

ANÁLISE DE MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO SOB A PERSPECTIVA DA QUÍMICA VERDE

ANALYSIS OF METHODS FOR OBTAINING ALUMINUM FROM THE PERSPECTIVE OF GREEN CHEMISTRY

Angélica de Sousa Hrysyk (Correspondente)^a, Emanuelle Cristina de Santana Silva Mendes^a

^aInstituto Federal do Paraná (IFPR) - Campus Paranaguá

angelica.hrysyk@ifpr.edu.br, emanuellemendes459@gmail.com

Submissão: 04 de julho de 2024

Aceitação: 09 de maio de 2025

Resumo

A logística reversa é a área da logística empresarial que planeja, opera e controla o retorno dos bens de pós-venda e consumo ao ciclo produtivo, sendo a reciclagem uma importante etapa desse processo, pois possibilita o reaproveitamento de diversos tipos de materiais, como as latas de alumínio, evitando-se a extração do metal da natureza, atividade que gera impactos ambientais. Por esse motivo, este trabalho tem como objetivo analisar os métodos de obtenção do alumínio, ou seja, mineração e reciclagem, sob a perspectiva da Química Verde (QV). Esta estabelece 12 princípios que buscam reduzir ou eliminar o uso ou a geração de substâncias perigosas. Os métodos de obtenção do alumínio foram comparados identificando-se os princípios da QV contemplados e aplicadas as métricas de massa (Fator E, Economia Atômica) e holística (Estrela Verde (EV)), que são instrumentos que permitem mensurar a veracidade dos processos. A reciclagem mostrou-se o meio mais econômico, em relação ao uso de recursos e a quantidade de resíduos gerados. O princípio 1 foi atendido, pois empregando a reciclagem deixa-se de produzir a lama cáustica, ou seja, há a prevenção da formação do resíduo que necessitará de tratamento ao final da linha de produção. O princípio 2, que trata da economia de átomos, foi cumprido, visto que, com a reciclagem, evita-se a extração da matéria-prima da qual se obtém o alumínio, a bauxita, e a redução da quantidade de água. O princípio 6 refere-se à busca da eficiência de energia elétrica, visto que, o processo de reciclagem utiliza menos energia elétrica que a extração da bauxita. Comparando-se as duas formas de obtenção do alumínio, a Economia Atômica mostrou baixo rendimento, quando se emprega a extração, e a EV confirma que a reciclagem é a via menos impactante ao ambiente. A partir desse estudo foi possível verificar que a logística reversa das latas de alumínio é uma forma eficiente de reduzir os impactos ao ambiente, pois a reciclagem produz menos resíduos, evita a extração de matéria-prima e são utilizadas menores quantidades de energia elétrica e de água.

Palavras-chave: logística reversa; reciclagem; química verde; sustentabilidade.

Abstract

Reverse logistics is the area of corporate logistics that plans, operates and controls the return of post-sale and consumer goods to the production cycle. Recycling is an important step in this process, as it enables the reuse of various types of materials, such as aluminum cans, avoiding the extraction of the metal from nature, an activity that generates environmental impacts. For this reason, this study aims to analyze the methods of obtaining aluminum: recycling and mining, from the perspective of Green Chemistry (GC). This establishes twelve principles that seek to reduce or eliminate the use or generation of hazardous substances. The methods of obtaining aluminum were compared by identifying the GC principles considered and applied to mass (E Factor, Atomic Economy) and holistic (Green Star (GS)) metrics, which are instruments that allow measuring the greenness of the processes. Recycling proved to be the most economical method in relation to the use of resources and the amount of waste generated. Principle 1 was met, since recycling prevents the production of caustic sludge, which means that the formation of waste that will require treatment at the end of the

production line is prevented. Principle 2, which deals with the economy of atoms, was fulfilled, since recycling avoids the extraction of the raw material from which aluminum is obtained, bauxite, and reduces the amount of water. Principle 6 refers to the search for electrical energy efficiency, since the recycling process uses less electrical energy than bauxite extraction. Comparing the two methods of obtaining aluminum, the Atomic Economy showed low yields when extraction is used, and the GS confirms that recycling is the least impactful route to the environment. From this study, it was possible to verify that the reverse logistics of aluminum cans is an efficient way to reduce environmental impacts, since recycling produces less waste, avoids the extraction of raw materials, and uses less electrical energy and water.

Keywords: reverse logistic; recycling; green chemistry; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O mundo atual é norteado por modelos econômicos que exigem cada vez mais recursos para atender a uma sociedade consumista e que aliados ao crescimento populacional e o desenvolvimento industrial, refletem no aumento da geração de resíduos (Barbieri; Cajazeira, 2016; Sheldon, 2016).

Como forma de contribuir para a redução do uso de matérias-primas e, conseqüentemente, com os resíduos gerados, surgiu, na década de 1970, a logística reversa, que pode ser definida como o conjunto de ferramentas que auxiliam no recolhimento e encaminhamento do pós-venda ou pós-consumo do setor empresarial, para reaproveitamento e a destinação correta de resíduos, ajudando a reduzir custos e contribuindo com a preservação do meio ambiente (Lacerda, 2002).

A geração de resíduos também é uma preocupação da química; por esse e outros motivos, em 1991, foi proposto por John Warner e Paul Anastas uma nova forma de pensar sobre os impactos da atividade química. Essa nova filosofia foi denominada como química verde, que é definida como “o desenvolvimento de produtos químicos e processos que buscam a redução ou eliminação do uso e da geração de substâncias perigosas” (Anastas; Warner, 1998). A química verde é norteada por 12 princípios que, em resumo, almejam reduções da toxicidade, do uso de fontes não renováveis, dos riscos de poluição ao meio ambiente e economia de matéria-prima.

Portanto, o objetivo do trabalho é analisar os métodos de obtenção do alumínio, ou seja, mineração e reciclagem, comparando-os de acordo com o cumprimento dos princípios da química verde, e verificando como a logística reversa contribui com práticas mais sustentáveis para a indústria do alumínio.

Este artigo está organizado em cinco partes,

iniciando com uma breve introdução sobre o tema. Em sequência, na revisão bibliográfica são abordados os temas sobre logística reversa das latas de alumínio, produção de alumínio a partir da bauxita e a Química Verde. Na terceira parte é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa. Na quarta parte são apresentados os resultados e discussões, iniciando-se com a comparação das formas de obtenção do alumínio a partir da bauxita e da reciclagem de latas, depois são analisadas as etapas de produção do alumínio sob a perspectiva da química verde e finalizando, realizou-se a comparação da produção de alumínio primário e secundário utilizando a Estrela Verde. Na última parte são feitas as considerações finais sobre o trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A logística reversa das latas de alumínio

Os primeiros estudos sobre a logística reversa são encontrados nas décadas de 1970 e 1980. No entanto, somente a partir da década de 1990 esse tema ganhou mais visibilidade no cenário empresarial. Dessa forma, as empresas começaram a pensar em estratégias para encontrar uma solução operacional de devolução das embalagens pós-consumo (Leite, 2009).

Entende-se a logística reversa como a área da logística empresarial que planeja, opera e controla as informações logísticas correspondentes, do retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, por meio dos canais de distribuição reversos, agregando-lhes valor de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros (Leite, 2009).

No Brasil, a logística reversa é atualmente regulamentada pela lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de

Resíduos Sólidos e criou o Programa Nacional de Logística Reversa; esta pode ser definida como

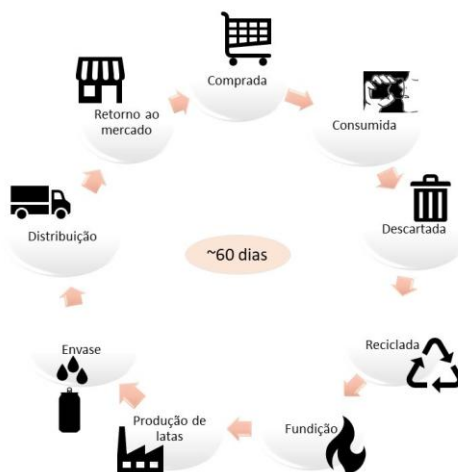
[...] instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado pelo conjunto de ações, de procedimentos e de meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou para outra destinação final ambientalmente adequada (Brasil, 2010).

Segundo Lacerda (2002), a logística reversa pode ser entendida como um processo complementar à logística tradicional, pois enquanto a última tem o papel de levar produtos dos fornecedores até os clientes intermediários ou finais, a logística reversa deve completar o ciclo, trazendo de volta os produtos já utilizados dos diferentes pontos de consumo à sua origem. No

processo da logística reversa, as embalagens passam por um processo de reciclagem e retornam novamente a cadeia, até finalmente serem descartadas, chegando ao seu destino final, percorrendo o "ciclo de vida do produto".

Para as latas de alumínio, esse ciclo é de aproximadamente 60 dias, que compreende o descarte até a geração de uma nova lata. Conforme mostrado na Figura 1, a lata é comercializada, consumida, descartada e encaminhada para a reciclagem. Nas recicladoras, a carga passa por um detector de radiação e é lavada para retirada das impurezas. Os fragmentos são conduzidos ao forno para derretimento, solidificados em forma de lingotes, que são conduzidos para laminação e transformados em chapas finas de alumínio. Após o processo, as chapas são transformadas em latas, que recebem o líquido para consumo e retornam para o mercado (Abралatas, 2023).

Figura 1 - Ciclo de vida das Latas de alumínio



Fonte: Cempre, 2020 (adaptado pelos autores).

Esse ciclo pode ser repetido inúmeras vezes, sendo essa uma das características que possibilitam uma combinação única de vantagens para o alumínio, mostrando que além da proteção ambiental também tem a economia de energia elétrica, que é um importante recurso da cadeia econômica (ABAL, 2007a). Dados da ABAL e CNI (2012) afirmam que em 2010, a cadeia do alumínio no Brasil gerou cerca de 384 mil postos de trabalho, diretos e indiretos, que incluem atividades desde a coleta até a reciclagem do alumínio.

2.2 Etapas de produção do alumínio a partir da bauxita

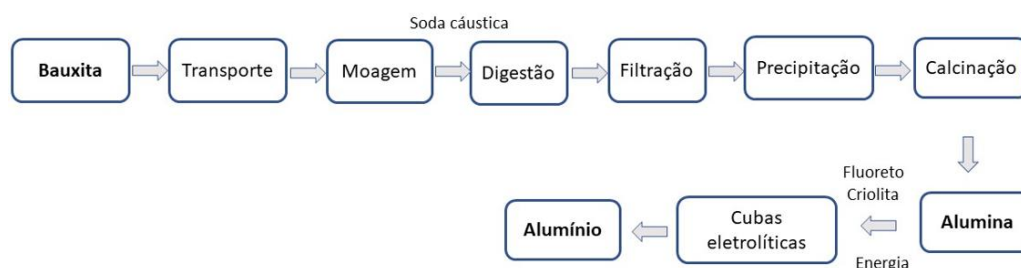
O alumínio foi descoberto por Sir Humphrey Davy no ano de 1809, tendo sido isolado pela primeira vez em 1825 por H. C. Oersted, mas apenas em 1886 foi desenvolvido um procedimento industrial econômico. Neste ano, dois cientistas trabalhando independentemente, Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, e Paul Louis Héroult, na França, inventaram o mesmo processo eletrolítico para reduzir a alumina em alumínio (ABAL, 2007a).

O Brasil tem grande capacidade de produção de alumínio, visto que além da abundante reserva de bauxita (possui a terceira maior reserva do mundo), conta também com fontes de energia elétrica, como a proveniente das usinas hidrelétricas, que é um insumo primordial para se obter o alumínio primário pela reação de eletrólise (ABAL, 2007a). O elemento alumínio existe na crosta terrestre em formato de óxido de alumínio (Al_2O_3). O minério industrial mais importante é a

bauxita, com teor de alumina de 35% a 45%; suas jazidas estão distribuídas principalmente em áreas tropicais, no Brasil estão concentradas na região amazônica (ABAL, 2007a).

A obtenção do alumínio a partir da bauxita ocorre em três etapas: mineração, refino e redução (ABAL, 2007a). A bauxita é extraída, lavada e seca antes de ser enviada para refinarias que produzem o alumínio, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Etapas de produção do alumínio



Fonte: WAO, 2003 (adaptado pelos autores).

Após a etapa de mineração, que inclui a extração da bauxita e a moagem das rochas, são empregados métodos de refino da bauxita, denominados Bayer, de onde é obtida a alumina, precursora do alumínio. O processo Bayer envolve a digestão da bauxita em hidróxido de sódio concentrado (soda cáustica), em temperaturas de até 270° C. Na digestão, a maioria dos minerais que contêm alumínio é dissolvida, deixando um resíduo insolúvel (conhecido na indústria de produção de alumínio como lama vermelha, ou *red mud*). Esse resíduo é removido por filtração, denominado etapa de clarificação (WAO, 2003).

Na etapa de redução ocorre a obtenção de alumínio metálico a partir da alumina. Esse processo foi desenvolvido simultaneamente por C. M. Hall e P. L. Héroult, nos Estados Unidos e na França, no final do século XIX. O processo Hall-Héroult promove a redução da alumina (óxido de alumínio: Al_2O_3) em banho criolítico e consome cerca de 14,8 kWhcc (média brasileira) para a produção de um quilo de alumínio primário (ABAL, 2007a).

A reação de óxido-redução ocorre em cubas eletrolíticas, por meio da passagem de corrente elétrica, que atua na quebra da estrutura do óxido de alumínio e liberação dos átomos de Al para que possam se agrupar na forma metálica (ABAL, 2007a).

Com o objetivo de facilitar e otimizar as condições operacionais, a alumina é dissolvida em

um banho eletrolítico rico em criolita (Na_3AlF_6) que atuará dissolvendo a alumina e aumentando a condutividade elétrica do sistema. O banho é composto por fluoreto de alumínio (AlF_3), fluoreto de cálcio (CaF_2) e, em alguns casos, contendo fluoreto de lítio e/ou de magnésio (ABAL, 2007a).

Como mostrado, a produção do alumínio, a partir da mineração de bauxita, envolve diversas etapas, que demandam matéria-prima, reagentes, energia elétrica e água, além de produzir resíduos. Buscando-se alternativas menos impactantes ao ambiente surgiu a Química Verde, que visa reformular métodos de fabricação e uso de produtos químicos, resultando em ar e água mais limpos e menos resíduos perigosos. Além disso, pode levar à economia de custos, com a redução de descarte, tratamento de resíduos e menor necessidade de matéria-prima, pela utilização de fontes renováveis (Slootweg, 2024).

2.3 A química verde e seus 12 princípios

A Química Verde (QV) foi citada pela primeira vez em 1991, pelos químicos da EPA (U.S. Environmental Protection Agency), John Warner e Paul Anastas, que a definiram como “um conjunto de princípios para reduzir ou eliminar a utilização ou geração de substâncias perigosas na concepção, fabrico e aplicação de produtos químicos” (Anastas; Warner, 1998).

Em 1993, a União Internacional de Química

Pura e Aplicada (IUPAC) reconheceu e aprovou a criação da Química Verde, que foi definida como "a invenção, desenvolvimento e aplicação de produtos e processos químicos para reduzir ou eliminar o uso e geração de substâncias nocivas" (Anastas; Warner, 1998).

Com a finalidade de se planejar ou reformular rotas sintéticas de tal forma a torná-las menos, ou nada, contaminantes, a Química Verde estabeleceu 12 princípios básicos que norteiam o planejamento de sínteses (Anastas; Warner, 1998; Trost, 1991), conforme destacados a seguir:

- 1 Prevenção: evitar a produção do resíduo é melhor do que tratá-lo ou "limpá-lo" após seu uso;
- 2 Economia de Átomos: deve-se procurar desenhar metodologias sintéticas que possam maximizar a inclusão de todos os materiais de partida no produto final;
- 3 Síntese de Produtos Menos Perigosos: procurar praticar sempre a síntese de um produto químico que deve utilizar e gerar substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente;
- 4 Desenho de Produtos Seguros: os produtos químicos devem ser desenhados de tal modo que realizem a função desejada e ao mesmo tempo não sejam tóxicos;
- 5 Solventes e Auxiliares mais seguros: a utilização de substâncias auxiliares (solventes, agentes de separação, secantes, etc.) precisa, sempre que possível, tornar-se desnecessário e, quando utilizadas, estas substâncias devem ser inócuas;
- 6 Busca pela Eficiência de Energia: a utilização de energia elétrica pelos processos químicos precisa ser reconhecida pelos seus impactos ambientais e econômicos e deve ser minimizada; se possível, os processos químicos devem ser conduzidos à temperatura e pressão ambientes;
- 7 Uso de Fontes Renováveis de Matéria-Prima: sempre que a técnica é economicamente viável, a utilização de matérias-primas renováveis deve ser escolhida em detrimento de fontes não-renováveis;
- 8 Evitar a Formação de Derivados: a derivatização desnecessária (uso de grupos bloqueadores, proteção/desproteção, modificação temporária por processos físicos e químicos) deve ser minimizada ou, se possível, evitada, porque estas etapas requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos;
- 9 Catálise: Reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são melhores que reagentes estequiométricos;
- 10 Desenho para a Degradação: os produtos

químicos precisam ser desenhados de tal modo que, ao final de sua função, se fragmentem em produtos de degradação inócuos e não persistam no ambiente;

11 Análise em Tempo Real para a Prevenção da Poluição: será necessário o desenvolvimento futuro de metodologias analíticas que viabilizem um monitoramento e controle dentro do processo, em tempo real, antes da formação de substâncias nocivas;

12 Química Intrinsecamente Segura para a Prevenção de Acidentes: as substâncias, bem como a maneira pela qual uma substância é utilizada em um processo químico, devem ser escolhidas a fim de minimizar o potencial para acidentes químicos, incluindo vazamentos, explosões e incêndios.

A QV estabeleceu formas de se avaliar a eficiência das reações químicas; para isso, além de se verificar o cumprimento dos 12 princípios, também utiliza outras ferramentas denominadas de métricas (Machado, 2014), que são classificadas como métricas de massa e holísticas. As métricas de massa referem-se ao bom aproveitamento dos átomos aportados pelos reagentes ou mais genericamente, dos materiais utilizados. Esse reprocessamento envolve dois aspectos:

- 1 os produtos da reação contêm átomos reagentes, limitando a sua perda em resíduos;
- 2 são feitos esforços para poupar materiais através da implementação de reações químicas e para minimizar a quantidade de materiais auxiliares (reagentes, solventes etc.) necessários para a realização de reações químicas, que na maioria dos casos acabam por produzir resíduos.

As métricas holísticas são ferramentas que têm o propósito de analisar o cumprimento de cada um dos 12 princípios da Química Verde relevantes para a situação sob análise, a partir de parâmetros definidos. Machado (2014) as denomina: Quadro Verde, Matriz Verde, Círculo Verde e Estrela Verde.

3 METODOLOGIA

O trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica consultando o livro *Logística Reversa - meio ambiente e competitividade*, escrito por Paulo Roberto Leite (2009), que aborda sobre a logística reversa de pós-consumo e pós-venda, identificando os impactos econômicos, preocupações ambientais e responsabilidade social.

Realizou-se um levantamento de informações em artigos e sites acerca dos processos de produção do alumínio obtido a partir da mineração de bauxita e da reciclagem, denominados, respectivamente, de alumínio primário e secundário.

Com base no estudo dos livros *Green Chemistry: Theory and Practice*, de Paul Anastas e John Warner (1998) e *Introdução às Métricas da Química Verde – uma visão sistêmica* do autor Adélio Machado (2014), analisaram-se os processos de produção do alumínio em relação ao cumprimento dos princípios da Química Verde, considerando-se principalmente a geração de resíduos e a economia de recursos naturais. Aplicando-se as métricas de massa (Fator E e economia atômica) e a métrica holística (Estrela Verde), foi possível determinar a verdura química e comparar os dois processos. O cálculo do Fator E foi proposto por Sheldon (1992) e relaciona as massas dos resíduos gerados e dos produtos efetivamente formados, conforme mostrado na equação 1.

$$\text{Fator } E = \frac{\text{massa dos resíduos (Kg)}}{\text{massa dos produtos (Kg)}} \quad (\text{Equação 1})$$

Um fator E mais elevado significa mais desperdício e, conseqüentemente, maior impacto ambiental negativo, sendo ideal fator E igual a zero. Este fator pode ser calculado para um determinado produto, local de produção, ou mesmo para uma empresa inteira, a partir do conhecimento do número de toneladas de matérias-primas adquiridas e o número de toneladas de produto gerados (Sheldon, 2017).

O conceito de economia atômica, proposto por Trost (1991), destaca que a reação ideal seria aquela em que toda a massa dos reagentes está contida no produto, ou seja, deve-se procurar desenvolver metodologias que possam maximizar a incorporação dos materiais de partida no produto final. A Estrela Verde (EV) é denominada como uma métrica holística, de natureza gráfica, que aplica os princípios da Química Verde conforme cada situação de estudo. O gráfico é construído no formato de estrela e o número de pontas pode variar de acordo com o número de princípios em análise. Cada ponta da estrela é preenchida de acordo com o cumprimento do princípio, recebendo o valor 1, 2 ou 3, crescente com a verdura, com os seguintes significados:

3 Plenamente verde (caso ideal);

2 Moderadamente verde (aceitável);

1 Ausência total de verdura química (casos malignos) (Machado, 2014).

As estrelas foram representadas apenas com 10 dimensões, cada um referente a um princípio da QV, sendo que os princípios 4 e 11 foram excluídos, já que não foi realizada a concepção de novos produtos químicos, à qual estes princípios se aplicam. Calcularam-se os Índices de Preenchimento da Estrela (IPE), equação 2, definido como a porcentagem de área verde da estrela relativamente à área de uma estrela de verdura máxima:

$$\text{IPE} = 100 \times \frac{\text{área verde da estrela}}{\text{área verde da estrela de verdura máxima}}$$

(Equação 2)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Comparação das formas de obtenção do alumínio e seus impactos ambientais

Para se analisar os processos de obtenção das chapas de alumínio a partir da bauxita (alumínio primário) e o proveniente do processo de reciclagem das latas de alumínio (alumínio secundário), foram elaborados os esquemas mostrados na Figura 3. Analisando-se os esquemas, se percebe diferenças significativas entre os dois processos, principalmente em relação ao uso de recursos naturais e à produção de rejeitos.

O primeiro esquema da Figura 3 mostra, resumidamente, a obtenção do alumínio a partir da extração da bauxita e as suas etapas de fabricação. A bauxita é extraída, passando por uma fase de separação (mineração), esse processo tem como objetivo a obtenção da alumina, mas é gerado também o Rejeito 1, composto basicamente por argila.

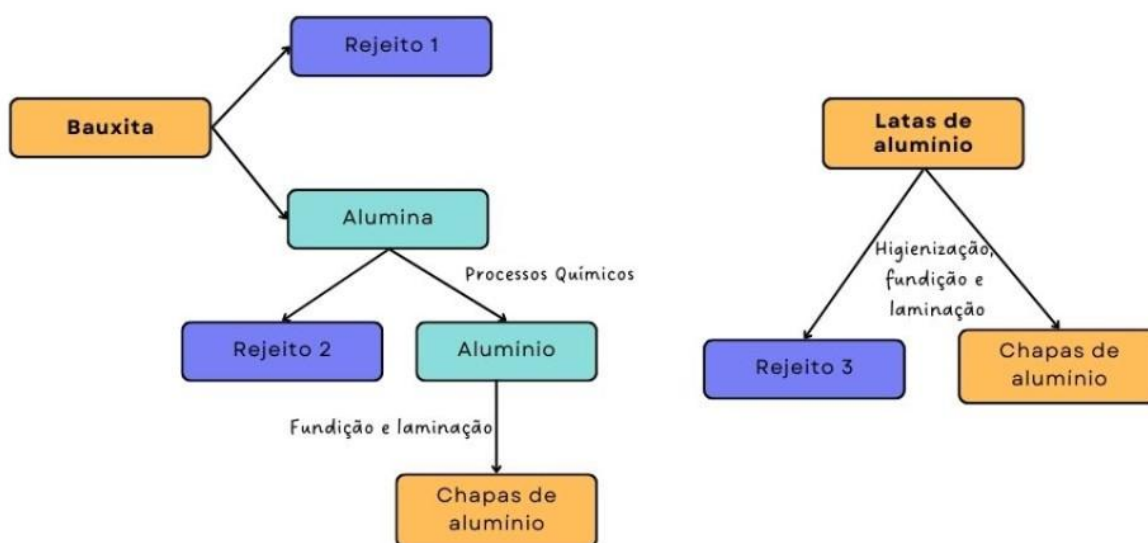
Os impactos ambientais gerados no solo quando se extrai a bauxita e devolve-se a argila, levam em conta que quase todas as minerações se baseiam em trabalhos que envolvem movimentação de terras e escavações. Nessas atividades estão também o desflorestamento, a alteração da superfície topográfica da paisagem, com a ausência ou degradação das camadas superficiais do solo que gera erosão, compactação, acidificação, salinização, esgotamento de nutrientes, exaustão do solo, diminuição do carbono orgânico e da

biodiversidade, além da desestabilização de encostas e alterações dos corpos d'água e de níveis de lençol freático (Kopezinsk, 2000; Lal, 1998).

A legislação de muitos países, especialmente na América do Norte e Europa, exige uma incorporação de medidas de recuperação no plano de fechamento de minas com a conservação e reposição do solo original para a área degradada, pois sabe-se que a camada superficial de solo

contém matéria orgânica, microrganismos e banco de sementes (Hall, 2002). Porém, em várias partes das áreas de mineração, o solo superficial não é estocado, ou o tempo de armazenamento reduz enormemente seu potencial regenerativo. Além do mais, o transporte de substratos para a recomposição topográfica e cobertura do solo é a etapa de maior custo no plano de fechamento de mina (Guimarães, 2005).

Figura 3 - Esquemas das formas de obtenção do alumínio a partir da bauxita e da reciclagem de latas



Fonte: Abralatas (2023); ABAL, 2007b (adaptado pelos autores).

No Brasil, a Lei nº 6.938/1981, da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA, 1981), que regulamenta as atividades de mineração no país, cita sobre a recuperação de áreas degradadas como um dos seus princípios (Art. 2, inciso VIII). O envio do Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD) durante o processo de licenciamento é uma exigência estabelecida pelo Decreto lei nº 97.632/1989, que regula a exploração de recursos minerais (Brasil, 1981; 1989).

Ainda analisando o primeiro esquema da Figura 3, observa-se que após o refino da bauxita é gerado o Rejeito 2, conhecido como lama vermelha, ou *red mud*, que é armazenado em lagos de rejeito. Este rejeito contém quantidades de aluminato de sódio e soda cáustica. Ao ser depositada no lago, a lama decanta e a camada superficial de água é bombeada de volta ao processo, sendo utilizada na lavagem dos filtros e na limpeza das áreas gerais da fábrica (para tentar maximizar a recuperação de aluminato de sódio) (WAO, 2006).

Esses resíduos decantados caracterizam-se por serem lamas formadas por partículas finas contendo substâncias químicas como, por exemplo, a soda cáustica. Quando decorrentes de falhas no armazenamento em lagoas de armazenamento, representam uma série de riscos ambientais como a contaminação de solo, águas, além de danos à saúde (Fahey; Newson; Fujiyasu, 2002; Vick, 1983).

Sendo assim, o potencial de impacto sobre o meio ambiente é alto, devido aos riscos de contaminação do solo e do lençol freático. A área de disposição final necessária é grande, 40 a 80 hectares em média (Silva Filho; Alves; Da Motta, 2007). Esses custos são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, que é feita normalmente utilizando-se membranas plásticas ou com a aplicação de camada de material impermeável (Silva Filho; Alves; Da Motta, 2007).

Antigamente a lama vermelha era simplesmente descartada em algum corpo hídrico receptor, como mares e rios (Kirkpatrick, 1996). No

entanto, a sua disposição inadequada pode acarretar em ocasionar problemas relacionados à contaminação da água de superfície e subterrânea por NaOH, ferro, alumínio ou outras substâncias, contato com animais, plantas e seres humanos, formação de nuvens de poeira alcalina e impacto visual (Silva Filho; Alves; Da Motta, 2007).

No Brasil, dois acidentes mostram os riscos associados à disposição dos resíduos em barragens de rejeitos de mineração. Um rompimento aconteceu em 2015, no município de Mariana/MG, distrito de Bento Gonçalves, causado pela Mineradora Samarco Mineração S.A, e o outro em 2019, em Brumadinho/MG, da Mineradora Vale S.A (Rocha, 2021).

As consequências desses desastres afetaram tanto a disponibilidade de água como a qualidade de vida da população, além de impactar o solo e a vegetação. Houve uma alteração drástica em todo o ecossistema, com o solo e a água apresentando alcalinidade elevada devido às minas, toxicidade e acúmulo de sedimentos (Rocha, 2021).

No segundo esquema da Figura 3 são mostradas, resumidamente, as etapas de reciclagem do alumínio. O processo de fusão gera grandes quantidades de resíduos e perdas metálicas. A escória do alumínio (dross), identificado como Rejeito 3, é um resíduo perigoso, que também pode ser chamado, de acordo com os teores de alumínio presentes, de borra branca ou borra preta (salt cake). As escórias são basicamente compostas por: alumínio metálico (65% a 75%), óxido de alumínio (25% a 30%), carvão de alumínio (2% a 3%), nitreto de alumínio (3% a 5%), óxido de ferro (0,5% a 2%) e óxido de silício (0,5% a 1,5%) (ABAL, 2007b). Estima-se que no ano de 2005, o Brasil tenha produzido 170.000 toneladas de escória de alumínio (ABAL, 2007b).

Devido à elevada presença de alumínio metálico nas escórias, este tipo de resíduo é passível de comercialização por empresas licenciadas; desta forma, o valor oriundo dessa comercialização pode ser contabilizado pelas organizações como receita ambiental (Diniz, 2007).

4.2 Análise da produção do alumínio sob a perspectiva da química verde

Os processos de produção de alumínio primário e secundário foram comparados de acordo com os princípios da QV e aplicadas as

métricas de massa. Analisando-se os dois processos de obtenção do alumínio, sob a perspectiva da QV, identificou-se que ao se obter o alumínio a partir da reciclagem, o princípio 1 da QV é atendido, pois deixa-se de produzir a lama vermelha, ou seja, há a prevenção da formação do resíduo que necessitará de tratamento ao final da linha de produção. Esse princípio destaca que “Evitar a produção do resíduo é melhor do que tratá-lo ou ‘limpá-lo’ após sua geração” (Anastas; Warner, 1998).

Dupont (2000) afirma que a redução da formação de resíduos, destacado no princípio 1, é a maneira mais eficiente de minimizar o impacto ambiental resultante de uma atividade industrial. Devido à legislação rigorosa, que exige baixos níveis de emissão em atividades da indústria, se investe muito no tratamento de resíduos sólidos e líquidos, que nem sempre resolve satisfatoriamente o problema. A partir do momento em que se investe em tecnologias mais limpas de produção, não há necessidade de investimentos pesados no tratamento de resíduos que nem sempre resolvem satisfatoriamente o problema (Lenardão *et al.*, 2003).

A lama vermelha gerada pode chegar ao dobro da quantidade de alumina produzida. A cada tonelada de alumina são geradas entre 0,3 e 2,5 toneladas de lama vermelha. No mundo são produzidas anualmente cerca de 90 milhões de toneladas (Wang; Ang; Tadé, 2008).

Apesar da lama vermelha não ser considerada tóxica, segundo a Environmental Protection Agency (EPA), devido à sua elevada alcalinidade e capacidade de troca catiônica pode causar sérios danos ambientais (Collazo *et al.*, 2005). Dessa forma, a sua disposição precisa ser feita em locais adequados, geralmente em lagoas de disposição, que são construídas com técnicas de elevado custo, impedindo-se a ocorrência de lixiviação de seus componentes e a consequente contaminação dos corpos d'água da superfície e das águas subterrâneas (Wang; Ang; Tadé, 2008).

O princípio 2 trata da economia de átomos e observa que com a reciclagem do alumínio evita-se a formação de diversos tipos de resíduos. Na indústria do alumínio são gerados diversos resíduos sólidos, dos quais os principais são: resíduo de bauxita (RB), cinzas, resíduo gasto de cuba (RGC), alumina de varrição e carvão de escumagem. Segundo estimativa de Misra, Rath e Paramguru (2004), para cada 1 tonelada de alumínio são gerados de 1 a 2,5 toneladas de resíduo de bauxita e a produção mundial anual

desse material está acima de 66 milhões de toneladas (Tsakiridis; Agatzini-Leonardou; Oustadakis, 2004).

Os princípios 1 e 2 são relacionados com as métricas de massa, sendo que uma das maneiras de avaliar a quantidade de resíduos gerados, por meio da aplicação do cálculo do fator de eficiência (Fator E), mostrada na Equação 1.

De acordo com a Tabela 1 pode-se observar

Tabela 1 - O Fator E relacionado ao tipo de atividade industrial

Tipo de indústria	Produção (ton/ano)	Fator E (kg de resíduo por kg de produto)
Refinaria petrolífera	10 ⁶ –10 ⁸	< 0,1
Química pesada	10 ⁴ –10 ⁶	< 1–5
Química fina	10 ² –10 ⁴	5–50
Química farmacêutica	10–10 ³	25–100

Fonte: modificado de Sheldon (2017)

A extração da bauxita é considerada como atividade da química pesada, dessa forma, possui valores de Fator E compreendidos entre 1 e 5. Considerando-se que, para cada 1 tonelada de alumínio são gerados de 1 a 2,5 toneladas de resíduo de bauxita (Misra; Rath; Paramguru, 2004), como também que o valor médio de geração de resíduos é igual a 1750 Kg, logo, de acordo com equação 1, o valor do Fator E é 1,75.

$$Fator\ E = \frac{1750\ kg}{1000\ Kg} = 1,75$$

Segundo Machado (2014), uma desvantagem do Fator E é que ele envolve apenas a quantidade de resíduo formado, sem considerar a sua natureza, pois não é uma medida rigorosa dos seus impactos, logo, não atende à toxicidade dos resíduos e às necessidades do seu tratamento. Portanto, o Fator E é considerado especificamente uma métrica de massa, referente aos materiais usados no processo, ignorando os outros variados aspectos que influenciam a verduza química, exigindo o emprego de outros tipos de métricas, como, por exemplo, a economia atômica.

Um equívoco que pode ocorrer ao calcular o Fator E é em relação à exclusão da água como resíduo. Por exemplo, quando se considera um solvente aquoso são contabilizados somente os compostos dissolvidos ou materiais em suspensão. Se a água for classificada como resíduo os valores do Fator E serão mais elevados

que as indústrias com produção em grande escala, como a refinaria petrolífera, possuem Fator E pequeno (< 0,1), indicando a otimização dos processos. No entanto, as indústrias como a Química farmacêutica, que utilizam processos mais refinados, como etapas de purificação e separação de produtos, possuem Fator E grande (25 – 100) (Sheldon, 1992).

(Machado, 2014). Para se justificar a omissão da água são apontados dois motivos: 1º) é um composto inócuo para o ambiente; 2º) o maior uso da água ocorre em geral no *work-up* (separações de fases, lavagens e outros) e não necessariamente na reação química (Machado, 2014). No entanto, a omissão da água como resíduos merece reserva, principalmente em processos que exigem água com determinado grau de pureza (como na indústria farmacêutica), pois demandam gastos com a purificação (energia elétrica, reagentes, equipamento etc.), e também quando é gerado um efluente contendo água e solventes orgânicos, exigindo-se energia elétrica para se efetuar as etapas de separação (Machado, 2014).

Contudo, a intenção original do Fator E, e de outras métricas baseadas em massa, era dar atenção à ineficiência de muitos processos químicos e o fato de que esta é a causa direta da geração de grandes quantidades de resíduos, por exemplo, na indústria de química fina e indústrias farmacêuticas. No entanto, o impacto ambiental dos resíduos deve ser considerado (Sheldon, 2017).

A economia atômica é uma métrica que permite avaliar a verduza atômica, dessa forma, consideram-se os átomos reagentes presentes nos produtos, que impedem sua perda em coprodutos. A ideia de economia atômica identificou a importância de aumentar a fração de átomos de reagentes englobados no produto final; nesse caso não se produziria resíduos

(Trost,1991).

Em uma situação ideal, do produto ser obtido a partir do reagente em proporções estequiométricas, incorporando todos os átomos dos reagentes, a utilização atômica atingiria valor ideal de 100%. Na prática, porém, na grande maioria das sínteses, a porcentagem obtida é sempre inferior a esse valor (Machado, 2014).

Apesar do Fator E possuir um valor baixo (1,75), quando comparado às reações de síntese (química fina e farmacêutica), ao se levar em consideração que aproximadamente 0,5 tonelada de alumínio metálico é produzida por tonelada de alumina (Buchner *et al.*,1989), pode-se concluir que a reação de produção de alumínio ocorre com 50% de rendimento, ou seja, metade da quantidade empregada como reagente de partida acaba sendo descartada como resíduo ao final do processo.

Em contrapartida, no segundo esquema da Figura 3 é mostrada a obtenção do alumínio a partir da reciclagem das latas, se comparado ao primeiro esquema observa-se significativa redução da quantidade de etapas, pois basicamente na reciclagem as latas são recebidas na indústria, lavadas e direcionadas para as etapas de fundição e laminação.

A utilização de alumínio reciclado reduz o

consumo de recursos naturais comparado ao alumínio primário (ABAL; CNI, 2012), uma vez que consome menos bauxita, possui menos etapas produtivas que o alumínio primário, além de utilizar menos energia elétrica e água no processo produtivo. A redução do consumo de energia é especialmente relevante nesse mercado, uma vez que é responsável por parcela relevante do custo de produção do alumínio primário (cerca de 29% do custo de produção (Cardoso, 2011), sendo um fator decisivo na competitividade da indústria.

Com a realização da reciclagem das latas de alumínio, reduz-se as emissões de gases do efeito estufa (CO₂), além do uso de energia elétrica e água em relação à produção de alumínio primário. De acordo com o estudo realizado por Gatti, Queiroz e Garcia, do Centro de Tecnologia de Embalagens (Cetea/Ital, 2007), a economia desses recursos torna-se mais expressiva à medida que a taxa de reciclagem aumenta. Conforme mostrado na Tabela 2, caso a reciclagem das latas fosse de 95%, se promoveria a redução de, aproximadamente, 73% no consumo de energia elétrica, 58% de água e de 90% na bauxita. Além disso, a emissão de CO₂ diminui cerca de 70% em comparação à produção utilizando-se 100% de matéria-prima virgem.

Tabela 2 - Porcentagem de alumínio reciclado, economia de recursos e geração de gases

Alumínio reciclado (%)	Consumo de energia elétrica (%)	Consumo de água (%)	Consumo de bauxita (%)	Emissões de CO ₂ (%)
50	-40	-32	-50	-39
95	-73	-58	-90	-70

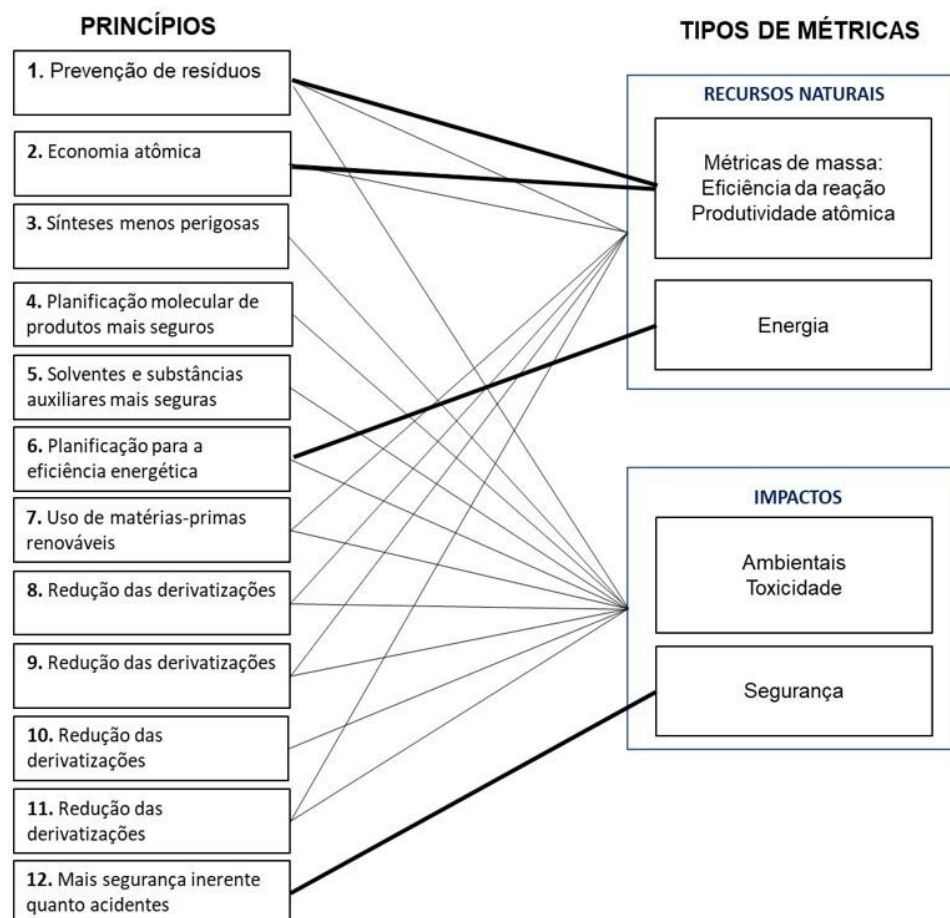
Fonte: Gatti; Queiroz; Garcia (Cetea/Ital, 2007)

Observando-se esses dados, sob a perspectiva da Química Verde, a adoção da reciclagem atende o princípio 6, que destaca a eficiência energética dos processos, pois, nos dois cenários apresentados (50% e 95%), a reciclagem impacta na redução do consumo de energia elétrica, representando uma das principais vantagens da reciclagem das latas. Wallace (2011), afirma que a produção do alumínio a partir da reciclagem, consome apenas 5% da energia elétrica que seria necessária para produzir o metal a partir da extração da bauxita. Isso representa uma economia anual para o país estimada em 1%, cerca de 4,5 mil GWh ou 5% da geração anual de Itaipu. Portanto, pode-se afirmar que a reciclagem das latas de alumínio é extremamente relevante, pois o processo consome menos energia elétrica,

evita a extração da bauxita e geração da lama cáustica. Além disso, também há uma diminuição da produção de gases poluentes.

Relacionando-se o processo de reciclagem com os princípios da Química Verde, se identificou nesse estudo maior evidência no cumprimento dos princípios 1, 2 e 6. Na Figura 4 são mostradas as relações estabelecidas entre os princípios e as métricas. Segundo Machado (2014) existe uma rede de interligações em que cada métrica depende de vários princípios: os traços mais grossos indicam relações mais nítidas entre os princípios e as métricas; os finos representam relações menos intensas entre as métricas de recursos (massa e energia) e métricas de impacto (ambientais, toxicidade e segurança).

Figura 4 - Relações entre os 12 Princípios e os tipos de métricas



Fonte: adaptado de Machado (2014).

Dessa forma, pode-se verificar que os princípios indicados anteriormente, como os contemplados pela a logística reversa (princípios 1, 2 e 6), são também apontados por Machado (2014) como sendo os mais importantes sob o aspecto dos recursos naturais; e é possível verificar que os princípios 1 e 6 são também atribuídos às métricas de impacto ambiental e toxicidade. No caso da extração da bauxita, os resíduos produzidos contêm, por exemplo, o hidróxido de sódio, e outros considerados impactantes ao ambiente. De acordo com a Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ), o hidróxido de sódio é uma substância perigosa para o meio ambiente, em especial os organismos aquáticos, que, quando em contato com a água ou o solo, causa elevação do pH, modificando o local e interferindo no ambiente, causando prejuízos à fauna (HQuímica, 2015).

Comparação da produção de alumínio primário e secundário utilizando a Estrela Verde

A Estrela Verde (EV) é uma métrica holística empregada para indicar a verdura química de um

processo. Ela possui até 12 pontas que representam os princípios da QV analisados. Cada ponta é preenchida de acordo com o cumprimento do princípio recebendo o valor 1, 2 ou 3. Por exemplo, receberá pontuação 3 quando o princípio for integralmente cumprido e pontuação 1, a situação mais desfavorável ou de maior perigo. O maior o Índice de Preenchimento da Estrela (IPE) indica a verdura máxima (Ribeiro; Yunes; Machado, 2014).

Para se caracterizar os perigos inerentes de cada reagente químico, utilizados para a produção do alumínio primário (Tabela 3) e secundário (Tabela 4), foram consultadas as fichas de segurança de produtos químicos (FISPQ) que fornecem informação quanto à segurança, saúde, proteção e ao meio ambiente. Quanto maior a pontuação, maior o impacto da substância, conforme descrito por Ribeiro, Costa e Machado (2010).

Os perigos associados às substâncias são identificados pelos códigos mostrados nas Tabela 3 e 4. A letra H indica perigo, os números 2, 3 e 4,

indicam perigos físicos, à saúde e meio ambiente, respectivamente; os dois números seguintes são decorrentes das propriedades intrínsecas da substância ou mistura, por exemplo, propriedades explosivas (códigos de 200 a 210), inflamabilidade (código de 220 a 230), entre outros (Merck, 2024). Os critérios para classificar os perigos das substâncias são estabelecidos de acordo com o Sistema Mundial Harmonizado de Classificação e

Rotulagem de Produtos Químicos (GHS, 2017), regulamento (EC) nº 1272/2008. A regulamentação GHS classifica as substâncias e misturas de acordo com os seus perigos intrínsecos (físicos, para a saúde e para o ambiente). Cada classe é dividida em diversas categorias de perigo de acordo com a severidade (grau de risco).

Tabela 3 - Classificação das substâncias utilizadas na obtenção do alumínio primário

Substância	Perigos	Grau de risco
NaOH - hidróxido de sódio	H290 Físico	2
	H314 Saúde	3
	H402 Ambiente	3
Na ₃ AlF ₆ – criolita	H332 Saúde	2
	H372 Saúde	3
	H411 Ambiente	3
AlF ₃ – Fluoreto de alumínio	H303 Saúde	3
CaF ₂ – fluoreto de cálcio	H303 Saúde	3

Fonte: Merck (2024)

Tabela 4 - Classificação das substâncias utilizadas na obtenção do alumínio secundário

Substância	Perigos	Grau de risco
Al metálico	H228 físico	2
	H261 físico	2
Al ₂ O ₃ – óxido de alumínio	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a Directiva 67/548/CEE.	0
Al ₄ C ₃ - carbetto de alumínio	H228 físico	2
	H261 físico	2
	H315 saúde	2
	H319 saúde	2
	H335 saúde	2
AlN - nitreto de alumínio	H315 saúde	2
	H319 saúde	2
	H335 saúde	2
Fe ₂ O ₃ óxido de ferro	Não é uma substância ou uma mistura perigosa.	0
Si ₂ O - óxido de silício	Não é uma substância ou uma mistura perigosa.	0

Fonte: Merck (2024)

Com as informações das Tabelas 1 e 2, foram construídos, respectivamente, os Quadros 1 e 2, atribuindo pontuação EV, que serviu para a elaboração da Estrela Verde (Figura 5). A pontuação da EV foi atribuída de acordo com

critérios atendidos para cada princípio; logo, a pontuação 3 indica que o princípio foi integralmente cumprido e, conseqüentemente, em menor grau a pontuação 1 (Ribeiro; Yunes; Machado, 2014).

Quadro 1 - Componentes e pontuações para a construção da estrela verde do alumínio primário
(p=pontuação, grau de preenchimento da EV)

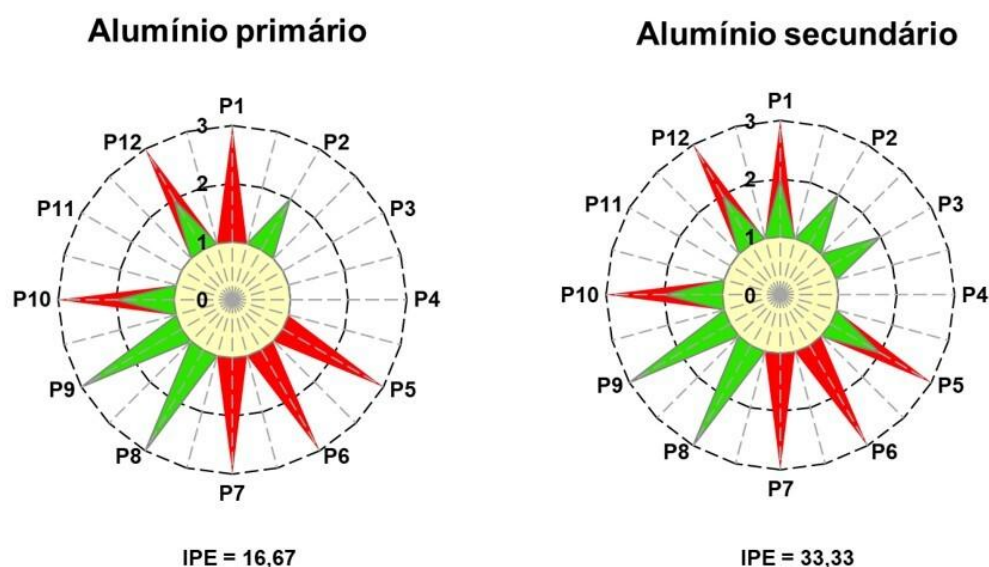
Princípios da QV	CrITÉrios	Pontuação EV
P1 – Prevenção	Formação de pelo menos um resíduo que envolva perigo moderado para a saúde e ambiente (p = 3)	1
P2 – Economia atômica	Reação em reagentes sem excesso e conformação de coprodutos	2
P3 – Sínteses menos perigosas	Pelo menos uma substância envolvida apresenta risco elevado para a saúde (p=3)	1
P5 – Solventes e outras substâncias auxiliares seguras	Pelo menos um dos solventes ou uma das substâncias auxiliares envolvidas envolve perigo elevado para a saúde e ambiente (p=3)	1
P6 – Eficiência energética	Pressão diferente da ambiente e/ou temperatura muito afastada do ambiente	1
P7 – Uso de matérias-primas renováveis	Nenhum dos reagentes envolvidos é renovável, não se considera a água	1
P8 – Redução de derivatizações	Sem derivatizações ou com uma etapa	3
P9 -Catalisadores	Não se usam catalisadores ou os catalisadores são inócuos	3
P10 – Planificação para degradação	Todas as substâncias envolvidas que não são degradáveis podem ser tratadas para obter a sua degradação com os produtos de degradação inócuos	2
P12 – Prevenção de acidentes	As substâncias envolvidas apresentam perigo elevado de acidente químico (p=3, considerando os perigos para a saúde e perigos físicos)	2

Fonte: Ribeiro, Yunes e Machado (2014).

As Estrelas Verdes para a obtenção do alumínio primário e secundário foram construídas em

planilhas disponibilizadas por Ribeiro (2014) e são mostradas na Figura 5.

Figura 5 - Estrelas Verdes obtidas para a produção do alumínio primário e secundário



Fonte: autoria própria.

Quadro 2 - Componentes e pontuações para a construção da estrela verde do alumínio secundário (p=pontuação, grau de preenchimento da EV)

Princípios da QV	CrITÉrios	Pontuação EV
P1 – Prevenção	Formação de pelo menos um resíduo que envolva perigo moderado para a saúde e ambiente (p=2, Tabela 1, sem nenhum que envolva p=3)	2
P2 – Economia atômica	Reação sem reagentes em excesso e conformação de coprodutos	2
P3 – Sínteses menos perigosas	As substâncias envolvidas apresentam perigo moderado para a saúde e ambiente (p=2 pelo menos uma substância, sem substância com p=3)	2
P5 – Solventes e outras substâncias auxiliares seguras	Os solventes e substâncias auxiliares usadas envolvem perigo moderado para a saúde e ambiente (p=2 pelo menos uma substância, sem substância com p=3)	2
P6 – Eficiência energética	Pressão diferente da ambiente e/ou temperatura muito afastada do ambiente	1
P7 – Uso de matérias-primas renováveis	Nenhum dos reagentes envolvidos é renovável, não se considera a água	1
P8 – Redução de derivatizações	Sem derivatizações ou com uma etapa	3
P9 - Catalisadores	Não se usam catalisadores ou os catalisadores são inócuos	3
P10 – Planificação para degradação	Todas as substâncias envolvidas que não são degradáveis podem ser tratadas para obter a sua degradação com os produtos de degradação inócuos	2
P12 – Prevenção de acidentes	As substâncias envolvidas apresentam perigo moderado de acidente químico (p=2, pelo menos para uma substância, considerando os perigos para a saúde e físicos, sem substâncias com p=3).	2

Fonte: Ribeiro, Yunes e Machado (2014)

Comparando-se as duas estrelas é possível concluir que o alumínio secundário possui maior grau de preenchimento, 33,33%, enquanto o alumínio primário representa 16,67%. Apesar da produção a partir da reciclagem gerar a escória, os produtos utilizados no processo possuem menor impacto físico, à saúde e ao ambiente, conforme mostrado na Tabela 4. Além disso, a formação do alumínio secundário consome apenas cerca de 5% da energia elétrica necessária para se obter a mesma quantidade de alumínio primário. Na Estrela Verde não há maneira de incluir essa diferença, pois a reciclagem necessita da utilização de energia para realizar a fundição do metal, requerendo altas temperaturas, no entanto,

com consumo muito menor do que o processo de obtenção a partir do minério.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A logística reversa é um processo que abrange a devolução de itens, materiais ou resíduos do consumidor ao fabricante, com o objetivo de reintegrá-los ao ciclo de produção ou garantir um descarte apropriado, como a reciclagem. Esse processo está diretamente ligado à sustentabilidade e à diminuição do impacto ambiental, especialmente em cenários de vida útil reduzida, em que os produtos têm um período de utilização mais limitado.

Sendo assim, a extração da bauxita, que é o minério utilizado na produção do alumínio, representa significativos impactos ambientais devido às suas atividades de mineração. Seus impactos incluem a erosão do solo, destruição do ambiente natural, alterações no relevo, uso de recursos hídricos, geração de resíduos e impactos na qualidade da água e do ar.

Analisando-se os processos de obtenção do alumínio primário e secundário sob a perspectiva da Química Verde, foi possível verificar o cumprimento de três importantes princípios, são eles: 1– Prevenção; 2– Economia atômica e 6– Eficiência energética.

O princípio 1 destaca a prevenção da formação de resíduos provenientes da extração e posterior digestão da bauxita, o princípio 2 mostra que a reciclagem é um processo com maior economia atômica, visto que, com a reciclagem, são recuperadas maiores quantidades de alumínio em comparação com a produção a partir do minério, além da economia de água. O princípio 6 mostra a expressiva diferença de consumo de energia elétrica requerida para os dois processos.

Aplicando-se a métrica Estrela Verde é possível verificar que a logística reversa traz vantagens expressivas em comparação ao procedimento convencional de produção das latas de alumínio, pois a verduza do processo aumenta em 100% em relação ao método usual. A reciclagem não apenas economiza energia elétrica e água, mas também promove a redução das emissões de gases de efeito estufa, ou seja, é uma ação concreta que contribui para a preservação do meio ambiente e a manutenção dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. Comissão Técnica. Associação Brasileira do Alumínio, mai. 2007a. Disponível em https://www.academia.edu/14874898/Fundamentos_e_Aplicacao%3A7%C3%B5es_do_Aluminio. Acesso em: 20 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio**: geração e tratamento de escória. São Paulo: ABAL, 2007b, 80p. Disponível em: <https://fliphtml5.com/qxggt/mgnj/02-abal-conteudos-Geracao-e-Tratamento-de-Escoria/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE LATAS DE ALUMÍNIO. **O passo a passo na fabricação da lata de alumínio**. 2023. Disponível em: <https://www.abralatas.org.br/o-passo-a-passo-na-fabricacao-da-lata-de-aluminio/>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C.; **Green Chemistry**: Theory and Practice. New York: Oxford University Press. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.001.0001>

BARBIERI, J. C.; CAJAZEIRA, J. E. R. **Responsabilidade social e empresarial e empresa sustentável**: da teoria à prática. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 15 jun. 2023.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso: 18 out. 2023.

BUCHNER, W.; SCHIELBS, R.; WINTER, G.; BUCHEL, K.H. **Industrial Inorganic Chemistry**. New York: VCH Publishers, 1989, p. 247-255.

CARDOSO, J. G. R.; CARVALHO, P. S. L.; FONSECA, P. S. M.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R. **A indústria do alumínio**: estrutura e tendências. BNDES, 2011. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3302.pdf. Acesso em: 23 nov. 2023.

COLLAZO, A., FERNANDEZ, D., IZQUIRDO, M., NOVOA, X.R., PEREZ, C. Evaluation of red mud as surface treatment for carbon steel painting. **Process in Organic Coating**. v. 52, p. 351-358, apr. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2004.06.008>.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM - CEMPRE. Disponível em: <https://cempre.org.br/latas-de-aluminio/>. Acesso: 02 fev. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA.

A Sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio. Brasília, DF: CNI/ABAL, 2012.

Disponível em:

<https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2012/09/a-sustentabilidade-da-industria-brasileira-do-aluminio/> Acesso: 23 nov. 2023.

DINIZ, A. G. F. **Elevação da rentabilidade e produtividade em fundições de alumínio secundário:** uma proposta metodológica. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2007. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3624>. Acesso em: 25 set. 2023.

DUPONT, J. Economia de átomos, engenharia molecular e catálise organometálica bifásica: Conceitos moleculares para tecnologias limpas. **QNEsc.** São Paulo, v. 23, n. 6, p. 825, nov./dez. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000600017>. Acesso em: 23 ago. 2023.

FAHEY, M.; NEWSON, T.A.; FUJIYASU, Y. Engineering with tailings. In: MELLO, G. de; ALMEIDA, M. (Eds.). *Environmental Geotechnics - Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics*. Rio de Janeiro: CRC Press, v. 2, p. 947 – 973, 2002.

GATTI, J. B.; QUEIROZ, G. de C.; GARCIA, E. E. C. Reciclagem de Embalagem em Termos de ACV – Estudo de Caso. In: COLTRO, L. (Org.). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão.** Campinas: Centro de Tecnologia de Embalagem – CETEA / ITAL, 2007, p. 22-24. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/publicacoes/adi_25/files/assets/basic-html/index.html#page1. Acesso em: 14 fev. 2025.

GLOBALLY HARMONIZED SYSTEM OF CLASSIFICATION AND LABELLING OF CHEMICALS. 2017. Disponível em: <https://unece.org/ghs-rev7-2017>. Acesso: 13 fev. 2025.

GUIMARÃES, A. C. Recuperação de áreas degradadas pela mineração. In: ALMEIDA, M. E. (Org.). **Recuperação de áreas degradadas:** princípios e aplicações. Lavras: Editora UFLA, 2005.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 366, p. 1-11, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.1>.

HQUÍMICA. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ).** 2015. Disponível em: <http://www.hquimica.com.br/fichas/fispq-hquimica-hidroxido-de-sodio.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023. <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/search/fispq?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=fispq&type=product>. Acesso: 24 nov. 2023.

KIRKPATRICK, D.B., "Red mud product development". In: *light metals*. Warrendale, PE, USA: The *Minerals, Metals & Materials Society*, 1996, p. 75 – 80.

KOPEZINSKI, I. **Mineração x meio ambiente:** considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2000, 103 p.

LACERDA, L. **Logística Reversa:** uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. Rio de Janeiro: Centro de Estudos em Logística - COPPEAD, 2002.

LAL, R. Soil quality and sustainability. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. **Methods for assessment of soil degradation.** New York: CRC Press, p. 17-30, 1998.

LEITE, P. R. **Logística Reversa - meio ambiente e competitividade.** 2.ed. São Paulo: Atlas, 2009.

LENARDÃO, E. J.; FREITAG, R. A.; DABDOUB, M. J.; BATISTA, A. C. F.; SILVEIRA, C. DA C. Green chemistry: os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, v. 26, n. 1, p. 123–129, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000100020>.

MACHADO, A. **Introdução às métricas da Química Verde – uma visão sistêmica.**

Florianópolis: UFSC, 2014.

MERCK. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ)**. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MERCK. **Frases de Perigo e Precaução**. 2024. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/life-science/safety/hazard-and-precautionary-statements?srltid=AfmBOoo3rXfxzmbduXp28IB9PtVHAE96KsgMk9CwvLLPVxTSIw5dYfvy> Acesso em: 13 fev. 2025.

MISRA, V.N; RATH, P.C; PARAMGURU, R.K. Trends in red mud utilization – A review. **Mineral Processing and Extractive Metal**, v. 26, n. 1, p. 01-29, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248933865_Trends_in_Red_Mud_Utilization_-_A_Review. Acesso em: 23 out. 2023.

RIBEIRO, M. G. T. C.; YUNES, S. F.; MACHADO, A. A. S. C. **Catálogo digital de verdura de atividades laboratoriais para o ensino da Química Verde**. 2014. Disponível em: http://educa.fc.up.pt/catalogo/pt/construcao_ev. Acesso em: 24 nov. 2023.

RIBEIRO, M. G. T. C; COSTA, D. A; MACHADO, A. A. S. C. Uma métrica gráfica para avaliação holística da verdura de reacções laboratoriais - "Estrela Verde". **Química Nova**, v. 33, n.3, p. 759–764, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262553276_A_grafic_metric_to_a_holistic_evaluation_of_the_greenishness_of_chemical_reactions_-_Green_Star. Acesso em: 22 ago. 2023.

ROCHA, L. C. As Tragédias de Mariana e Brumadinho - É Prejuízo? Para quem? **Caderno de Geografia**, v.31, Número Especial 1, 2021. Disponível em <https://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/25541>. Acesso em: 19 nov. 2023.

SHELDON, R. A. Organic synthesis: past, present and future. **Chemistry & Industry**, London, p. 903-906, 1992. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0027114576&origin=inward>. Acesso em: 10 out. 2023.

SHELDON, R. A. Green chemistry and resource efficiency: Towards a green economy. **Green Chemistry**, v. 18, pp. 3180 - 3183, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6GC90040B>.

SHELDON, R. A. Organic synthesis; past, present and future. **Chemistry & Industry**. London, p. 903-906, 1992. Disponível em <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0027114576&origin=inward>. Acesso: 20 fev. 2024.

SHELDON, R. A. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. **Green Chem.** v. 19, n. 1, pp. 18–43, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6GC02157C>.

SIGMA-ALDRICH. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ)**. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/documents-search?tab=sds&srltid=AfmBOormkPsj5qBpaj6r35pHflhHVEXg5isBLMhKm59Mqo1a9WMixDXF>. Acesso em: 19 ago. 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. **Matéria**. v.12, n.2, p. 322–338, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762007000200011>

SLOOTWEG, J.C. Sustainable chemistry: Green, circular, and safe-by-design, **One Earth**, v. 7, n. 5, pp. 754-758, may. 2024.

TROST, B. M. The Atom Economy – A search for synthetic efficient. **Science**. v. 254, n. 5037, p. 1471-1777, dec. 1991. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1962206>.

TSAKIRIDIS, P.E; AGATZINI-LEONARDOU, S; OUSTADAKIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. **Journal of Hazardous Materials**, v. 116, n. 1-2, p.103-110, dec. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.002>.

VICK, S. G. Planning, design and analysis of tailing dams. New York: John Wiley & Sons, 1983.

WALLACE, G. Production of secondary aluminium. In: LUMLEY, R. (Ed.). **Fundamentals of aluminium metallurgy**: production, processing and applications, 2011, p. 70-82. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/292184783_Production_of_secondary_aluminium. Acesso em: 25 set. 2023.

WANG, S; ANG, H.M; TADÉ, M.O. Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. **Chemosphere**, v. 72, n. 11, p. 1621-1635, aug.

2008.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.05.013>

World Aluminium Organization. Disponível em: <https://thealuminiumstory.com/mining-refining/process-refining/Acesso>. Acesso em: 19 ago. 2024.