO	2.114,90
MRN – Mineração do Rio do Norte S.A.	Bauxita	Oriximiná e Terra Santa – PA	12.173,10
Norsk Hydro Brasil Ltda. – Mineração Paragominas S.A.	Bauxita	Paragominas – PA	7.360,20
Mineração Curimbaba, Bauminas Mineração, Terra Goyana Mineradora, Mineração Varginha e Hindalco do Brasil	Bauxita	Poços de Caldas – MG; Miraf – MG, Cataguases – MG, Palmeira – SC; Barro Alto – GO; Ouro Preto – MG	2.845,00

Fonte: ABAL (2020).

A Figura 4 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.

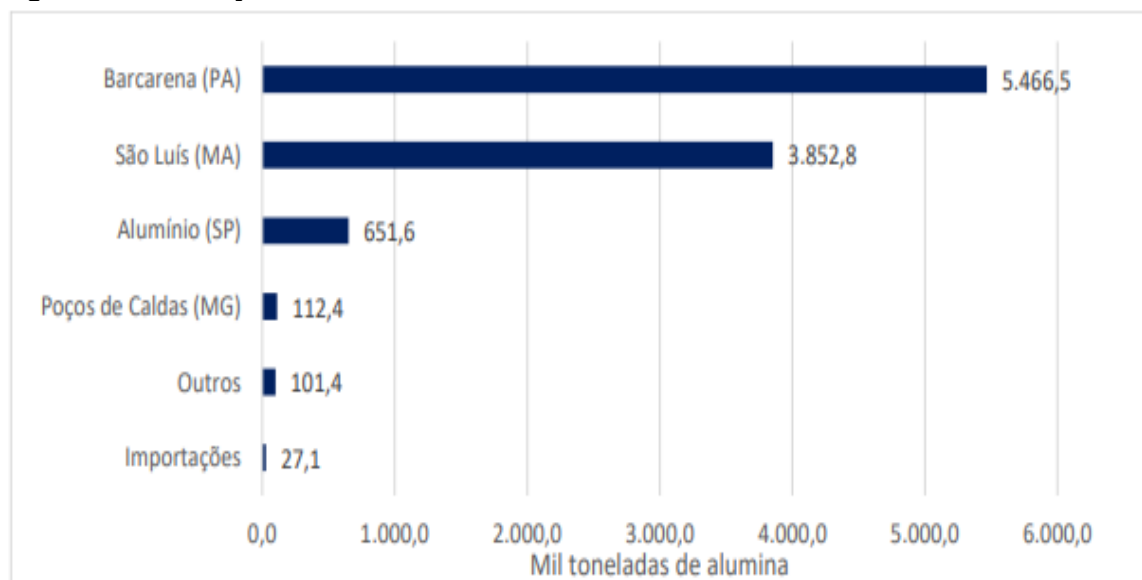
Figura 4 - Produção de bauxita no Brasil em 2020



Fonte: LOPES (2022).

Quanto à produção de alumina no Brasil para o ano de 2020, verifica-se, através da Figura 5, que a maior produção se deu na cidade 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.

Figura 5 - Produção da Alumina no Brasil em 2020



Fonte : LOPES (2022).

4.4.2 Matriz energética e emissões

A produção de alumínio primário é uma das mais intensivas em energia do setor industrial, sendo a etapa de eletrólise (processo Hall-Héroult) responsável pela maior parte do consumo energético da cadeia. Estima-se que, globalmente, a produção de uma tonelada de alumínio primário demande entre 13 e 15 MWh de eletricidade, o que corresponde a cerca de 1,5% do consumo elétrico mundial (IAI, 2023).

Observa-se que o setor de alumínio segue sendo um dos mais intensivos no consumo de eletricidade no país. Em 2021, a produção de produtos transformados de alumínio consumiu 4.302 GWh, o que corresponde a 2,4% do consumo total nacional de energia elétrica (EPE, 2021).

Por outro lado, a reciclagem de alumínio apresenta um enorme potencial de economia energética. A produção secundária consome cerca de 5% da energia necessária à produção primária, ou seja, uma economia superior a 90% no consumo elétrico e consequente redução proporcional das emissões de gases de efeito estufa (IAI, 2023). O Brasil possui uma posição privilegiada nesse contexto devido à sua matriz elétrica majoritariamente renovável, composta em grande parte por fontes hidrelétricas. Essa característica reduz substancialmente as emissões indiretas (Escopo 2) associadas à produção de alumínio primário, resultando em uma das menores pegadas de carbono do mundo cerca de 2,5 a 4 tCO₂e por tonelada de

alumínio, contra 12 a 15 tCO₂e/t observadas em países dependentes de carvão (ABAL, 2023; Hydro, 2023).

4.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO ALUMÍNIO NO BRASIL

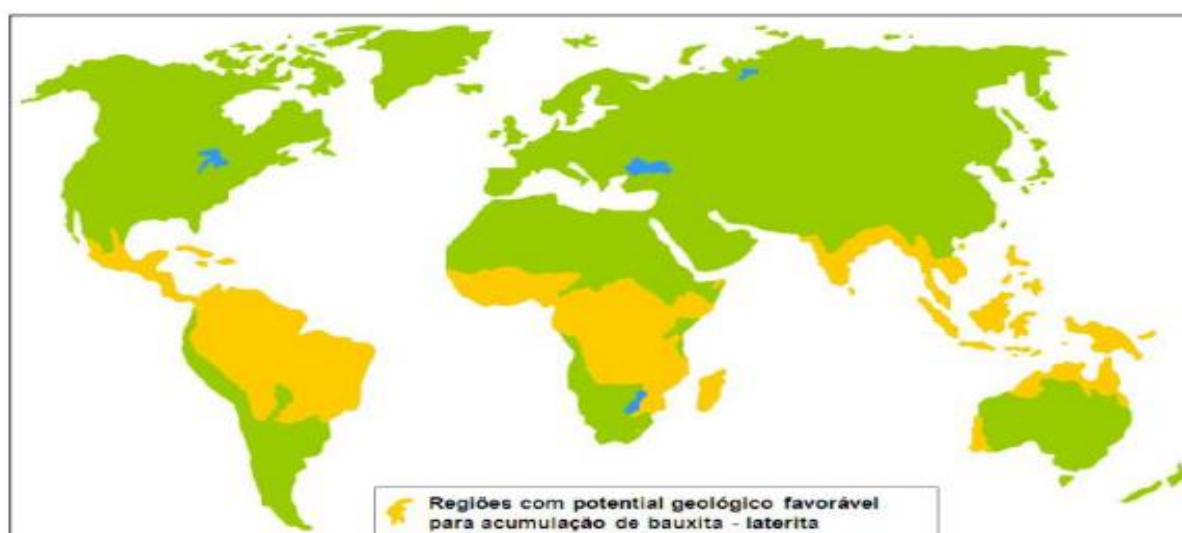
A avaliação do ciclo do alumínio no Brasil envolve entender todas as etapas de produção, uso, reciclagem e seus impactos econômicos e ambientais.

4.5.1 Obtenção do alumínio

4.5.1.1 Mineração

O alumínio é produzido a partir da bauxita, um minério presente principalmente em três zonas climáticas: Mediterrânea, Tropical e Subtropical. Para que a extração e o beneficiamento do alumínio sejam economicamente viáveis, a bauxita deve conter, no mínimo, 30% de óxido de alumínio (Al₂O₃) aproveitável. As reservas brasileiras de bauxita destacam-se não apenas pela elevada qualidade do minério, mas também por estarem entre as maiores do mundo (Microfund, s.d.). A Figura 6, mostra em amarelo, as regiões do mundo com maior potencial para acumulação de bauxita.

Figura 6 - Regiões com potencial Geológico para acumulação de bauxita



Fonte: Bardossy & Aleva (1990).

4.5.1.2 Refinaria

Trata-se de uma sequência de operações unitárias rigorosamente controladas, visando a eficiência na separação dos componentes de interesse dos materiais residuais, conforme a figura 7 (Pehlke, 1991).

A bauxita triturada é submetida a uma reação com uma solução concentrada de hidróxido de sódio em condições elevadas de temperatura e pressão. Esta etapa tem como objetivo a dissolução seletiva dos minerais de alumínio (gibbsita, boehmita e diásporo), formando aluminato de sódio solúvel). Impurezas como óxidos de ferro, sílica e titânio permanecem em estado sólido (Pehlke, 1991).

A polpa resultante é submetida a processos de decantação e filtração para a remoção dos resíduos sólidos insolúveis, denominados lama vermelha. Esta lama, devido ao seu caráter fortemente alcalino, representa um dos principais desafios ambientais da cadeia produtiva. A solução líquida, clarificada e rica em aluminato, é direcionada para a próxima fase (Pehlke, 1991).

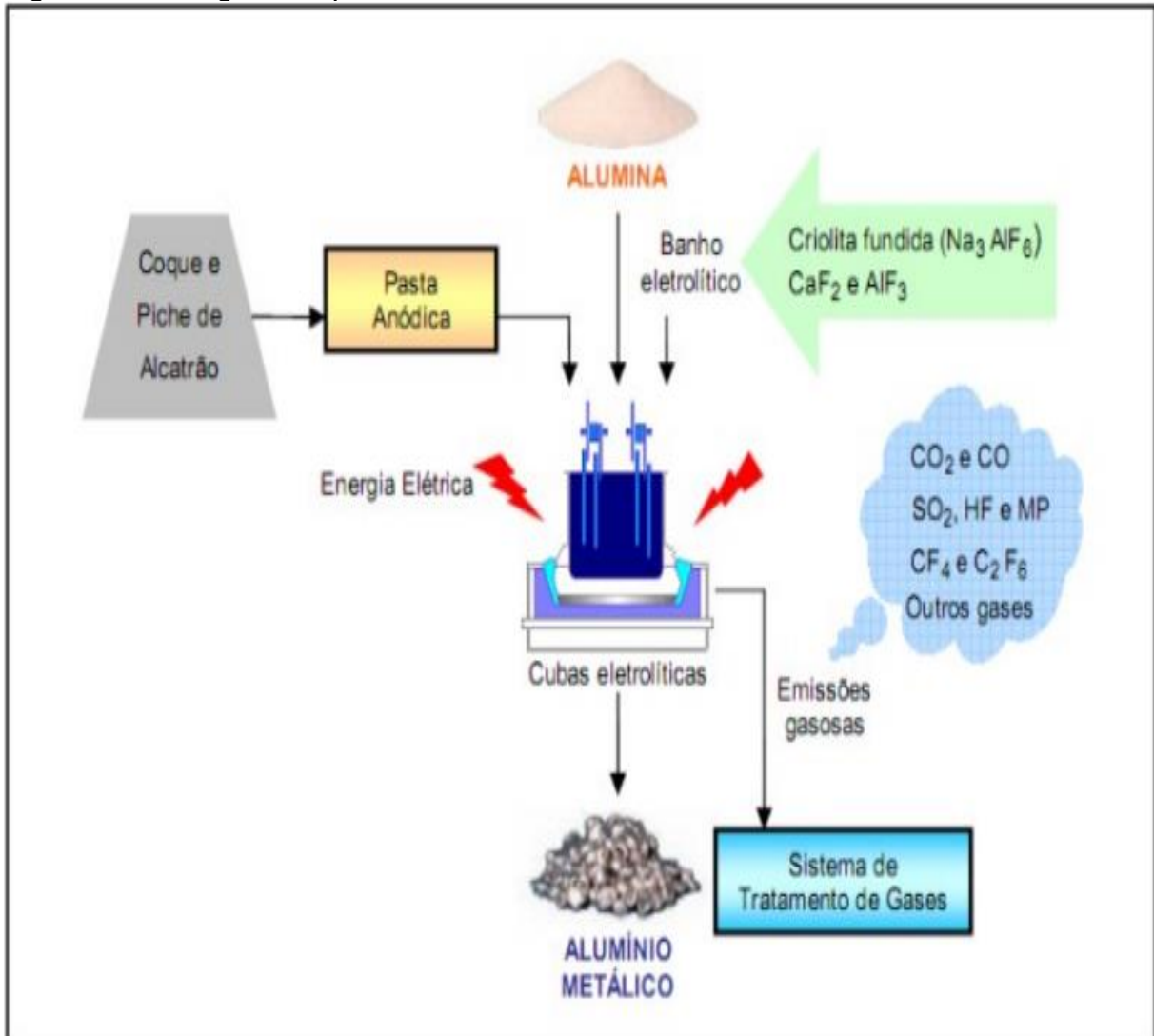
4.5.1.3 Redução

A redução do alumínio consiste no processo de obtenção do alumínio metálico a partir da alumina, ou óxido de alumínio (Al_2O_3) previamente purificado. Esse procedimento é realizado, predominantemente, por meio da eletrólise ígnea, técnica conhecida como Processo Hall-Héroult, conforme ilustrado na Figura 8 (Alves, 2017).

Inicialmente, a alumina é dissolvida em criolita fundida (Na_3AlF_6), que atua como solvente e reduz significativamente a temperatura de operação do processo, possibilitando a eletrólise em torno de 950 °C. Quando a corrente elétrica atravessa a cuba eletrolítica, os íons de alumínio (Al^{3+}) são reduzidos no cátodo, formando alumínio líquido, que se deposita no fundo da cuba. Simultaneamente, os ânodos de carbono reagem com o oxigênio liberado da alumina, formando principalmente dióxido de carbono (CO_2) (Alves, 2017).

O alumínio líquido é periodicamente retirado das cubas e encaminhado para etapas posteriores de purificação e conformação. Embora seja um processo altamente eficiente, o método Hall-Héroult demanda grandes quantidades de energia elétrica e contribui para emissões de gases de efeito estufa devido ao consumo dos ânodos de carbono (Alves, 2017).

Figura 8 - Fluxograma Apresentando o Processo Hall-Hérault



Fonte: Mettri (2022).

4.5.2 Impacto ambiental

A atividade de extração e produção de alumínio no Brasil acarreta uma série de impactos ambientais relevantes, sobretudo decorrentes da mineração de bauxita e do subsequente processamento do minério. Entre esses impactos, destacam-se a contaminação de corpos hídricos e do solo, o desmatamento e a geração de resíduos tóxicos, como a lama vermelha (Henriques, 2013).

A atividade mineradora resulta na geração de efluentes e rejeitos, como a lama vermelha, que contém metais pesados e diversas substâncias químicas, entre elas a soda cáustica, empregada no processo de refino. Ocorrências de vazamentos ou rompimentos de barragens de rejeitos podem provocar a contaminação de rios e

solos, comprometendo ecossistemas aquáticos e terrestres, além de representar riscos à saúde das comunidades locais que dependem desses recursos para o consumo e a subsistência (Lopes, 2022).

A extração de bauxita provoca alterações significativas na topografia e na paisagem natural das áreas impactadas, sendo que o manejo inadequado do solo pode resultar no assoreamento de rios e outros corpos d'água (Lopes, 2022).

A produção de alumínio primário gera volumes significativos de "lama vermelha" (rejeito da bauxita), os quais são armazenados em barragens a céu aberto. Esse método de armazenamento demanda grandes extensões de terra e apresenta risco potencial de acidentes ambientais graves, semelhantes àqueles já registrados no Brasil em outras atividades mineradoras (Lopes, 2022).

Segundo Silva Filho, Alves e Da Motta (2007) a qualidade da jazida de bauxita utilizada influencia diretamente na quantidade de lama vermelha gerada, bem como o teor de sólidos com que esta é lançada, que está diretamente ligado ao tipo de disposição adotada. Métodos conhecidos como disposição seca produzem uma menor quantidade de lama vermelha que os de disposição úmida. Levando-se em consideração estes parâmetros, pode-se afirmar que não existe uma proporção exata entre a quantidade de alumina produzida e a quantidade de lama vermelha gerada. Entretanto, Nunn (1998) "afirma que uma típica refinaria gera entre 0,5 e 2,0 ton de lama vermelha seca por ton de alumina produzida".

De acordo com Costa, (2022b), no Brasil, somente no ano de 2022, foram gerados entre 7 a 10 milhões de toneladas de lama vermelha. Diante desse volume expressivo, intensificam-se os estudos para transformar esse rejeito de um passivo ambiental em um recurso secundário estratégico. As pesquisas atuais exploram a viabilidade técnica de reinserir a lama vermelha na cadeia produtiva, principalmente como matéria-prima para a construção civil (na fabricação de cimento, tijolos e cerâmicas) e através da recuperação de elementos de terras raras e outros metais valiosos (Silva Filho; Alves; Da Motta, 2007). A Figura 9 apresenta a lagoa de disposição de lama vermelha da Alumar, no Maranhão, decorrente da produção de alumínio primário.

Figura 9 - Lagoa da disposição da lama vermelha da Alumar (Ilha de São Luís - Maranhão)



Fonte: Silva Filho; Alves; Da Motta (2007).

4.5.2.1 Relação entre alumínio primário e secundário

A jornada do alumínio até o consumidor tem dois caminhos drasticamente diferentes em termos de impacto ambiental. A produção primária, que parte da mineração da bauxita, demanda cerca de 14 a 16 MWh por tonelada de alumínio, o que resulta em emissões altíssimas de gases de efeito estufa (12 a 17 toneladas de CO₂ equivalente) e na geração de resíduos, como a lama vermelha. Além disso, a mineração original inevitavelmente causa degradação de solo e perda de biodiversidade (IAI, 2023).

Em contraste, a produção secundária, obtida pela reciclagem, é um exemplo de eficiência. O processo usa apenas cerca de 0,7 MWh por tonelada, uma economia de aproximadamente 95% na energia, e a pegada de carbono é igualmente mínima. O alumínio reciclado não perde qualidade e pode ser utilizado indefinidamente, poupando a extração de novos recursos (ABAL, 2024).

O Brasil é destaque global na reciclagem de latinhas, atingindo índices de 97%. Essa performance prova que o fortalecimento da economia circular, através da reciclagem, é a estratégia mais importante e sustentável para mitigar os impactos ambientais do setor e garantir o futuro desse material (ABAL, 2024).

4.5.3 Impacto econômico

A indústria do alumínio no Brasil é muito importante para a economia do país. Em 2024, o setor alcançou um faturamento recorde de R\$159,3 bilhões, um salto notável de cerca de 21% em relação ao ano anterior. Esse crescimento é sustentado por investimentos que ultrapassaram R\$6,4 bilhões, e se traduziu em uma arrecadação tributária histórica de R\$53,8 bilhões (Brasil Mineral, 2025).

Em 2023, o alumínio contribuiu com 5,6% do PIB industrial e foi responsável por gerar mais de 511 mil empregos diretos. Além disso, o comércio exterior se manteve forte, com um superávit comercial de aproximadamente US\$2,7 bilhões em 2023, mostrando a força dos produtos no mercado global (ABAL, 2024).

Segundo a ABAL, em 2024, cerca de 1 milhão de toneladas de produtos de alumínio consumidos no Brasil, o equivalente a 57% do total, vieram de metal reciclado, quase o dobro da média global (28%). Esses números mostram que a reciclagem vai muito além das latas, reforçando o protagonismo da indústria nacional na economia circular e no abastecimento do mercado interno com material reciclado (ABAL, 2025).

Em suma, a cadeia produtiva do alumínio é um pilar estratégico que vai além de gerar valor financeiro e empregos. Ao adotar a reciclagem com sucesso, o Brasil não só fortalece sua economia, mas se posiciona como um exemplo global de como a indústria pode ser eficiente na conservação de matérias-primas, impulsionando a economia circular no país.

4.6 PEGADA DE CARBONO DO ALUMÍNIO NO BRASIL

A pegada de carbono da indústria do alumínio no Brasil é um dos principais fatores que confere ao setor uma vantagem competitiva significativa no cenário global, especialmente no contexto da transição para uma economia de baixo carbono (Fastmarkets, 2024).

A quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida do alumínio é essencial para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e para a identificação de oportunidades de mitigação, sendo a comparação entre a produção primária e secundária o ponto central desta avaliação.

4.6.2 Pegada de carbono do alumínio primário

Dados recentes da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) indicam que a pegada de carbono do alumínio primário produzido no Brasil varia entre 4,5 e 6,5 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de metal (tCO₂e/t Al), considerando a avaliação "do berço ao portão" (cradle-to-gate) (Fastmarkets, 2024).

Este valor representa uma redução de aproximadamente 65% em comparação com a média global, que se situa entre 15 e 16 t CO₂e/t Al (Fastmarkets, 2024). Em termos práticos, as emissões brasileiras são cerca de 3,3 vezes menores que a média mundial (Jornal de Brasília, 2025).

Apesar da vantagem da matriz elétrica, a produção de alumínio primário ainda concentra a maior parte das emissões da cadeia de valor. Estima-se que 65% das emissões da indústria ocorram na fase de produção do alumínio primário e 25% na produção de alumina (Brasil Energia, 2025).

4.6.3 Pegada de carbono do alumínio secundário

A produção de alumínio secundário (reciclado) é o pilar da economia circular no setor e representa a estratégia mais eficaz para a redução da pegada de carbono (Geissdoerfer *et al.*, 2017). O processo de reciclagem do alumínio, ilustrado na Figura 10, exige significativamente menos energia do que a produção primária, o que se traduz em uma drástica redução das emissões de GEE.

Embora o valor exato da pegada de carbono do alumínio secundário no Brasil dependa da fonte de energia utilizada no processo de fusão da sucata, a magnitude da redução é universalmente reconhecida. Estudos internacionais de ACV demonstram a disparidade, com a pegada de carbono do alumínio secundário sendo drasticamente menor (ex: 0,32 t CO₂e/t Al em comparação com 14,98 t CO₂e/t Al para o primário em um estudo global) (Shen *et al.*, 2024).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2022), para cada um quilo de lata reciclada são poupados cinco quilos de bauxita, mineral utilizado para a produção de alumínio. Somente em 2021, foram economizados dois milhões de toneladas de bauxita. Benefícios que não param por aí. Entre 2019 e 2021, a reciclagem proporcionou uma redução de 70% no consumo de energia, 65% no consumo de água e queda de 70% nas emissões de gases de efeito estufa.

Figura 10 - Ciclo de reciclagem do Alumínio



Fonte: PROPEQ (2023)

4.7 ECONOMIA CIRCULAR E O ALUMÍNIO NO BRASIL

A mudança de uma economia linear para um modelo circular vai além de uma simples medida ambiental, trata-se de uma estratégia inteligente, fundamental para o desenvolvimento sustentável (Movimento Circular, 2024). No Brasil, o alumínio se destaca como o grande exemplo dessa transição, mostrando que é possível unir eficiência industrial, responsabilidade ambiental e benefícios sociais em um mesmo processo.

Esse sucesso não se deve apenas ao avanço tecnológico da indústria, mas principalmente ao trabalho essencial da rede de catadores e catadoras de materiais recicláveis. O alto valor comercial da sucata de alumínio torna a coleta uma atividade

economicamente viável e socialmente relevante, gerando renda e promovendo inclusão social para milhares de famílias em todo o país (MMA, 2022).

Outro ponto de destaque é a agilidade do ciclo de logística reversa: uma lata descartada pode voltar às prateleiras em cerca de 60 dias (Agência Brasil, 2025). Além disso, a reciclagem de sucata de alumínio já representa cerca de 60% do consumo nacional do metal, um índice muito superior à média global (ABAL, 2023), reforçando o protagonismo do Brasil na transição para uma economia mais sustentável e circular.

Conclui-se que o alumínio representa o maior exemplo de sucesso da economia circular no Brasil, destacando-se não apenas pela sua eficiência ambiental, mas também por integrar aspectos econômicos e sociais em um modelo de desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

5 DISCUSSÕES DA LITERATURA

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA

A análise comparativa entre as duas rotas foca no diferencial energético como o principal vetor das emissões. O dado central da literatura é a economia de 95% de energia ao reciclar (UNEP, 2021). A produção primária, por sua natureza, é notoriamente intensiva em energia e o consumo direto de água consolidado gira em torno de 4.200 litros a 5.400 litros de água por tonelada de alumínio primário produzido (considerando as etapas de refino e fundição) (IAI, 2023).

A etapa de redução, ou eletrólise ígnea, realizada através do Processo Hall-Héroult, é a principal consumidora de eletricidade na rota primária (Alves, 2017). A rota secundária (reciclagem) evita completamente esta etapa, necessitando apenas de energia para a fusão da sucata, o que explica a drástica redução no consumo (Schlesinger *et al.*, 2011).

Os impactos da produção primária extrapolam as emissões de GEE. O ciclo produtivo inicia-se com a mineração de bauxita, uma atividade extrativa que, por definição, envolve a supressão de vegetação e movimentação de terras (Lopes, 2022). Estes processos geram impactos associados ao desmatamento e à perda de biodiversidade.

A produção secundária, em contrapartida, mitiga estes impactos na origem, ela não requer a mineração de bauxita, preservando os biomas e evitando os conflitos pela terra, além disso, a rota de reciclagem não gera lama vermelha, eliminando o desafio de disposição deste rejeito.

A matriz hidrelétrica brasileira reduz a pegada de carbono do Escopo 2 (energia adquirida) da produção primária nacional. Esta característica torna o alumínio primário brasileiro competitivo internacionalmente sob a ótica das emissões de GEE.

No entanto, deve-se ressaltar que a energia limpa (Escopo 2) não anula os impactos ambientais locais da extração. Mesmo com energia hidrelétrica, os impactos da mineração e a geração de lama vermelha persistem como passivos da rota primária (Lopes, 2022).

O Quadro 3 sintetiza as principais diferenças entre as duas rotas de produção. A tabela consolida os dados de consumo energético, as médias de emissões de GEE e os impactos ambientais não relacionados ao carbono.

Quadro 3 - Comparativo de Impacto: Produção Primária vs. Secundária de Alumínio

Característica	Produção Primária (Global)	Produção Primária (Brasil)	Produção Secundária (Reciclagem)
Matéria-Prima	Bauxita	Bauxita	Sucata de Alumínio
Consumo Energia (Médio)	14 MWh/t\$	14 MWh/t	0,7 MWh/t (95% de economia)
Emissões GEE (Médio)	14,8 - 16,0 tCO ₂ e/t	4,5 - 6,5 tCO ₂ e/t	0,5 - 1,0 tCO ₂ e/t
Impactos Críticos (Não-Carbono)	Mineração (desmatamento, biodiversidade); Geração de Lama Vermelha.	Mineração (desmatamento, biodiversidade); Geração de Lama Vermelha.	Mitigados (não requer mineração, não gera lama vermelha).

Fonte: Autores (2025), com base em ABAL (2023), IAI (2024), UNEP (2021) e Fastmarkets.com (2024).

5.2 CENÁRIO BRASILEIRO

O Brasil demonstra uma liderança mundial consolidada na reciclagem de latas de alumínio. Este é um caso de sucesso em logística reversa, servindo de referência para outros setores e materiais no país.

Este sucesso reduz drasticamente a pegada de carbono do setor de embalagens. O modelo se sustenta economicamente pelo alto valor de mercado da sucata e socialmente pela ampla rede de coleta que inclui milhares de catadores e cooperativas (Agência Brasil, 2025).

O país, no entanto, enfrenta desafios locais na outra ponta da cadeia. A mineração de bauxita, concentrada na região amazônica, gera impactos socioambientais relevantes que são objeto de estudo e conflito (Lopes, 2022). Estudos de percepção em Barcarena, no Pará (Cabral, 2025), apontam a contaminação de corpos hídricos como uma das principais preocupações da comunidade.

O descarte da lama vermelha, rejeito do refino da alumina, é um dos principais desafios técnicos e ambientais da cadeia primária. O armazenamento deste rejeito em grandes barragens apresenta riscos potenciais. A busca por alternativas de uso e valorização para este rejeito é uma área de pesquisa ativa e necessária (Schlesinger *et al.*, 2011).

Um terceiro desafio é a dificuldade de expandir a circularidade para além das latas. As latas são uma liga de alumínio relativamente simples e possuem um ciclo de vida curto, facilitando a coleta (Agência Brasil, 2025).

Além disso, existem desafios técnicos para reciclar ligas complexas e produtos de longa vida útil. A sucata proveniente da construção civil e do setor de transportes muitas vezes está misturada, o que dificulta o processo. A contaminação da sucata com diferentes ligas de alumínio reduz a qualidade do metal reciclado. A obtenção de ligas específicas de alta performance a partir desta sucata mista é um dos principais desafios técnicos da reciclagem do alumínio.

5.3 ECONOMIA CIRCULAR E POLÍTICAS PÚBLICAS

O alumínio é um material considerado exemplar para a Economia Circular (EC). Sua propriedade de ser "infinitamente reciclável sem perda significativa de qualidade" (ABAL, 2023) o torna ideal para modelos de negócio que buscam fechar o ciclo de vida do material.

A EC se contrapõe ao modelo linear tradicional de "extrair-produzir-descartar" (Abdalla; Sampaio, 2018). Estratégias como reutilização, design para desmontagem e, principalmente, logística reversa são fundamentais para a implementação da circularidade (Ellen Macarthur Foundation, 2015).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, é o principal marco legal que impulsiona a EC. A lei estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, além de fornecer o suporte institucional para os programas de logística reversa. O sucesso da reciclagem de latas é um resultado direto da aplicação efetiva dos princípios da responsabilidade compartilhada.

A agenda ESG (Governança, Social e Ambiental) tem pressionado as empresas do setor (listadas na Tabela 2) a adotar práticas mais sustentáveis. Relatórios de sustentabilidade de 2024 e 2025 das principais empresas do setor demonstram este movimento.

Associações setoriais, como a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), desempenham um papel relevante na promoção da EC. Elas articulam o setor e promovem programas de reciclagem pós-consumo, além de atuar em conjunto com o governo para alinhar o setor às demandas de rastreabilidade. A participação da

associação no "Programa Selo Verde Brasil" visa criar uma norma (ABNT) para certificar chapas de alumínio laminado de baixa pegada de carbono.

5.4 ANÁLISE CRÍTICA DAS METODOLOGIAS DE PEGADA DE CARBONO

As normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044 estabelecem as diretrizes e os padrões metodológicos para a condução desses estudos (Baumann; Tillman, 2004). A ABNT (ABNT, 2009) é o órgão responsável pela normalização nacional.

A definição das fronteiras do sistema é uma etapa crítica na ACV. Muitas vezes, utiliza-se a abordagem "do berço ao portão" (cradle-to-gate), que avalia o produto apenas até a saída da fábrica. Esta fronteira, entretanto, é inadequada para avaliar materiais com alto potencial de circularidade, como o alumínio, no qual uma avaliação "do berço ao berço" (cradle-to-cradle) seria a mais adequada, pois é a única que consegue capturar os benefícios sistêmicos da reciclagem (Ellen Macarthur Foundation, 2019).

A aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil ainda enfrenta importantes limitações metodológicas, principalmente associadas à falta de dados nacionais completos e atualizados para todas as etapas dos inventários ambientais. Essa carência afeta diretamente a representatividade dos estudos, uma vez que muitos trabalhos precisam recorrer a bancos de dados internacionais, que não refletem as especificidades da matriz energética, das tecnologias industriais e das práticas operacionais brasileiras (IPEA, 2015).

Este desafio é reconhecido, e existem iniciativas para mitigá-lo. O Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) e o projeto "Pedra Fundamental" implementado em 2021, da Rede ACV, buscam o objetivo de melhorar a quantidade e a qualidade dos inventários de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que representam o Brasil, aumentando ainda mais a qualidade dos estudos brasileiros (EMBRAPA, 2021).

Outra limitação é a dificuldade de comparar estudos que utilizam fronteiras e escopos diferentes. A falta de padronização na definição de escopo prejudica a comparabilidade dos resultados de pegada de carbono. A falta de padronização em métricas de emissões indiretas de Escopo 3 (cadeia de suprimentos) é um desafio central. O rastreamento do Escopo 3 é complexo, mas fundamental para uma ACV completa e transparente (FORBES, 2025).

5.5 TENDÊNCIAS E OPORTUNIDADES

Embora a matriz brasileira seja predominantemente hidrelétrica, a tendência é a diversificação para outras fontes renováveis. A indústria busca ativamente descarbonizar toda a cadeia, incluindo mineração e transporte.

No cenário de descarbonização da indústria nacional a CBA (CBA, 2024), destaca-se com o lançamento do selo *Alennium*, que certifica a produção de alumínio de baixo carbono utilizando 100% de energia proveniente de fontes renováveis e informa que sua refinaria de alumina possui intensidade de carbono de 0,21 t CO₂ por tonelada de óxido produzido, dado que a empresa apresenta como “menor emissão mundial” para essa etapa da produção de alumina no seu portfólio de sustentabilidade.

A Hydro (HYDRO, 2024) declarou um plano de investimento de aproximadamente R\$7,5 bilhões em geração de energia renovável (parques solares e eólicos) para abastecer suas plantas no Pará, como parte de sua estratégia de descarbonização e produção de alumínio. A Alcoa reporta que 86% da eletricidade utilizada em suas fundições globais provém de fontes renováveis, um indicativo claro de compromisso com a descarbonização energética da produção de alumínio (ALCOA, 2024).

O uso de tecnologias de digitalização é uma tendência para rastrear o material ao longo do ciclo de vida, sendo essa rastreabilidade necessária para garantir a veracidade das alegações de “alumínio verde”. A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) (ABDI, 2025), vinculada ao governo, em parceria com ABAL, anunciou em 2025 que vai usar a plataforma Recircula Brasil para rastrear e certificar produtos de alumínio, garantindo a rastreabilidade de material reciclável desde a sucata até o produto final.

O mercado de “low-carbon aluminium” está em expansão e políticas públicas como o “Programa Selo Verde Brasil” dependem dessa rastreabilidade para certificar produtos e combater o *greenwashing*.

Uma oportunidade técnica importante é expandir a reciclagem em “ciclo fechado” (*closed-loop*). Esta abordagem supera o desafio das ligas complexas, onde produtos (ex: peças automotivas) são reciclados de volta em produtos de mesma qualidade, sem *downcycling*.

A Novelis (NOVELIS, 2022), líder global em laminação e reciclagem de alumínio, implementou sistemas de reciclagem em circuito fechado com montadoras: a sucata automotiva resultante da produção é devolvida à Novelis e transformada novamente em chapas automotivas de alta performance, mantendo a qualidade do material e evitando *down-cycling*. Essa prática reforça o potencial do alumínio como material verdadeiramente circular e contribui significativamente para a redução da pegada de carbono no setor automotivo.

A principal oportunidade de aumento da circularidade do alumínio no Brasil está na recuperação de produtos pós-consumo de longa vida útil, como materiais da construção civil, transportes e bens duráveis. O desafio é criar sistemas de coleta eficientes para produtos da construção civil e veículos em fim de vida (VfV), e traduzir o sucesso das latinhas para esses setores (AGÊNCIA BRASIL, 2025). A integração entre produtores de alumínio (ABAL) e os gestores de resíduos urbanos (municípios) é necessária para otimizar essa logística.

5.6 SÍNTESE FINAL DA DISCUSSÃO

A discussão realizada neste capítulo demonstra o papel do Brasil como um caso positivo e único na cadeia global do alumínio. O país apresenta uma dualidade vantajosa que o posiciona de forma estratégica. De um lado, possui uma produção primária de baixa pegada de carbono devido à sua matriz hidrelétrica. Do outro, mantém um sistema de reciclagem de latas (ciclo curto) de classe mundial, com índices superiores a 97%. Apesar deste cenário favorável, o país ainda enfrenta desafios para atingir uma cadeia totalmente circular e de baixa emissão.

Estes desafios são estruturais e requerem ações coordenadas. Portanto, os desafios remanescentes incluem a gestão dos impactos socioambientais da mineração e o passivo da lama vermelha, além de persistir a necessidade de criar sistemas eficazes de logística reversa e reciclagem para produtos de alumínio de longa vida útil.

6 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso avaliou o ciclo de vida do alumínio no contexto brasileiro. O objetivo geral foi analisar a contribuição das rotas de produção primária e secundária para a pegada de carbono nacional.

A análise buscou, adicionalmente, identificar as oportunidades de sustentabilidade e os desafios para a implementação plena dos princípios da economia circular no setor. O estudo de caso, baseado em revisão bibliográfica e dados setoriais recentes, permitiu traçar um diagnóstico da complexa cadeia nacional do metal.

O estudo consolidou as referências da literatura, respondendo ao primeiro objetivo específico. A revisão confirmou o consenso técnico de que a produção secundária (reciclagem) é ambientalmente superior à rota primária. O principal diferencial identificado é o consumo energético. A reciclagem de sucata de alumínio consome apenas cerca de 5% da energia elétrica necessária para a produção de alumínio primário a partir da bauxita.

Na comparação entre as rotas no Brasil (segundo objetivo específico), concluiu-se que o país vive uma dualidade. A produção primária é beneficiada pela matriz energética predominantemente hidrelétrica, esta característica confere ao alumínio primário nacional uma das menores pegadas de carbono do mundo. Contudo, esta vantagem (restrita ao Escopo 2) não anula os impactos ambientais severos da extração mineral e da geração de resíduos.

A rota primária mantém passivos como os impactos socioambientais da mineração de bauxita, vistos em regiões como o Pará, e o desafio crônico da geração e armazenamento da lama vermelha. Estes impactos são completamente evitados pela rota da reciclagem.

A liderança brasileira na reciclagem de latas de alumínio, com índices recentes de 97,3%, foi confirmada (terceiro objetivo específico), este sistema é um pilar da economia circular no país. Os benefícios ambientais, como a redução de emissões e da necessidade de extração, são claros. O modelo de logística reversa das latas também gera benefícios socioeconômicos, demonstrando a viabilidade da circularidade.

Os principais desafios residem nos impactos da indústria primária e na dificuldade de replicar o sucesso das latas em outros segmentos. A circularidade de ligas complexas e produtos de longa vida útil, como os dos setores automotivo e de

construção civil, ainda é baixa. As oportunidades estão na expansão da logística reversa e na adoção de tecnologias de reciclagem em ciclo fechado.

A contribuição deste estudo foi apresentar um panorama integrado do ciclo de vida do alumínio no Brasil. O trabalho destaca a complexa interação entre uma matriz energética limpa, os impactos da extração mineral e um sistema de reciclagem de ponta (focado em embalagens). As limitações encontradas são ligadas à disponibilidade e agregação de dados públicos, provenientes de associações setoriais e estudos acadêmicos anteriores. Conforme discutido na análise crítica das metodologias (seção 6.5), a falta de um banco de dados nacional unificado de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma limitação estrutural para pesquisas desta natureza no Brasil.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugerem-se pesquisas futuras focadas em:

- Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) específicas para diferentes ligas de alumínio de longa vida útil (setores automotivos e construção) no contexto brasileiro;
- Estudos de viabilidade técnica e econômica para novas aplicações da lama vermelha em escala industrial;
- Pesquisas sobre políticas públicas para incentivar a logística reversa de produtos de alumínio pós-consumo de longa vida útil.

REFERÊNCIAS

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio brasileiro: soluções para uma vida sustentável**. São Paulo: ABAL, 2017.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **História da Indústria do Alumínio no Brasil**. São Paulo: ABAL, [s.d.]. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/historia-da-industria-do-aluminio/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Brasil recicla 97,3% das latas de alumínio, mas cenário internacional ameaça vantagem competitiva do setor**. 19 ago. 2025. Disponível em: <https://abal.org.br/noticia/brasil-recicla-973-das-latas-de-aluminio-mas-cenario-internacional-ameaca-vantagem-competitiva-do-setor/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório Anual da Indústria do Alumínio 2023**. São Paulo: ABAL, 2024. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/setor-do-aluminio-fatura-r-135-bilhoes-e-contribui-com-56-do-pib-industrial/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Indústria do alumínio registra recordes históricos em 2024**. São Paulo: ABAL, 2025. Disponível em: <https://abal.org.br/>. Acesso em: 05 dez. 2025.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. São Paulo: ABAL, 2023.

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO; CNI. **A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio**. Brasília: CNI/ABAL, 2017.

ABDALLA, F. A.; SAMPAIO, A. C. F. **Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [S.l.], n. 15, fev./jun. 2018.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **ABDI e MDIC anunciam rastreamento da cadeia de alumínio pela plataforma Recircula Brasil**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2025/novembro/abdi-e-mdic-anunciam-rastreamento-da-cadeia-de-aluminio-pela-plataforma-recircula-brasil/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009 (Versão corrigida 2014).

ABRALATAS. **Relatório de Sustentabilidade 2022**. Brasília: Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio, 2023. Disponível em: <https://www.abralatas.org.br>. Acesso em: 27 nov. 2025.

AGÊNCIA BRASIL. **Economia circular do alumínio no Brasil: desafios da logística reversa de produtos pós-consumo**. Brasília: Empresa Brasil de Comunicação, 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br>. Acesso em: 16 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sumário Mineral Brasileiro 2024: Alumínio (ano-base 2023)**. Brasília: Governo Federal, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

ALCOA. **Sustainability Report 2024**. Pittsburgh: Alcoa Corporation, 2024. Disponível em: <https://www.alcoa.com>. Acesso em: 26 nov. 2025.

ALVES, A. A. M. **Extração de alumina: uma avaliação dos parâmetros influentes**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

BARDOSSY, G.; ALEVA, G. J. J. **Lateritic Bauxites**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990. (Developments in Economic Geology, v. 27).

BAUMANN, H.; TILLMAN, A. M. **The hitch hiker's guide to LCA**. Lund: Studentlitteratur, 2004.

BBM BOLSA. **Indústria do alumínio registra recordes históricos em 2024, mas desafios globais acendem alerta para 2025**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.bbmbolsa.com.br/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Índice de reciclagem de latas de alumínio chega a 99% e Brasil se destaca como recordista mundial**. Brasília: Gov.br, 27 abr. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2022/04/indice-de-reciclagem-de-latas-de-aluminio-chega-a-99-e-brasil-se-destaca-como-recordista-mundial>. Acesso em: 09 dez. 2025.

BRASIL ENERGIA. **Emissões de CO2 na indústria do alumínio**. 2025. Disponível em: <https://brasilenergia.editorabrasilenergia.com.br>. Acesso em: 27 nov. 2025.

BRASIL MINERAL. **Faturamento do setor cresce 21% em 2024**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

BRAZ, S. N.; SILVA, L. H. V. **Pegada de carbono: uma análise bibliométrica**. Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 9, n. 17, 2020.

CABRAL, M. V. A. **Os processos socioambientais e de saúde da população ribeirinha de Barcarena-Pará a partir dos constrangimentos ambientais causados pela mineração**. 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado do Pará, Belém, 2025.

CARBON FOOTPRINT. **Carbon Footprint**. [S.d.]. Disponível em: <https://www.carbonfootprint.com/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

CBA – COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **CBA lança selo do alumínio de baixo carbono e passaporte digital que reforçam transparência de seus**

processos sustentáveis. 2022. Disponível em: <https://www.cba.com.br/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

CBA – COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **CBA posiciona alumínio como metal estratégico para transição energética na COP30**. 2024. Disponível em: <https://www.cba.com.br/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

CBA – COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Relatório Anual 2024: produção de alumínio de baixo carbono, energia renovável e eficiência industrial**. 2024.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: QualityMark, 1998.

COELHO FILHO, O.; LUI, N. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Brasília: IPEA, 2015. (Texto para Discussão, n. 2205).

COSTA, L. V. **A reciclagem do alumínio: caminho para o desenvolvimento sustentável**. 2022. Trabalho Final de Graduação – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

COSTA, M. L. **Geração e caracterização da lama vermelha no Brasil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

DZEMBATYI, R. G.; RAMOS, L. L. V. **Análise da pegada de carbono dos alunos de engenharia de produção da UTFPR**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à Economia Circular: o racional de negócio para acelerar a transição**. 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **What is a Circular Economy?** 2019. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-circular-economy-in-detail>. Acesso em: 27 nov. 2025.

EMBRAPA. **Rede ACV conclui Pedra Fundamental e inaugura nova etapa de gestão da Avaliação de Ciclo de Vida no País**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

ENCICLO SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS. **5 Softwares para realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos seus produtos**. 2015. Blog EnCiclo. Disponível em: <https://www.enciclo.com.br/blog>. Acesso em: 27 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

FASTMARKETS. **Brazilian aluminium industry plans further decarbonization**. 2024. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

FORBES BRASIL. **ESG Além das Fronteiras: O Desafio do Escopo 3 e o Futuro Sustentável das Empresas**. 2025. Disponível em: <https://forbes.com.br/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

- FRUTUOSO, M. F. **Quais os conceitos a incluir no desenvolvimento de uma aplicação de cálculo da pegada de carbono**. 2024. Dissertação (Mestrado em Gestão de Sistemas de Informação) – Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL), Lisboa, 2024.
- GEISSDOERFER, M. et al. **The Circular Economy – A new sustainability paradigm?** Journal of Cleaner Production, v. 143, p. 757-768, 2017.
- GOEDKOOP, M. et al. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**. 1. ed. Haia: VROM, 2009.
- HENRIQUES, A. B. **A insustentável leveza do alumínio: impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- HERRMANN, I. T.; MOLTESEN, A. **Importa qual ferramenta de avaliação de ciclo de vida (LCA) você escolhe?** Journal of Cleaner Production, v. 86, 2015.
- HUDSON, L. K.; MISRA, C. et al. **Aluminum Oxide**. In: **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Weinheim: Wiley-VCH, 2012.
- HYDRO. **Hydro Low-Carbon Aluminium: produtos com pegada reduzida e cadeia rastreável** (Escopos 1-3). 2025.
- HYDRO. **Hydro realiza o maior investimento em ações voltadas para clima e meio ambiente da indústria do alumínio no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.hydro.com/br/>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- HYDRO. **Sustainability Report 2023**. Oslo: Norsk Hydro ASA, 2023.
- IAI – INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Life Cycle Inventory Data and Environmental Metrics for the Aluminium Industry 2023**. London: IAI, 2023.
- IAI – INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Primary Aluminium Production 2024 Statistical Report**. London: IAI, 2024.
- IDEIA CIRCULAR. **O que é Economia Circular?** 2015. Disponível em: <https://ideiacircular.com>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- JORNAL DE BRASÍLIA. **Alumínio mais verde: setor global corta emissões de CO₂ pelo terceiro ano consecutivo**. 18 fev. 2025. Disponível em: <https://jornaldebrasil.com.br>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- LEITÃO, A. **Economia Circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI**. Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting, v. 1, n. 2, 2015.

LOPES, A. B. Q. A. **Processo produtivo do alumínio primário: principais impactos ambientais associados e medidas de mitigação**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

MARQUES, F. V. R. **A produção de alumínio no Brasil**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

METTRI, Marcos Danilo. **Processo Hall-Hérout**. 2022. Trabalho apresentado à disciplina de Química Inorgânica Experimental I – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

MICROFUND. **Obtenção do alumínio**. [S.d.]. Disponível em: <http://www.microfund.com.br/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Índice de reciclagem de latas de alumínio chega a 99% e Brasil se destaca como recordista mundial**. Brasília: MMA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 27 nov. 2025.

MOHAN, S.; OKE, N.; GOKUL, D. **Conventional and zero liquid discharge treatment plants for textile wastewater through the lens of carbon footprint analysis**. Journal of Water and Climate Change, v. 12, n. 6, 2021.

MONTEIRO, M. **Economia Circular: um novo modelo econômico**. Empreendedorismo Start e Go, n. 20, 2018.

MOVIMENTO CIRCULAR. **O que é economia circular?** 2024. Disponível em: <https://movimentocircular.io>. Acesso em: 27 nov. 2025.

NOVELIS. **Novelis and Smart Press Shop Create Closed-Loop Recycling System**. 2022.

NUNN, R. F. **Red mud: an environmental problem in the alumina industry**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 1998. **Proceedings...** 1998.

OBSERVATÓRIO SOCIAL. **A indústria do alumínio no Brasil: perfil e tendências**. São Paulo: Observatório Social, 2002.

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. S. **Carbon footprint: Current methods of estimation**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 178, p. 135-160, 2011.

PEHLKE, R. D. **Unit Processes in Extractive Metallurgy**. New York: Elsevier, 1991.

PROPEQ. **Reciclagem de alumínio**. 2023. Disponível em: <https://propeq.com/reciclagem-de-aluminio/>. Acesso em: 10 dez. 2025.

RADU, A. L.; SCRIECIU, M. A.; CARACOTA, D. M. **Carbon footprint analysis**. *Procedia Economics and Finance*, v. 6, p. 429-438, 2013.

RECICLA CLUB. **Entenda o que é a Avaliação do Ciclo de Vida.** Recicla Club, 25 nov. 2021. Disponível em: <https://recicla.club/entenda-avaliacao-ciclo-de-vida/>. Acesso em: 09 dez. 2025.

REVISTA ALUMÍNIO. **Indústria do alumínio aumenta faturamento em 21,2% em 2024 e alavanca a economia brasileira.** 2025. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/industria-do-aluminio-alavanca-economia-brasileira-de-acordo-com-o-anuario-estatistico-da-abal/> Acesso em: 09 dez. 2025.

REVISTA MINERAÇÃO & SUSTENTABILIDADE. **Brasil recicla 97,3% das latas de alumínio, mas cenário internacional ameaça competitividade.** 15 ago. 2025. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br>. Acesso em: 27 nov. 2025.

ROY, P. et al. **A review of life cycle assessment (LCA) on some food products.** Journal of Food Engineering, v. 90, n. 1, p. 1-10, 2009.

SCHLESINGER, M. E. **Aluminum Recycling.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

SHEN, X. et al. **Aluminum Life Cycle Inventory Dataset for China.** Mendeley Data, v. 1, 2024.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

TAN, R. B. H.; KHOO, H. H. **An LCA study of a primary aluminum supply chain.** Journal of Cleaner Production, v. 13, n. 6, p. 607-618, 2005.

TOPCHEVA, T. **Direct and indirect carbon emissions in a production facility.** KNOWLEDGE - International Journal, v. 61, n. 1, 2023.

UNEP. **Global Methane Assessment.** Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021.

VALLE, C. E. **Qualidade Ambiental: ISO 14000.** 4. ed. São Paulo: Senac, 2002.