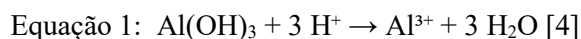


O Ciclo do Alumínio: Entre a Eficiência da Reciclagem e a Toxicidade do Íon Al^{3+}

Introdução

Em 2015, como parte da Agenda 2030, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram criados pela Organização das Nações Unidas (ONU) para ser um plano de ação global, a fim de erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, e garantir a paz e a prosperidade para todos. Entre os 17 pilares dos ODS, a problemática elencada no ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) é relevante, uma vez que por longo tempo se poluiu indiscriminadamente sem muitos agravantes para as indústrias [1]. Com o passar das revoluções industriais, os cientistas encontraram novas formas de produzir e diminuir os danos ao meio ambiente; entretanto, mesmo conscientizados, muitos não têm o pensamento sustentável. São aqueles que evitam reciclar, utilizam combustíveis fósseis, e acabam piorando o que era para melhorar [2].

Uma das formas mais eficazes de evitar poluição é a reciclagem. O Brasil é um grande exemplo nesse mérito, pois é o país que mais recicla alumínio no mundo, atingindo a marca expressiva de 97,3% das latas de alumínio (dados do último ano, em relação à 2024) [3]. Entretanto, o restante que não é destinado corretamente acaba deixando danos significativos, devido à elevada quantidade, apesar da baixa porcentagem. Ao atingir o solo, esse metal pode sofrer solubilização e liberar o íon Al^{3+} , processo que pode ser representado pela equação 1.



Esse íon é potencialmente tóxico para as plantas e pode contaminar a água. Nas plantas, o Al^{3+} inibe a divisão das células nas pontas das raízes, fazendo com que elas parem de crescer e não consigam absorver água e nutrientes importantes, como o cálcio e o magnésio. Já na água, esse metal pode se acumular nas brânquias dos peixes, causando uma produção exagerada de muco que impede a respiração, levando-os à morte por asfixia. [5]

Segundo Carl A. Zimring, autor do livro *Aluminum Upcycled: Sustainable Design in Historical Perspective*, a sucata de alumínio é tão boa quanto o alumínio produzido, porém, é mais acessível. Ele mostra a valorização do alumínio e acompanha sua aplicação em carros, aviões, na construção civil, em instrumentos musicais e em outros produtos ao longo do tempo. Trabalha sobre o aspecto da reutilização criativa, porém, ampliando as visões contemporâneas de design sustentável, adicionando fatores que eximem a sociedade atual do pecado do desperdício, mostrando que é possível aproveitar este metal mesmo com as práticas modernas de consumo. [6]

É preciso incentivar a reciclagem e o uso do alumínio reciclado, pois sua produção primária gera impactos como: 1) Consumo elevado de energia: a alta estabilidade do alumínio exige um consumo energético massivo, sendo necessários 16,5 kWh por quilo, o que equivale a manter um computador funcionando por 8 horas, todos os dias, durante um mês; [7] 2) Emissão de gases poluentes: emissão de CO_2 e gases perfluorcarbonos (PFCs), sendo estes últimos de 6.500 a 9.200 vezes mais potentes que o próprio gás carbônico para a criação do efeito estufa; [8] 3) Lama vermelha: resíduo alcalino de pH 10~13 rico em ferro e metais pesados, gerado na proporção de até 2,5 toneladas para cada tonelada de alumina produzida, exigindo armazenamento adequado para evitar contaminação [9].

Sendo assim, este trabalho apresenta a importância da reciclagem do alumínio que, se realizada de forma correta e ampla, traz benefícios à sociedade, deixando de poluir o ambiente, protegendo a vida vegetal e aquática dos efeitos do íon Al^{3+} e, ao mesmo tempo, atendendo às expectativas da Agenda 2030 no que diz respeito à produção e consumo responsáveis (ODS 12).

Desenvolvimento, Resultados e Discussão

A ideia da reciclagem surge como uma alternativa para não descartar aquilo que teria utilidade para voltar à cadeia produtiva, a fim de criar novos produtos. O ideal seria não gerar resíduos, porém, como não é possível, pelo menos se deve diminuir a quantidade, atendendo, assim, o conceito dos 3Rs (Reduzir, Reutilizar, Reciclar). Ou seja, primeiro é importante evitar a geração de resíduos, ou diminuir, implementando novas tecnologias de produção para que produtos mais duráveis sejam produzidos. Mas uma vez gerado o resíduo, que é inevitável, a ideia é tentar, de formas criativas, reaproveitar esse material, da forma que está mesmo, sem nenhum processamento. Agora, quando é necessário alterar uma ou mais características desse material, faz-se

o que se chama de reciclagem. Seria a última forma a ser adotada, mas em muitos casos é a única possível. De qualquer forma, aplicando qualquer um dos 3Rs, se estaria contribuindo com o ODS 12, para que os resíduos gerados não se tornem um problema ao meio ambiente. [10]

No caso do alumínio, a reciclagem é a melhor forma para proporcionar a volta deste metal à cadeia produtiva, sem ter que descartá-lo. Aliás, os metais em geral têm essa característica, pois podem na maioria das vezes serem fundidos e moldados para formarem novos materiais, sem perder suas propriedades físico-químicas. E o melhor é que este processo pode ser repetido inúmeras vezes, sem grandes perdas. [11] Isso ocorre por causa das propriedades das ligações metálicas.

As ligações metálicas ocorrem de forma interessante. São dois cátions que se unem. Como são duas cargas positivas, se repeliriam se nada mais acontecesse, porém, quando cada cátion se forma é porque elétrons saem do átomo. E estes elétrons acabam permanecendo na estrutura metálica, criando o fenômeno chamado “mar de elétrons”, dando estabilidade deste conjunto, pois agora se têm cargas negativas (dos elétrons) se equilibrando com as cargas positivas (dos cátions). A Figura 1 exemplifica este fato, onde os átomos de alumínio são os cátions e as bolinhas ao redor, andando livremente na estrutura, são os elétrons liberados por cada átomo. [12] Ao se fundir um metal e depois torná-lo sólido novamente, suas características não são perdidas. Devido ao fato do metal ser constituído somente pelo mesmo elemento químico e não por uma ou mais moléculas, a mesma estrutura se restabelece. Não perde sua resistência, durabilidade, condutibilidade, ductibilidade ou maleabilidade ao ser reciclado, pois se trata do mesmo metal, com a mesma estrutura. Além disso, o aquecimento geralmente remove impurezas durante a fusão, refinando o metal. Com isso, é possível reciclar um metal infinitas vezes. [13]

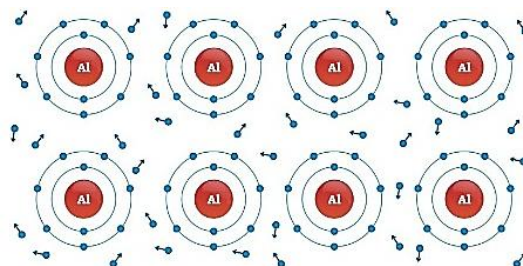
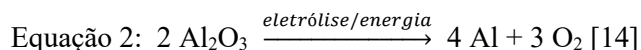


Figura 1 - “Mar de elétrons”, responsáveis pela estabilização das ligações metálicas [12]

De 1993 a 2018, a reciclagem de alumínio aumentou de 50% para 97%. Dados do IBGE informam que outros materiais também tiveram suas porcentagens aumentadas no mesmo período, como é o caso do vidro, de 25% para 41%, e das garrafas PET, de 18,8% para 55%. O sucesso da reciclagem de alumínio se deve ao fato das empresas preferirem reciclar a ter que comprar o material vindo da bauxita, que é o minério rico em alumínio. E além disso, coletar latas se tornou uma fonte de renda para muitos brasileiros, pois atualmente se paga um valor maior por elas. [14]

A obtenção do alumínio pelo minério bauxita, composto prioritariamente por óxido de alumínio diidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), se dá por eletrólise, de acordo com a equação 2, e consome muita energia elétrica para ocorrer. [14]



Já sua reciclagem consome 95% a menos de energia, além de que para se obter 1 tonelada de alumínio, são necessárias aproximadamente 4 toneladas do minério, que precisam ser retirados do solo. [14]

Para entender como é realizada a reciclagem do alumínio, o vídeo intitulado “RECICLAGEM ALUMÍNIO.MOV” [11] mostra todo o processo, destacando a cidade de Pindamonhangaba, no Estado de São Paulo, que recicla 70% de todo o alumínio do Brasil. É a chamada “Capital do Alumínio”. Na fábrica de reciclagem mostrada no vídeo, todas as latas de alumínio são prensadas, picotadas e trituradas, eliminando-se tiras e pregos de aço que fazem parte da estrutura das latinhas. Na sequência tudo é direcionado para um calcinador, que eliminará todos os rótulos por decomposição via aquecimento e, por fim, é encaminhado ao forno, para ser derretido. Após resfriar, se torna blocos enormes de 15 toneladas de puro alumínio. Porém, na sequência, este material é como se fosse esticado, se transformando em lâminas finas, que são enroladas na forma de bobinas, para serem distribuídas às indústrias que produzirão novas latinhas e outros materiais que contêm alumínio. [11]

O alumínio é um metal resistente à corrosão, uma vez que, em sua superfície, forma-se o óxido de alumínio (Al_2O_3), o qual é aderente e atua como uma fina película protetora da peça. Porém, se exposto a ácidos pode corroer e formar o íon Al^{3+} . Os refrigerantes e águas gaseificadas são soluções ácidas e quando armazenadas em latinhas de alumínio podem oxidar o alumínio metálico a íons de alumínio. [15] O íon Al^{3+} é potencialmente tóxico e em excesso pode causar doenças como demência e enfraquecimento dos ossos. [16] No entanto, para se evitar o contato direto entre o alumínio e a bebida, a indústria aplica um filme de plástico em cima do alumínio, na parte interna da lata. Por isso, é importante não consumir bebida com a lata amassada, pois este filme é fino e pode romper, expondo o alumínio à bebida. Os hidróxidos (bases) fortes também podem

corroer o alumínio. A reação entre o alumínio metálico (Al) e o hidróxido de sódio (NaOH) resulta na formação de aluminato de sódio (NaAlO₂) e gás hidrogênio (H₂), conforme a equação 3. [15]

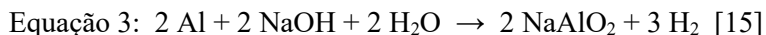


Figura 2 – Lata de alumínio corroida, expondo a película plástica interna

Este experimento foi realizado no laboratório, imergindo uma lata de alumínio numa solução de NaOH aproximadamente 1 mol.L⁻¹. O resultado mostrou a presença desta película de plástico que é aplicada na parte interna, para evitar a exposição do metal à bebida. Com o metal corroído, foi possível observá-la nitidamente (Figura 2), conforme vídeo (Mattos, 2026). [17]

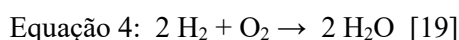
E para complementar esse experimento, um segundo foi realizado adicionando pedaços de alumínio num kitassato, e acrescentando-se solução de NaOH também de concentração 1 mol.L⁻¹. Uma bexiga foi acoplada na saída do kitassato e aguardou-se a reação se processar. Após alguns minutos a bexiga se encheu do gás resultante da reação, conforme Figura 3. Este gás, liberado pela corrosão do alumínio, é o hidrogênio, e por se tratar de um gás inflamável, pode explodir. Para comprovar sua existência, a bexiga foi posicionada em local estratégico no laboratório e, por meio de um bastão de madeira longo, no qual foi adicionada em sua



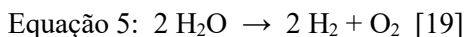
Figura 3 – Reação de alumínio com NaOH, liberando H₂ e fazendo a bexiga inflar

ponta um pedaço de vela acesa, aproximou-se a chama da bexiga, e o resultado foi uma explosão, registrada em vídeo (Mattos, 2026). [18]

O gás hidrogênio adquiriu mais relevância nos últimos anos, devido ao caos vivido nos dias de hoje em relação ao excesso de emissão de gases estufa, que têm cada vez mais agravado o aquecimento global. Como sua queima não libera gases estufa e, sim, somente água (equação 4), tem sido denominado hidrogênio verde e considerado o combustível do futuro.



Geralmente, o hidrogênio é obtido por meio do processo de eletrólise da água. Nesse processo, uma corrente elétrica é aplicada à água, promovendo a decomposição de suas moléculas em hidrogênio e oxigênio (equação 5). Quando a eletricidade empregada é gerada por fontes limpas, como solar ou eólica, a produção do hidrogênio ocorre sem emissão de poluentes, caracterizando-o como hidrogênio verde, sendo uma alternativa energética sustentável. [19]



De acordo com estimativas da Agência Internacional de Energia (AIE), a utilização do hidrogênio verde poderia evitar a liberação de aproximadamente 830 milhões de toneladas de CO₂ por ano, atualmente associadas à produção desse gás a partir de combustíveis fósseis. [19]

O experimento realizado mostrou a obtenção deste gás por meio da corrosão do alumínio e poderia ser uma alternativa para aproveitar a parcela de alumínio não reciclado ou mesmo destinar parte do alumínio que seria reciclado para este fim. Seria uma alternativa quimicamente viável e que vai de encontro à ideia de Consumo e Produção Responsáveis tratado na ODS 12.

Conclusão

A relevância do alumínio em nosso cotidiano é indiscutível, notadamente por sua capacidade de ser reciclado inúmeras vezes, auxiliando na proteção ambiental e cumprindo o objetivo de desenvolvimento sustentável número 12 (ODS 12). Contudo, o descarte inadequado pode liberar o íon Al³⁺, nocivo para a flora e a fauna aquática. Nesse contexto, a reciclagem se apresenta como uma solução indispensável, uma vez que demanda menos energia, preserva recursos naturais e mantém as propriedades do material. Ademais, os experimentos demonstraram a reatividade do alumínio, inclusive na produção de hidrogênio, sinalizando novas aplicações sustentáveis. Sendo assim, o alumínio nunca deve ser encarado como resíduo, mas sim como um recurso capaz de gerar proveitos para o meio ambiente e para a comunidade. Portanto, é crucial que todos, entre poder público, população e indústria, promovam o descarte correto e a reciclagem deste material, colaborando para um futuro mais sustentável.

Referências Bibliográficas

- 1- TRACKMOB. O que são Objetivos de Desenvolvimento Sustentável?. Disponível em: <<https://trackmob.com.br/blog/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/>>. Acesso em: 10/02/2026.
- 2- GREENLY.EARTH. Qual foi o impacto ambiental da Revolução Industrial? Disponível em: <<https://greenly.earth/en-gb/blog/ecology-news/what-was-the-industrial-revolutions-environmental-impact>>. Acesso em: 10/02/2026.
- 3- YOUTUBE. Alumínio lidera a reciclagem no Brasil e movimenta economia. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=29bCvbj_o_Q&t=3s>. Acesso em: 11/02/2026.
- 4- FACEBOOK. Você sabia que em solos ácidos, com pH abaixo de 5,0, o alumínio (Al³⁺) pode provar efeitos tóxicos, impactando o desenvolvimento das plantas. Disponível em: <<https://www.facebook.com/cultibras/videos/voc%C3%AA-sabia-que-em-solos-%C3%A1cidos-com-ph-abaixo-de-50-o-alum%C3%ADnio-al3-pode-provocar-/1669567690525445/>>. Acesso em: 11/02/2026.
- 5- AGROLINK. Alumínio nas plantas - Tudo o que você precisa saber. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes/aluminio-nas-plantas---tudo-o-que-voce-precisa-saber_470213.html>. Acesso em: 11/02/2026.
- 6- OXFORD ACADEMIC. Alumínio reciclado: design sustentável em perspectiva histórica. Disponível em: <<https://academic.oup.com/jdh/article-abstract/31/2/209/4965795>>. Acesso em: 12/02/2026.
- 7- ECYCLE. Impactos ambientais do alumínio e suas propriedades. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/aluminio/>>. Acesso em: 12/02/2026
- 8- YOUTUBE. Os gases do efeito estufa. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=NTikV2JWSdI&t=40s>>. Acesso em: 12/02/2026.
- 9- DIEMME FILTRATION. Tratamento de polpas no setor de bauxitas. Disponível em: <[https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/consumo-consciente-de-embalagem/principio-dos-3rs.html](https://www.diemmefiltration.com/pt-pt/aplica%C3%A7%C3%B5es/setor-red-mud/#:~:text=A%20lama%20vermelha%20(res%C3%ADduo%20de,(juntamente%20com%20outros%20%C3%B3xidos)>. Acesso em: 12/02/2026.10- MMA.GOV.BR. Princípio dos 3R's. Disponível em: <. Acesso em 22/03/2026.
- 11- YOUTUBE. Reciclagem Alumínio. MOV. Disponível em: <https://youtu.be/_lqCoDIn0AU?si=KdLgKt4D53eSqydX>. Acesso em: 22/03/2026.
- 12- MANUAL DA QUÍMICA. Ligações química: tipos, funções e exercícios. Disponível em: <<https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/ligacoes-quimicas.htm>>. Acesso em: 22/03/2026.
- 13- GOOGLE - GEMINI. Resposta a " quais as características de um metal que faz com que seja possível reciclá-lo inúmeras vezes". [S.l.], 23 mar. 2026. Disponível em: <<https://gemini.google.com/>>. Acesso em: 23 mar. 2026.
- 14- SALLES, A.M. Coleção Ensino Médio 2ª série: Livro do aluno – São Paulo: Editora Cered. Objetivo, 2025. Química.
- 15- YOUTUBE. Como fazer ALUMÍNIO?. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=JZHdH6J3K0Y>>. Acesso em: 20/03/2026.
- 16- NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE. Toxicidade do alumínio. Disponível em: <[https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK609094/#:~:text=O%20alum%C3%ADnio%20%C3%A9%20eliminado%20principalmente,de%20%C3%A1cido%20%C3%BArico%20no%20soro.>. Acesso em: 23/03/2026.17- MATTOS, Natan. Presença de película plástica após corrosão do alumínio. [S. l.: s. n.], 2026. 1 vídeo (8 s). Disponível em: <u>Presença de película plástica após corrosão do alumínio</u>. Acesso em: 25 mar. 2026.18- MATTOS, Natan. Corrosão do alumínio com formação de H₂. [S. l.: s. n.], 2026. 1 vídeo (11 s). Disponível em: <u>Corrosão do alumínio com formação de H₂.mp4</u>. Acesso em: 24 mar. 2026.19- IBERDROLA. O que é o Hidrogênio verde e sua importância. Disponível em: <. Acesso em 20/03/2026.