

**HIDRÓLISE ALCALINA DA LIGA AA2024: INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA PRODUÇÃO EFICIENTE DE HIDROGÊNIO**

Ana Karoliny Das Dores (IC), Mirian Motta Melo (PQ)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI**Palavras-chave:** Hidrogênio Verde. Alumínio. Metalurgia do Pó. Mecanismo de reação.**Introdução**

Os combustíveis fósseis dominam a matriz energética global. Entretanto geram impactos ambientais e suas reservas são limitadas. Em busca de complementar a matriz, tem-se no hidrogênio, um vetor energético limpo e promissor, com aplicação em células combustíveis e processos industriais [1]. Contudo, o hidrogênio não é encontrado livre na natureza, obtido a partir de compostos como a água, por métodos eletroquímicos, termoquímicos e pela hidrólise de metais [2].

Na hidrólise de metais, utilizar o alumínio é especialmente atrativo por sua abundância, baixo custo e capacidade de gerar até 1,36 L de H<sub>2</sub> por grama de metal [2]. Entretanto, a formação de uma camada passiva de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inibe a reação do material com a água. Para superar essa limitação, estratégias como realizar a hidrólise em meio básicos ou ácido, adicionar elementos metálicos mais nobres que o Al, como o cobre, e moer o Al com sais têm sido investigados [1,3].

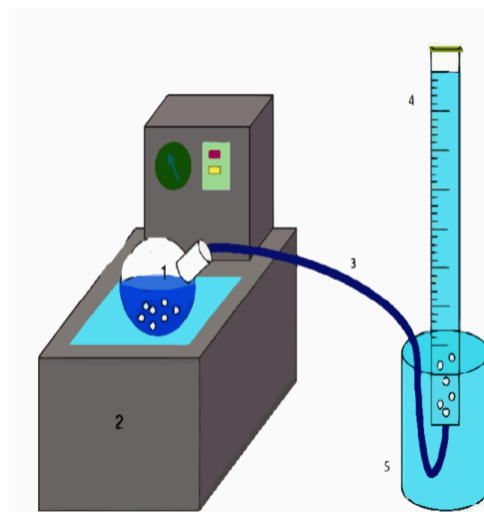
A liga de alumínio AA2024 foi escolhida por conter cerca de 4% de cobre [4], elemento que desempenha papel importante na ativação galvânica do alumínio em meio alcalino. O cobre, com potencial eletroquímico mais nobre que o alumínio, promove a formação de pares galvânicos que auxiliam na ruptura da camada passiva, expondo a superfície metálica para reação [5]. Além disso, o cobre contribui para a fragmentação da matriz metálica, aumentando a área superficial ativa [3]. Este trabalho investiga a geração de hidrogênio a partir da reação da AA2024 em solução de NaOH, avaliando os efeitos da temperatura, da concentração da solução e da adição de sais (NaCl e KCl) no processo.

**Metodologia**

Os experimentos foram conduzidos utilizando um sistema fechado composto por balão de reação de fundo redondo, banho-maria com controle de temperatura, mangueira de borracha, proveta graduada e béquer para coleta do volume deslocado (Figura 1). Aproximadamente 0,145 g da amostra foram pesadas e

adicionadas a 60 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações de 0,05 mol·L<sup>-1</sup> ou 0,5 mol·L<sup>-1</sup>, conforme a condição experimental. O balão foi então imerso no banho-maria ajustado para 30 °C, 50 °C ou 70 °C, com tempo de reação de 90 minutos. O volume de hidrogênio gerado foi monitorado pelo deslocamento de água na proveta. Foram avaliadas a influência da temperatura, da concentração da solução alcalina e da adição de sais (NaCl ou KCl) durante a moagem das amostras metálicas.

Figura 1 – Representação esquemática do sistema experimental utilizado para avaliação da geração de hidrogênio.



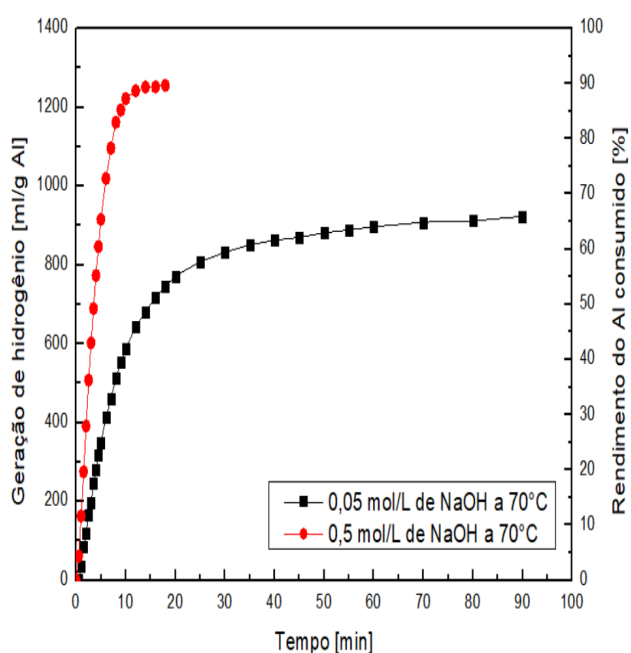
Fonte: Autoria.

**Resultados e discussão****Efeito da concentração da solução alcalina de NaOH**

Nos ensaios realizados com soluções de NaOH 0,05 mol·L<sup>-1</sup> e 0,5 mol·L<sup>-1</sup>, a 70 °C, observou-se que a solução mais concentrada promoveu maior velocidade de reação e volume total de hidrogênio gerado (Figura 2).

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

Figura 2 – Influência da concentração alcalina no desempenho da geração de hidrogênio a partir de cavacos de alumínio a 70 °C.



Fonte: Autoria.

A maior produção de hidrogênio observada na solução de 0,5 mol·L<sup>-1</sup> de NaOH está associada principalmente à maior concentração de íons OH<sup>-</sup>, que aumenta a frequência de colisões efetivas, acelera a dissolução do óxido e expõe o metal à água [6]. Esse contato favorece as reações da hidroxila com a camada e forma aluminatos e hidróxidos de alumínio, que se destacam mais facilmente do metal e promovem a liberação contínua de H<sub>2</sub> [7]. Por dificultar a repassivação, a elevada concentração de NaOH mantém a superfície do alumínio reativa, promove a continuidade da reação o que resulta em maior taxa e rendimento de geração de hidrogênio [7]. Esse fator explica a inclinação mais acentuada e a maior elevação da curva correspondente à solução de 0,5 mol·L<sup>-1</sup> no gráfico, evidenciando uma reação mais rápida.

Tabela 1 – Influência da concentração de NaOH na velocidade, geração de hidrogênio e rendimento da reação a 70°C

Concentração de NaOH	Velocidade [mL·min <sup>-1</sup> ]	Geração de Hidrogênio [mL·g <sup>-1</sup> ]	Rendimento do Al consumido [%]
0,05	5,96	615,82	40,32
0,5	11,86	880,67	64,885

Fonte: Autoria.

Os resultados indicam que a elevação da concentração da solução alcalina é uma estratégia eficaz para otimizar tanto a taxa de reação quanto a eficiência global do sistema (Tabela 1).

#### Influência da temperatura

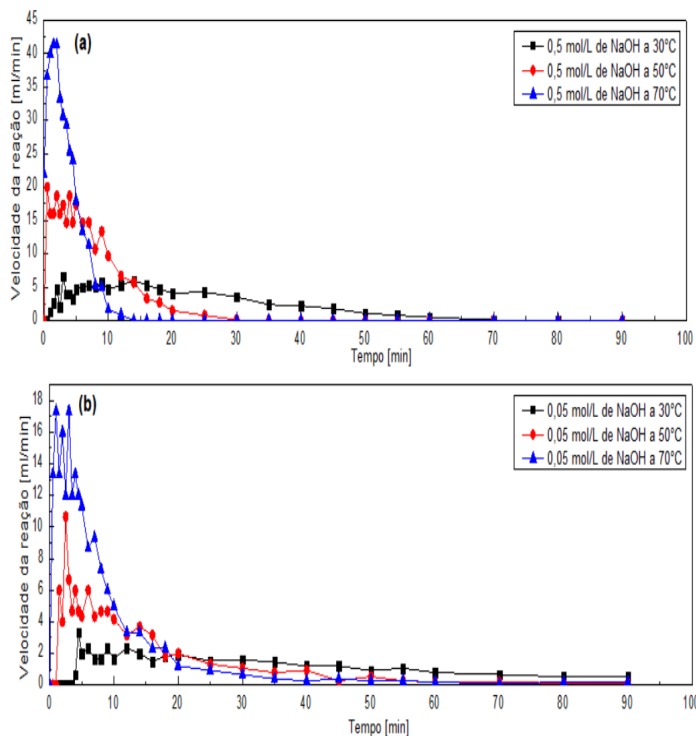
Para avaliar esse efeito, foram realizados experimentos nas temperaturas de 30 °C, 50 °C e 70 °C, utilizando soluções de NaOH 0,05 mol·L<sup>-1</sup> e 0,5 mol·L<sup>-1</sup>. Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura promove um aumento significativo na velocidade e rendimento da reação.

A elevação da temperatura aumenta a energia cinética das partículas reativas, o que também resulta em maior frequência e eficácia das colisões entre o alumínio metálico e os íons hidroxila presentes na solução. Embora a temperatura acelere tanto a dissolução do alumínio quanto o processo de repassivação, a taxa de dissolução é favorecida em maior proporção. Isso faz com que a superfície metálica permaneça ativa por mais tempo antes da formação completa de uma nova camada de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [8,9].

Os gráficos experimentais mostram que a 70 °C a velocidade da reação é significativamente superior nas duas concentrações testadas (Figura 3). No meio mais concentrado (0,5 mol·L<sup>-1</sup>), o pico de velocidade atinge cerca de 45 mL·min<sup>-1</sup>, seguido por uma queda rápida. Já na solução mais diluída (0,05 mol·L<sup>-1</sup>), o pico de velocidade é mais baixo, em torno de 17 mL·min<sup>-1</sup>, mas apresenta uma liberação de hidrogênio mais estável e prolongada ao longo do tempo.

*“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”*

Figura 3 – Velocidade de reação em função da temperatura para soluções de NaOH



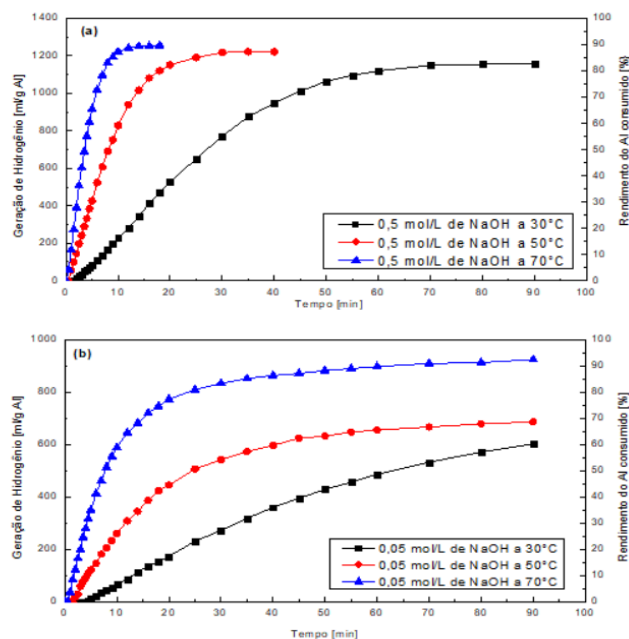
Fonte: Autoria.

Esse comportamento indica que a combinação entre alta temperatura e elevada concentração de NaOH promove uma reação rápida e intensa, enquanto que, em temperaturas mais baixas ou em meios diluídos, a reação ocorre de forma mais lenta e gradual.

Além da velocidade da reação, a temperatura também exerce grande influência sobre o rendimento do alumínio. A 70 °C, mesmo no meio mais diluído, a reação atingiu um rendimento próximo a 90%, valor semelhante ao observado na solução mais concentrada. Esses resultados evidenciam que a elevação da temperatura potencializa significativamente o consumo do alumínio, independentemente da concentração da solução (Figura 4).

Esses dados demonstram que a temperatura é um parâmetro-chave para otimizar tanto a taxa de reação quanto a conversão do alumínio, contribuindo diretamente para o aumento da eficiência do processo de geração de hidrogênio.

Figura 4 – Influência da Temperatura na Geração de Hidrogênio e Consumo de Alumínio



Fonte: Autoria.

### Efeito da adição de sais (NaCl e KCl)

Os sais atuam como agentes dispersantes e abrasivos, reduzindo o tamanho das partículas e introduzindo defeitos na superfície metálica.

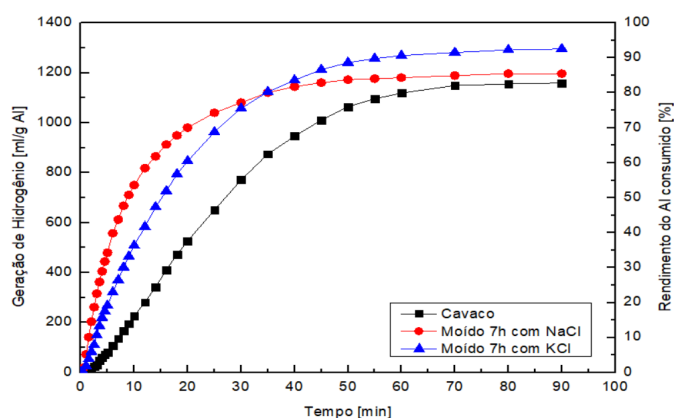
Quando essas amostras moídas são expostas à solução de NaOH, os sais se dissolvem, revelando fissuras que expõem novas áreas reativas do alumínio [6,8]. Isso acelera a reação e aumenta o volume total de hidrogênio produzido, especialmente nos primeiros minutos.

Os resultados indicaram que o KCl apresentou a maior produção de hidrogênio, seguido pelo NaCl e pelo cavaco de alumínio não moído (Figura 5). Como ambos os sais foram utilizados na mesma proporção em massa (50%), a diferença de desempenho pode ser atribuída às características físicas do KCl. Durante a moagem, partículas de alumínio, por serem dúcteis, tendem a sofrer soldagem a frio, reduzindo a criação de novas superfícies reativas. A adição de sais, por serem materiais mais duros que o Al, promovem a diminuição das partículas de Al com mais eficiência, reduzindo o tamanho das partículas de alumínio. Nesse contexto, o

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

KCl, por apresentar maior dureza que o NaCl, fratura o metal mais facilmente e em segmentos menores, o que resulta em partículas mais finas e com maior área de superfície específica. Esse aumento de área favorece a ruptura da camada passiva de  $Al_2O_3$  e acelera a reação alumínio-água, explicando a melhor performance das amostras moídas com KCl [10].

Figura 5 – Influência da presença de sais na geração de hidrogênio a 30°C.



Fonte: Autoria.

Em termos comparativos, a elevação da temperatura associada ao meio mais alcalino acelerou significativamente a reação e resultou nas maiores taxas de geração de hidrogênio. A moagem, sobretudo com KCl, resultou em desempenho superior ao cavaco não moído, embora inferior às condições de maior temperatura e maior concentração alcalina.

### Conclusões

A hidrólise alcalina da liga AA2024 mostrou-se fortemente dependente das condições operacionais. A elevação da temperatura aumentou a taxa de reação e o rendimento do processo, enquanto a maior concentração de NaOH intensificou a dissolução da camada passiva, favorecendo a liberação de hidrogênio. A moagem com sais, sobretudo KCl, reduziu o tamanho das partículas e ampliou a área superficial, acelerando o contato metal-solução. A combinação desses fatores resultou em maior eficiência de geração de hidrogênio, confirmando o potencial do método como alternativa viável para a produção sustentável desse vetor energético.

### Agradecimentos

A autora agradece à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo suporte institucional à pesquisa, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa de Iniciação Científica.

### Referências

- [1] R. S. Kalubarme; C. N. Park; Chan-Jin Park. Hydrogen generation using the corrosion of Al-Sn and Al-Si alloys in an alkaline solution, *Metals and Materials International*, [S.I.] p. 1, jul.2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12540-014-4006-1>.
- [2] S.P. du Preez; D.G. Bessarabov. On-demand hydrogen generation by the hydrolysis of ball-milled aluminum composites: A process overview, *International journal of hydrogen energy*, [S.I.], p.1, mar.2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.240>
- [3] Cundi Wei; Dan Liu; Shaonan Xu et al. Effects of Cu additives on the hydrogen generation performance of Al rich alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, [S.I.], dez.2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.152>
- [4] Kevin Anderson; John Weritz; J. Gilbert Kaufman. Aluminum Alloy Nomenclature and Temper Designations\*, *ASM International*, p.3, 2018.
- [5] M.C.Reboul; PH.Gimenez; J.J.Rameau. A proposed activation mechanism for Al anodes, *Corrosion*, [S.I.], Vol.40, jul.1984.
- [6] Sevim Yolcular; Serdar Karaoglu; Mutlu Karasoglu. Hydrogen generation performance of waste aluminum alloy chips and powders, *Energy Sources*, [S.I.], Set.2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1822468>
- [7] Lluís Soler, Angélica María Candela, Jorge Manacás et al. Hydrogen generation from water and aluminum promoted by sodium stannate, *International journal of hydrogen energy*, [S.I.], agost.2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.065>
- [8] Nicola Musicco; Marcello Gelfi; Paolo Iora et al. A review of hydrogen generation methods via aluminum-water reactions, *International Journal of Thermofluid* 27, [S.I.], maio.2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101152>
- [9] C. B. Porciúncula; N. R. Marcilio; I. C. Tessaro et al. Production of hydrogen in the reaction between aluminum and water in the presence of NaOH and KOH, *Brazilian Journal of Chemical Engineering/Brazilian Journal of Chemical Engineering* 29, [S.I.], jun.2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000200014>
- [10] S.S. Razavi-Tousi; J.A. Szpunar. Effect of addition of water-soluble salts on the hydrogen generation of aluminum in reaction with hot water, *Journal of Alloys and Compounds*, [S.I.], abril.2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.04.038>