

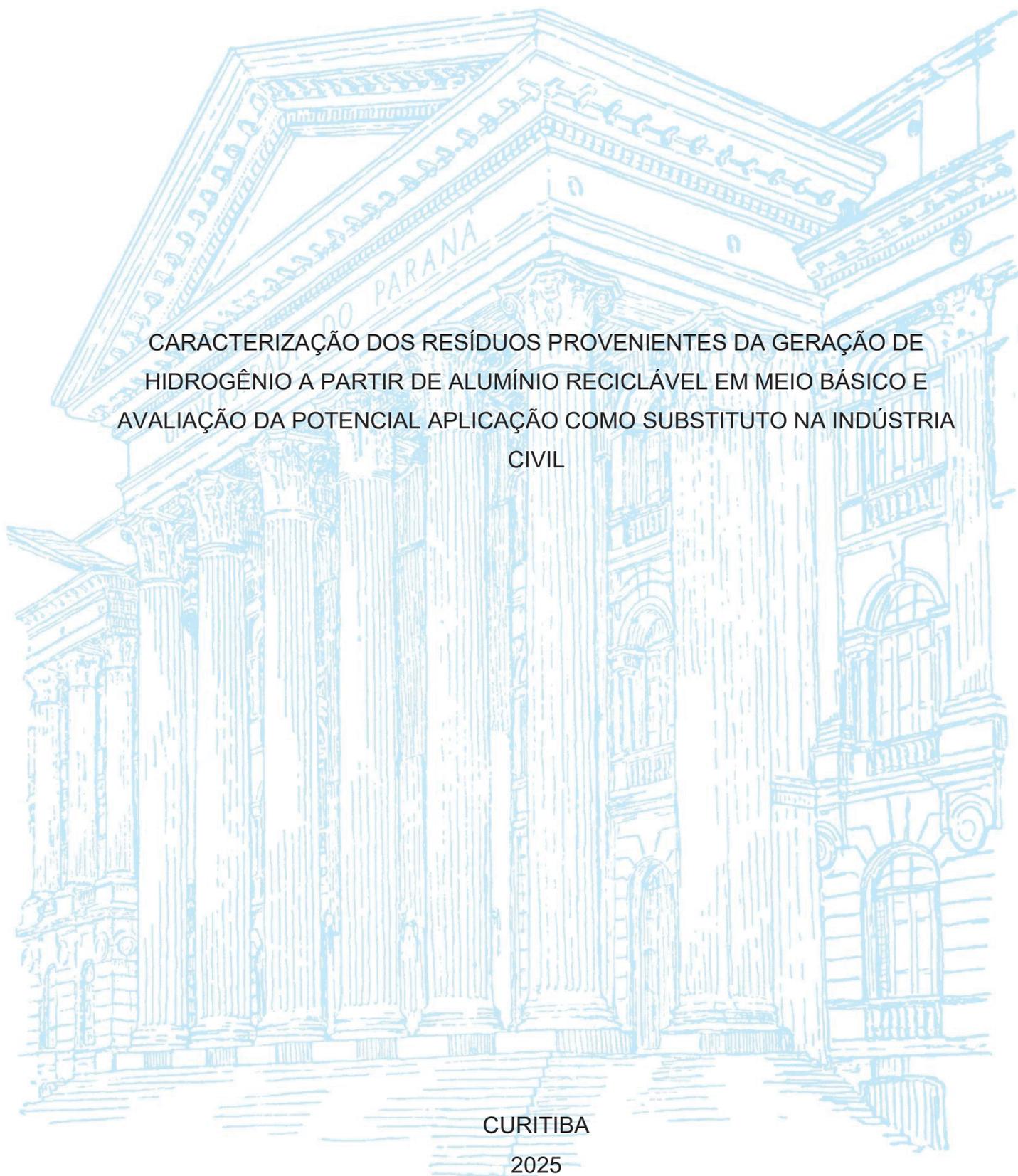
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BEATRIZ JACOB FURLAN

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DA GERAÇÃO DE
HIDROGÊNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLÁVEL EM MEIO BÁSICO E
AVALIAÇÃO DA POTENCIAL APLICAÇÃO COMO SUBSTITUTO NA INDÚSTRIA
CIVIL

CURITIBA

2025



BEATRIZ JACOB FURLAN

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DA GERAÇÃO DE
HIDROGÊNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLÁVEL EM MEIO BÁSICO E
AVALIAÇÃO DA POTENCIAL APLICAÇÃO COMO SUBSTITUTO NA INDÚSTRIA
CIVIL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas

Coorientador: Prof. Dr. Lauber de Souza Martins
Prof. Dr. Lúcio Cardozo-Filho

CURITIBA

2025

Catálogo na publicação
Sistema de Bibliotecas UFPR

F985

Furlan, Beatriz Jacob

Caracterização dos resíduos provenientes da geração de hidrogênio a partir de alumínio reciclável em meio básico e avaliação da potencial aplicação como substituto na indústria civil / Beatriz Jacob Furlan. - Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2025.

Orientador: Dr. José Viriato Coelho Vargas

Coorientadores: Dr. Lauber de Souza Martins

Dr. Lúcio Cardozo-Filho

1. Aluminato de Sódio. 2. Caracterização Química. 3. Construção Civil. 4. Energias Renováveis. 5. Geração de hidrogênio. I. Vargas, José Viriato Coelho. II. Martins, Lauber de Souza. III. Cardozo-Filho, Lúcio IV. Universidade Federal do Paraná. V. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BEATRIZ JACOB FURLAN**, intitulada: **CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLÁVEL EM MEIO BÁSICO E AVALIAÇÃO DA POTENCIAL APLICAÇÃO COMO SUBSTITUTO NA INDÚSTRIA CIVIL**, sob orientação do Prof. Dr. JOSE VIRIATO COELHO VARGAS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2025.

Assinatura Eletrônica

07/03/2025 12:20:08.0

JOSE VIRIATO COELHO VARGAS
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

08/03/2025 10:58:09.0

LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
SUL)

Assinatura Eletrônica

11/03/2025 11:48:20.0

MARIANA D OREY GAIVAO PORTELLA BRAGANÇA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

13/03/2025 17:51:33.0

LAUBER DE SOUZA MARTINS
Coorientador(a) Pós-Doc (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

13/03/2025 13:46:46.0

LÚCIO CARDOZO FILHO
Coorientador(a) (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me fortalecer a cada dia, especialmente nos momentos mais desafiadores.

Ao meu amado esposo, Victor Gomes, pelo suporte incondicional e por estar sempre ao meu lado nesta jornada.

Aos meus pais, Eliane Jacob e Marco Furlan, que me ensinaram que a educação é a chave para transformar o mundo. Às minhas irmãs, Raquel e Rebeca, que me veem como exemplo acadêmico – uma grande responsabilidade – espero honrar essa confiança.

Aos amigos que a UFPR me presenteou: Rafael Gonçalves, Paulo Alexandre S. da Silva, Matheus Ben-Hur, Luisa Delattre, Felipe Kohut e Erick Kollross. Nos momentos de incerteza, vocês me lembraram que, diante da vastidão do conhecimento, todos temos nosso valor.

Aos meus ICs do coração, Kauana dos Santos, Thomas Holzmann e Sophia Bordin, por me incentivarem a ser uma pesquisadora cada vez melhor. A Teresa Passaro e ao Paulo Afonso, por sempre estarem na primeira fila, aplaudindo minhas conquistas e me aconselhando a crescer como pessoa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas, por todo o conhecimento compartilhado e pelos aprendizados que levarei comigo. Aos meus co-orientadores, Prof. Dr. Lauber Martins, que, mesmo à distância, sempre esteve presente, e Prof. Dr. Lucio Cardozo-Filho, que abriu as portas da UEM e de seu laboratório, possibilitando a caracterização de DRX.

À Prof. Dra. Claudia Eliana Marino Zarbin, cuja trajetória como docente e pesquisadora é uma grande inspiração, e cujas contribuições foram essenciais para o aprimoramento deste trabalho. À Prof. Dra. Mariana Bragança Portella, peça fundamental na etapa de destinação na indústria civil, por me conectar à equipe do Lactec e LAME. Aos técnicos do LAME e do Lactec, especialmente ao Rafael, pelo apoio sempre prestativo.

À Universidade Federal do Paraná, que me proporcionou uma formação gratuita e de qualidade desde a graduação. Tenho orgulho em fazer parte desta instituição.

À banca de defesa, em especial ao Prof. Dr. Luiz Rocha, sempre solícito, e ao Prof. Dr. Jeferson Avila, por sua disponibilidade como suplente.

À Neiva Fedechem, pela paciência e atenção dedicadas como secretária do PIPE. Ao PIPE, pelo profissionalismo e organização.

Ao NPDEAS, LaCelC, Central de Microscopia Eletrônica, Departamento de Química e Central Analítica, pelo suporte técnico e acesso aos equipamentos necessários.

Por fim, à CAPES, pelo fomento essencial à minha manutenção financeira durante este período. Ao CNPq e ao Projeto ROTA2030/FUNDEP/FUNPAR/RENAULT, pelo apoio financeiro em viagens para apresentação de trabalhos científicos, estadia e alimentação, além do suporte técnico para a realização das análises.

O conhecimento é o único bem que quanto mais se partilha, mais se multiplica."
– Marie von Ebner-Eschenbach

RESUMO

A transição para uma matriz energética sustentável é essencial para enfrentar desafios globais como mudanças climáticas, escassez de recursos naturais e segurança energética. Nesse contexto, a economia baseada no hidrogênio desponta como uma alternativa promissora, uma vez que esse elemento possui alto poder calorífico e pode ser produzido a partir de fontes renováveis. O uso de metais recicláveis, como o alumínio, oferece uma abordagem para processos sustentáveis de geração de hidrogênio. Neste estudo, analisou-se a geração de hidrogênio a partir de resíduos de latinha de alumínio, destinando-se o gás para a autonomia estendida de um veículo elétrico, enquanto o resíduo sólido foi avaliado quanto ao seu potencial na adição no âmbito da construção civil. Para a caracterização do resíduo, foram realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) e Difração de Raios X (DRX), a fim de determinar sua composição química, estrutura cristalina e morfologia. Os resultados indicaram que, apesar da presença de impurezas metálicas como Cu, Mg e Fe nas latinhas recicladas, suas propriedades estruturais permanecem compatíveis com as do cavaco industrial, demonstrando que o processo de reciclagem não compromete significativamente a qualidade do material para o sistema de geração de H₂ e conseqüentemente para a potencial destinação na indústria civil. Além disso, a análise DRX revelou a predominância de fases cristalinas, enquanto a presença de NaOH no meio reacional conferiu características básicas à estrutura do resíduo oriundo das latinhas. A fim de avaliar seu potencial na construção civil, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade em diferentes formulações cimentícias com substituição da argamassa por 1% e 3% do resíduo. Os resultados demonstraram que a adição de 1% do resíduo foi a melhor alternativa, apresentando desempenho equivalente ao cimento padrão ao longo do tempo, sem comprometer as propriedades mecânicas. Em contrapartida, a formulação com 3% de adição, apesar de exibir boa resistência inicial, sofreu degradação aos 90 dias, sugerindo um limite de saturação do material na matriz cimentícia. Assim, o reaproveitamento do resíduo gerado na produção de hidrogênio demonstrou-se uma solução sustentável, promovendo a valorização de materiais reciclados e contribuindo para a redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: Aluminato de Sódio; Caracterização química; Construção civil; Energias renováveis; Geração de hidrogênio

ABSTRACT

The transition to a sustainable energy matrix is essential to face global challenges such as climate change, scarcity of natural resources and energy security. In this context, the hydrogen-based economy emerges as a promising alternative, since this element has a high calorific value and can be produced from renewable sources. The use of recyclable metals, such as aluminum, offers an approach to sustainable hydrogen generation processes. In this study, the generation of hydrogen from aluminum can waste was analyzed, with the gas being used for the extended autonomy of an electric vehicle, while the solid waste was evaluated for its potential addition in the construction industry. To characterize the waste, Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) and X-ray Diffraction (XRD) analyses were performed in order to determine its chemical composition, crystal structure and morphology. The results indicated that, despite the presence of metallic impurities such as Cu, Mg and Fe in the recycled cans, their structural properties remain compatible with those of industrial chips, demonstrating that the recycling process does not significantly compromise the quality of the material for the H₂ generation system and consequently for its potential use in the civil industry. Furthermore, the XRD analysis revealed the predominance of crystalline phases, while the presence of NaOH in the reaction medium conferred basic characteristics to the structure of the waste from the cans. In order to evaluate its potential in civil construction, compressive strength and modulus of elasticity tests were conducted on different cement formulations with mortar replacement by 1% and 3% of the waste. The results demonstrated that the addition of 1% of the waste was the best alternative, presenting performance equivalent to standard cement over time, without compromising the mechanical properties. In contrast, the formulation with 3% addition, despite exhibiting good initial strength, suffered degradation after 90 days, suggesting a saturation limit of the material in the cement matrix. Thus, the reuse of the waste generated in hydrogen production proved to be a sustainable solution, promoting the valorization of recycled materials and contributing to the reduction of environmental impacts.

Keywords: Chemical characterization; Civil Building; Hydrogen Generation; Renewable energy; Sodium Aluminate

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico Scopus – keywords: renewable energy and renewable sources ...	15
Figura 2: Abundância mundial dos poços de petróleo em bilhões de barris de óleo .	16
Figura 3: Porcentagem de barris de petróleo por continente	16
Figura 4: 17 ODS – ONU.....	17
Figura 5: Fornecimento total de energia mundial por fonte de 1990 à 2021	20
Figura 6: Gráfico Scopus – keywords: hydrogen generation and metals	28
Figura 7: Fluxograma de processos do Projeto ROTA 2030	46
Figura 8: Amostras em pó, após preparo, sendo a) S1 e b) S2	47
Figura 9: Preparo de amostras na estufa	51
Figura 10: Etapas de preparo de amostra	52
Figura 11: Microscopia Eletrônica de Varredura para o conjunto de amostras oriundos do cavaco.	56
Figura 12: Microscopia Eletrônica de Varredura para o conjunto de amostras oriundos da latinha.....	57
Figura 13: EDS realizado para a amostra derivada do cavaco	58
Figura 14: EDS realizado para a amostra derivada da latinha de alumínio.....	59
Figura 15: Limite de detecção do ICP-OES	62
Figura 16: ICP-OES – concentrações relativas as amostras com ênfase nos metais de interesse.....	62
Figura 17: Concentração de alumínio em porcentagem de amostra.....	64
Figura 18: Difratoograma da amostra proveniente da latinha de alumínio	65
Figura 19: Difratoograma da amostra proveniente do cavaco industrial	65
Figura 20: Variação do módulo de elasticidade ao longo do tempo	69
Figura 21: Resistência à compressão em relação ao tempo.....	71
Figura 22: Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo – Cimento Portland.....	73
Figura 23: Força aplicada até a ruptura dos corpos de prova	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do hidrogênio com outros combustíveis convencionais	21
Tabela 2: Métodos de produção de hidrogênio	24
Tabela 3: Reatividade de metais em meio aquoso e ácido	29
Tabela 4: Potenciais destinações do aluminato de sódio	35
Tabela 5: Principais resíduos utilizados na indústria civil em incorporações ao cimento	39
Tabela 6: Grupo amostral e relação com origem do alumínio	48
Tabela 7: Teores de Elementos Químicos nas Amostras Analisadas por EDS	60
Tabela 8: Dados detectados pelo ICP-OES em mg/kg dos metais em análise	63
Tabela 9: Módulo de Elasticidade Estática (E) – GPa	67
Tabela 10: Resistência à Compressão no Módulo de Elasticidade (MPa)	69
Tabela 11: Resistência à Compressão – Cimento Portland (MPa)	71
Tabela 12: Força aplicada até ruptura (N) – Cimento Portland	73
Tabela 13: Produção científica	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Técnicas de Caracterização do Subproduto.....	48
Quadro 2: Traços dos corpos de prova.....	53
Quadro 3: Ensaaios de potencial destinação do resíduo na indústria civil.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 TRANSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA	19
2.2 HIDROGÊNIO	21
2.2.1 DESAFIOS E APLICAÇÕES TANGÍVEIS AO USO DO HIDROGÊNIO	22
2.2.2 FORMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	23
2.3 REAÇÕES MEDIADAS POR METAIS PARA A GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO	28
2.4 ALUMÍNIO	30
2.4.1 RECICLAGEM DE ALUMÍNIO NO BRASIL	30
2.5 REAÇÃO QUÍMICA: ALUMÍNIO E SOLUÇÃO ALCALINA.....	31
2.6 ECONOMIA CIRCULAR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	33
2.7 INDÚSTRIA CIVIL E INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS	36
2.7.1 CIMENTO PORTLAND E ARGAMASSA	36
2.7.2 Incorporação de resíduos e propriedades do cimento	38
2.7.3 Substituição parcial do cimento por resíduos industriais	42
2.7.4 Limites definidos para substituição de cimento por resíduos industriais	43
2.7.5 Aluminato de sódio no cenário da construção civil	44
3 OBJETIVOS	45
3.1.1 Objetivo geral	45
3.1.2 Objetivos específicos.....	45
4 MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1 MATERIAIS:	45
4.2 REAÇÃO QUÍMICA	45
4.3 PREPARO DE AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	47
4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	48
4.4.1 DRX.....	49
4.4.2 MEV e EDS	49
4.4.3 ICP-OES.....	50
4.5 PREPARO DE AMOSTRAS PARA A POTENCIAL DESTINAÇÃO CIVIL	51
4.6 POTENCIAL DESTINAÇÃO JUNTO A CONSTRUÇÃO CIVIL, COMO ADIÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	53
5 RESULTADOS	55

5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	55
5.1.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	56
5.1.2 ICP-OES.....	61
5.1.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).	64
5.2 POTENCIAL DESTINAÇÃO.....	66
5.2.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TANGENCIAL	66
5.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM 3 IDADES – CIMENTO PORTLAND ...	71
5.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	75
6 CONCLUSÃO	78
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
8 REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Desde a Primeira Revolução Industrial, a utilização do carvão, seguida pelo petróleo, impulsionou um crescimento industrial sem precedentes. No entanto, o uso desenfreado desses combustíveis fósseis gerou impactos globais profundos, como a intensificação das mudanças climáticas, poluição ambiental generalizada e crises energéticas. A dependência desses recursos tornou-se evidente na década de 1970, durante a primeira crise do petróleo, quando muitos países enfrentaram a escassez de abastecimento, levando a instabilidade econômica, fome e caos social, evidenciando a fragilidade das economias globais frente à matriz fóssil (Ma et al., 2022). Esses eventos ressaltaram a urgência em buscar fontes alternativas de energia, dado que os combustíveis fósseis, além de finitos, são grandes responsáveis pela degradação ambiental (Alharthi et al., 2022).

Desde então, muitos meios de migração da matriz energética mundial foram estudados e existem incentivos significativos para que essa mudança ocorra, justamente porque a energia é fundamental para a existência terrestre. Destaca-se o aumento populacional como um dos motivos que mais incentiva a busca por fontes renováveis, pois para que haja futuro para a humanidade é necessária a existência de energia, principalmente para manter a tecnologia já existente (Emmott, 2013; Ang et al., 2022).

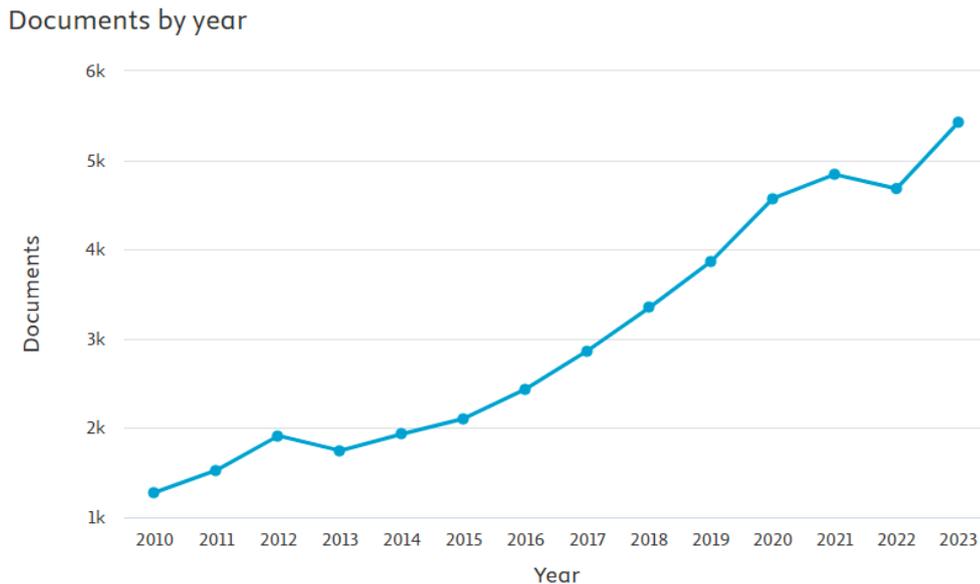
Assim, além do fator de esgotamento energético decorrente dos combustíveis fósseis estar ligado à sua escassez futura e diretamente relacionado à extinção da vida humana, a primeira crise petrolífera no mundo também foi um dos principais gatilhos para a busca por energias renováveis (Pata, 2018).

O conceito de energia renovável é entendido como: “energia limpa que pode ser gerada através de um ciclo” (Çoker et. al., 2010; Manish et. al., 2006). As energias renováveis são responsáveis pela consolidação da mudança na matriz energética mundial. Alguns exemplos de fontes de energia renováveis são: hidrelétrica, eólica, biomassa e até mesmo o uso de H₂ como transportador de energia (Turner, 1999; Santika, et. al., 2019).

Dessa forma, notabilizam-se muitos estudos, que delineiam maneiras pelas quais a migração energética para uma matriz sustentável possa ser efetiva, partindo do uso de bioprodutos ou de biocombustíveis, fortalecendo o movimento contra a

dependência de fontes fósseis. Tal estímulo é cada vez mais frequente, principalmente no que diz respeito ao uso de biocombustíveis e à busca por energias renováveis. Segundo o *Scopus*®, as produções científicas sobre estes temas possuem uma tendência de crescimento, tal como observa-se na Figura 1.

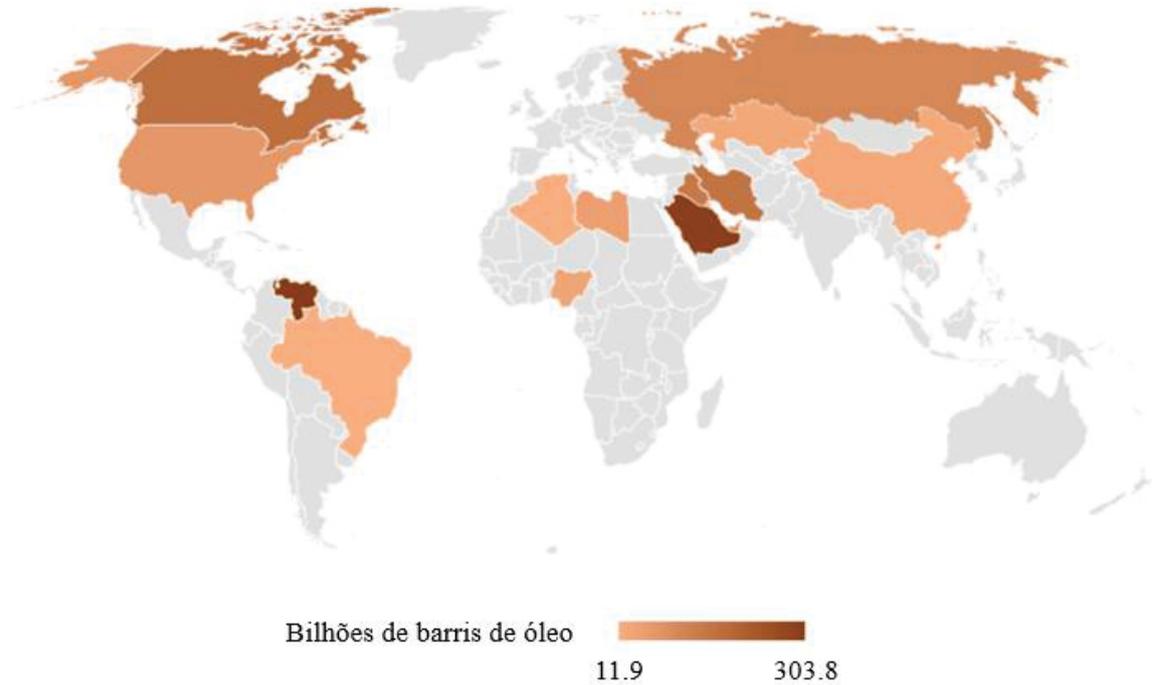
Figura 1: Gráfico Scopus – keywords: renewable energy and renewable sources



Fonte: Scopus, (2025)

Além disso, outro fator para a geração de energias renováveis também se deve a critérios políticos e geográficos. A maioria dos combustíveis fósseis utilizados na atual matriz energética são derivados do petróleo, que é naturalmente abundante em todo o mundo. Todavia, as jazidas mais ricas localizam-se no Oriente Médio, que constantemente conflitam com o Ocidente, em especial com os EUA. A Figura 2, além de demonstrar a abundância mundial dos poços de petróleo, demonstra também a densidade em milhares de milhões de barris de petróleo para cada região global.

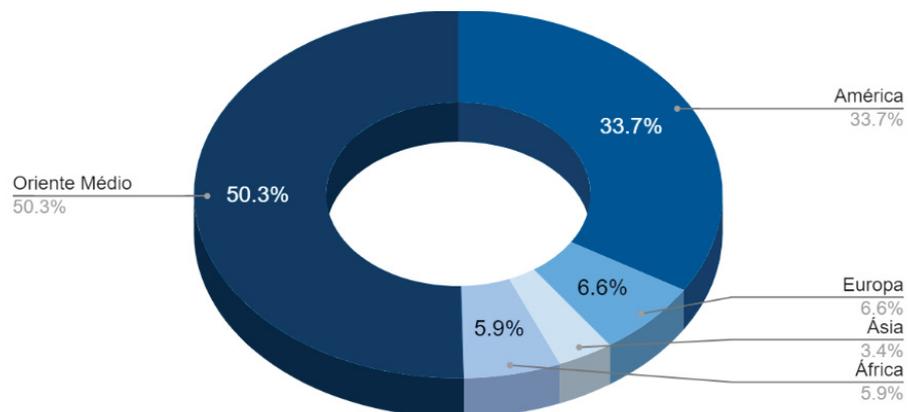
Figura 2: Abundância mundial dos poços de petróleo em bilhões de barris de óleo



Fonte: Adaptado de Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, (2020)

Por sua vez, a Figura 3 ilustra a porcentagem de barris de petróleo detidos por cada continente, evidenciando como a distribuição desigual desses recursos contribui implicitamente para conflitos de interesses geopolíticos e ideológicos, que, por sua vez, impactam na gestão e na geração de energia em escala global.

Figura 3: Porcentagem de barris de petróleo por continente



Fonte: Adaptado de Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, (2020)

Priorizando um manejo eficiente e equitativo na distribuição de energia global, e buscando não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a adesão a princípios de governança responsável, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu, em 2017, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como parte da Agenda 2030. Os 17 ODS vão além de metas exclusivamente ambientais, incorporando dimensões do conceito ESG (*Environmental, Social, and Governance*), que englobam práticas relacionadas à proteção ambiental, ao avanço social e à governança responsável e ética. No âmbito da transição energética, a Figura 4 traz ênfase em cor, aos objetivos propostos pela ONU. No cenário nacional, em 2020, o Brasil promoveu através do Ministério de Minas e Energia (MME) a implementação do Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) que tornou-se fundamental no cenário energético, pois consolida notas técnicas voltadas ao desenvolvimento tecnológico e ao atendimento da demanda energética com uma visão estratégica de longo prazo.

Figura 4: 17 ODS – ONU



Fonte: Adaptado de ONU, (2023)

No contexto dos incentivos globais para a transição da matriz energética, muitos estudos destacam o uso do hidrogênio (H_2) como um eficiente carreador de energia. O H_2 sobressai por sua fácil obtenção e por seu elevado poder calorífico, que o torna atrativo, em comparação a combustíveis como gasolina e diesel. Com o crescente interesse nesse elemento, pesquisas têm se concentrado em formas de

produzi-lo de maneira sustentável, visando a manutenção de sistemas inteiramente renováveis.

O Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Autossustentável (NPDEAS) tem explorado alternativas para a produção de hidrogênio (H_2) a partir de alumínio reciclado, visando ampliar a autonomia de veículos elétricos. A proposta combina a geração de H_2 por meio da reação do alumínio reciclável com células a combustível, que transformam energia química em elétrica, integrada a um sistema interno de armazenamento para aplicação em veículos. Essa abordagem busca não apenas otimizar o consumo de energia e promover a transição da matriz energética para uma mais ecológica, mas também na redução da pegada de carbono em relação ao uso de combustíveis fósseis, promovendo uma solução mais sustentável para o setor de mobilidade.

Contudo, além do H_2 , a reação gera subprodutos, como o aluminato de sódio, que também requer manejo adequado. Para garantir a sustentabilidade do sistema, este trabalho buscou caracterizar quimicamente e destinar adequadamente os resíduos gerados, promovendo sua reutilização de forma a gerar benefícios e consolidar um ciclo produtivo sustentável, integrando o sistema e maximizando o aproveitamento de todos os produtos e subprodutos gerados, contribuindo para benefícios econômicos e ambientais.

1.2. JUSTIFICATIVA

A transição para uma matriz energética baseada em fontes renováveis é essencial para a sustentabilidade global, e a adoção de um mix energético eficiente contribui significativamente para esse processo. Nesse contexto, a produção de hidrogênio a partir de fontes sustentáveis, como resíduos de alumínio reciclado, surge como uma estratégia promissora, especialmente na ampliação da autonomia de veículos elétricos. Essa alternativa permite o armazenamento de energia em forma de combustível limpo, superando limitações como a baixa autonomia e o longo tempo de recarga, ao mesmo tempo em que promove a economia circular e a valorização de resíduos, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e da eficiência energética. Contudo, como ocorre em qualquer processo químico, a reação entre os reagentes não resulta apenas na formação de hidrogênio, mas também na geração de subprodutos que exigem uma análise detalhada e caracterização. Nesse sentido, faz-

se necessário avaliar os resíduos gerados, particularmente o aluminato de sódio, a fim de determinar a melhor forma de manejo e destinação desses materiais. A gestão adequada desses subprodutos é de grande importância, pois a disposição inadequada pode representar riscos à cadeia de reciclagem de alumínio, um processo que, atualmente, é eficiente e sustentável. Portanto, é fundamental garantir que a produção de hidrogênio, ao ser incorporada ao ciclo produtivo, não interfira negativamente na economia circular do alumínio e, ao contrário, contribua para a sustentabilidade do sistema como um todo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para embasar cientificamente a pesquisa e validar o estudo apresentado, é fundamental realizar um levantamento bibliográfico que explore as motivações, as tecnologias aplicadas e as oportunidades de estudo relacionadas a esta dissertação. O objetivo é contribuir para o avanço da ciência e da engenharia, além de impulsionar o desenvolvimento tecnológico, promovendo benefícios para a sociedade e ampliando os campos de pesquisa e inovação nas áreas de hidrogênio, caracterização e manejo de materiais e na captura de carbono.

2.1 TRANSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA

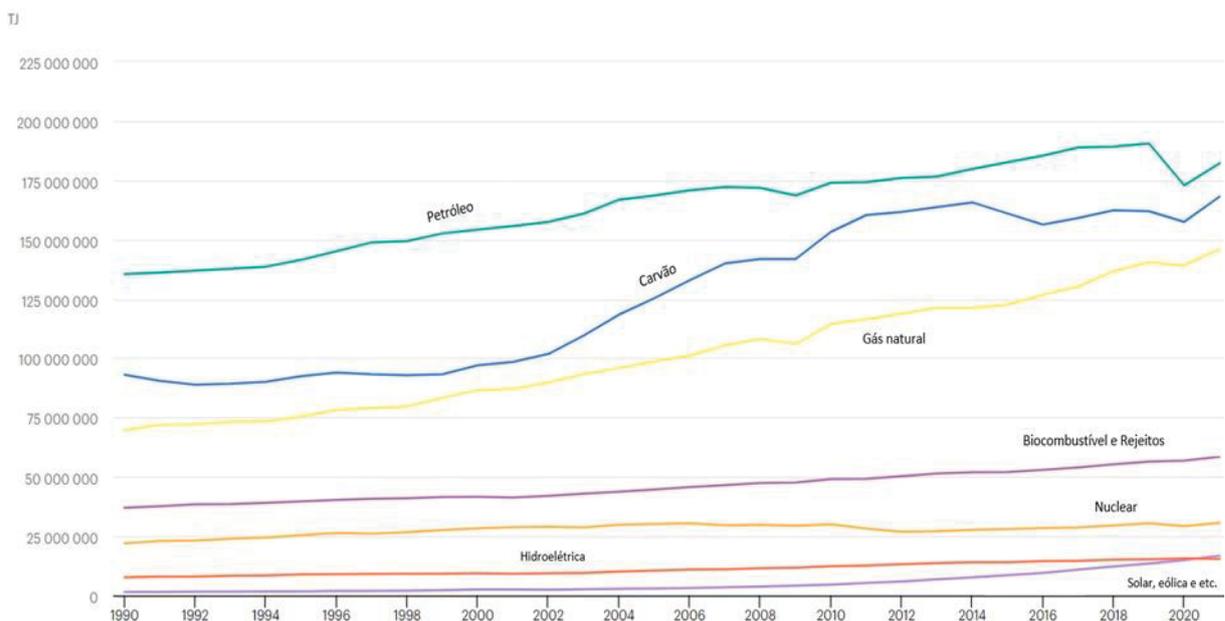
Estima-se que a população global aumente em mais de 2,2 bilhões de pessoas até 2050 (ONU, 2020). Esse crescimento populacional acelerado resultará em um aumento expressivo no consumo de energia e nas emissões de CO₂, intensificando as mudanças climáticas e exacerbando o efeito estufa (IEA, 2021). Diante dessa realidade, o desenvolvimento de novas fontes de energia limpas e renováveis tem avançado, principalmente pela forte dependência global de combustíveis fósseis e pela crescente necessidade de energia para atender à demanda de uma população em expansão (Gür, 2018).

A combinação de crises climáticas e flutuações no mercado de petróleo tem fomentado pesquisas e investimentos em energias renováveis, além de estimular o desenvolvimento de tecnologias voltadas à geração de energia com menores emissões ou emissão nula de CO₂, buscando mitigar o aquecimento global, que pode alcançar 1,5 °C até o final do século (Alharthi et al., 2022).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), o consumo de diferentes matrizes energéticas tem evoluído, mas o aumento da capacidade instalada de fontes renováveis, como parques eólicos e sistemas fotovoltaicos, ainda não são o suficiente para superar a predominância de fontes não-renováveis, como petróleo, carvão e gás natural, que continuam liderando o consumo global.

Por outro lado, um dado promissor destacado na Figura 5, é o comportamento expressivo destacado pelo crescimento das tecnologias baseadas em fontes renováveis, como energia solar, eólica e dispositivos alternativos, que têm superado a hidroeletricidade. Embora sejam amplamente utilizadas, as usinas hidrelétricas apresentam limitações geográficas e geram impactos ambientais significativos, como a submersão de grandes áreas de vegetação. O crescimento das renováveis indica uma redução gradual nos investimentos em hidrelétricas e reforça a busca por alternativas mais sustentáveis e viáveis em diversos contextos geográficos e econômicos.

Figura 5: Fornecimento total de energia mundial por fonte de 1990 à 2021



Fonte: Adaptado de IEA, (2021).

2.2 HIDROGÊNIO

Em 2018, mais de 30% da energia global foi proveniente de petróleo e fontes fósseis, enquanto mais de 45% tiveram origem em carvão e gás natural, conforme apontado pela Agência Internacional de Energia (IEA). Menos de 20% foi gerado a partir de fontes renováveis, como hidrelétricas, biomassa e energia nuclear. Diversas alternativas de energias renováveis têm sido objeto de pesquisa, incluindo a avaliação de sua viabilidade econômica. Entre essas opções, destacam-se o emprego de células fotovoltaicas, a captação de energia solar, o desenvolvimento de células a combustível e a produção de hidrogênio (Da Silva, 2020).

O emprego do hidrogênio como fonte de energia surge como uma alternativa para a produção mais limpa de energia. O hidrogênio, considerado o elemento mais simples e abundante do universo, é amplamente presente na Terra na forma molecular de água – H₂O (Wanghon, 2018). Em sua forma molecular gasosa (H₂) ele se destaca por apresentar um poder calorífico significativamente superior em comparação a outros combustíveis, o que torna seu uso mais rentável, demandando quantidades menores para alcançar os mesmos valores energéticos. Algumas de suas principais características que o diferem de outras substâncias também consideradas como combustíveis, estão reunidas na Tabela 1.

Tabela 1: Características do hidrogênio com outros combustíveis convencionais

Propriedades	Hidrogênio	Metano	Gasolina	Diesel
Densidade de energia (MJ/kg)	120,0	55,60	46,40	45,60
Densidade (kg/m ³)	0,089	0,657	715 – 780	875 – 959
Volume ocupado por unidade de massa (L/kg)	1123,6	1522,1	1,3 – 1,4	1,0 – 1,1
Volume ocupado por unidade de energia (L/MJ)	100	25	0,03	0,026
Ponto de ebulição (°C)	-253	-162	27 – 225	187 – 343
Energia de ignição (MJ)	0,02	0,30	0,8	20

Fonte: Adaptado de Muhammed, (2022)

Além das características comparadas acima com outros combustíveis, a queima do gás hidrogênio resulta apenas em vapor d'água, conferindo-lhe a característica de ser um combustível *eco-friendly*, contribuindo também para a captura de carbono (Lozano-Martín et al., 2022).

2.2.1 DESAFIOS E APLICAÇÕES TANGÍVEIS AO USO DO HIDROGÊNIO

Apesar dos diversos benefícios proporcionados pelo uso do hidrogênio como combustível, surgem desafios notáveis relacionados à sua produção e armazenamento (Khan et al., 2022). No que tange o armazenamento, uma das principais dificuldades está associada ao fato de o hidrogênio ter baixa densidade e ponto de ebulição, o que dificulta na sua armazenagem. Para lidar com essa questão, é necessário recorrer a altas pressões e monitoramento constante devido à sua natureza altamente reativa, tornando os tanques de gás comprimido a opção mais viável para essa tarefa. O enfrentamento desses desafios é crucial para ampliar a adoção eficaz do hidrogênio como fonte de energia.

O processo de conversão de energia nas células a combustível difere da combustão em alta temperatura, não resultando na geração de poluentes, como o NO_x . Nas células a combustível, o gás O_2 atua como agente oxidante, reagindo com o gás H_2 que é introduzido pelo lado oposto ao oxigênio (Sadeghi et al., 2020). O produto dessa reação é água e corrente elétrica, devido ao fluxo de elétrons. Esse método destaca-se como uma opção ecologicamente responsável, uma vez que produz apenas água como resultado da reação (Wang et al., 2018).

Nesse contexto, o hidrogênio emerge como uma alternativa promissora nas discussões acerca das migrações nas matrizes energéticas (Tashie-Lewis et al., 2021). Apesar dos desafios científicos e tecnológicos envolvidos, diferentes métodos para a produção de hidrogênio de maneira limpa e sustentável podem ser explorados, e a modelagem matemática desses métodos pode complementar os modelos existentes de células a combustível (Dos Santos, 2019; Vargas et al., 2004; Vargas e Bejan, 2004).

2.2.2 FORMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

É crucial notar que, embora existam várias técnicas para a produção de hidrogênio, algumas delas podem resultar em danos significativos à atmosfera (Wang et al., 2009). A Tabela 2 oferece uma visão mais aprofundada dos diversos métodos de produção de hidrogênio e de seus respectivos impactos ambientais. A avaliação desses aspectos é essencial para a análise da sustentabilidade e viabilidade das fontes de produção de hidrogênio.

Tabela 2: Métodos de produção de hidrogênio

Matéria-prima	Técnica de produção	Método de produção	Impacto ambiental	Referências
Água	Eletrólise	A separação da água em H ₂ e O ₂ por meio do uso de eletricidade é realizada através de células eletrolíticas. Essas células contêm uma solução eletrolítica e dois eletrodos, um cátodo e um ânodo. Ao aplicar uma corrente elétrica à água através desses eletrodos, ocorre a eletrólise, resultando na decomposição da água em hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo.	Pode ocasionar a emissão de gases de efeito estufa, dependendo da fonte de eletricidade empregada.	Maggio et. al. (2022); Epelle et al. (2022); Burton et. al. (2021)
	Fotólise	Naturalmente, o hidrogênio se forma durante a fotossíntese das plantas e pode ser produzido artificialmente em laboratório, onde a água é decomposta em H ₂ e O ₂ por meio do uso de luz.	Apesar de ser considerado um processo lento, a fotólise é amplamente considerada, do ponto de vista ambiental, uma forma altamente favorável de produção de hidrogênio, uma vez que não emite gases de efeito estufa ou outros poluentes durante a reação.	Chen et. al. (2022); Guo et al. (2022); Mahbub et al. (2022)
Sais inorgânicos (NaCl)	Eletrólise de sais fundidos	O hidrogênio é obtido por meio da decomposição de sais inorgânicos em H ₂ e Cl. Posteriormente, o H ₂ pode ser separado do cloro por meio de processos de purificação.	Assim como na eletrólise convencional, a elevada demanda energética do processo destaca a importância da fonte de eletricidade. Esse aspecto é crucial para minimizar as emissões ligadas à geração de eletricidade e reduzir os impactos ambientais.	Sher et. al. (2020); Li et al. (2023); Asal et. al. (2023)

Gás natural, propano e metano.	Reforma de hidrocarbonetos	O processo é realizado aquecendo o hidrocarboneto na presença de um catalisador, resultando na geração de H ₂ e outros compostos, como CO e CO ₂ .	Emite CO ₂ como subproduto, contribuindo para o efeito estufa.	Onwumezie et. al. (2023); Amiri et. al. (2020); Woo et al. (2023)
Biomassa	Gaseificação da biomassa	Este processo fundamenta-se na transformação da biomassa em um gás sintético conhecido como "syngas", composto por H ₂ , metano, monóxido de carbono e dióxido de carbono. O hidrogénio pode ser extraído do syngas através de processos de purificação.	A geração de hidrogénio a partir de biomassa pode resultar em emissões de gases do efeito estufa, especialmente quando o processo envolve a queima direta da biomassa.	Cormos (2023); Valizadeh et al. (2022); Ghodke et al. (2023)
Processos biológicos	Fotossíntese	Determinadas algas e cianobactérias possuem a capacidade de gerar hidrogénio por meio da fotossíntese. Esse processo implica na quebra da água em H ₂ e O ₂ na presença de luz solar.	Devido à sua natureza, a fotossíntese é benéfica para o meio ambiente, pois não produz nenhum gás de efeito estufa. Já para a fotossíntese artificial, faz-se necessário avaliar o ciclo de vida do processo.	Toepel, et. al. (2023); Liu et. al. (2022); Abas, et. al. (2020)
	Fermentação	Certas bactérias anaeróbicas têm a capacidade de gerar hidrogénio por meio da fermentação de açúcares. Esse processo engloba a decomposição dos açúcares em ácido acético, álcool e H ₂ .	Os impactos relacionados estão associados à emissão de gases de efeito estufa, à utilização de recursos naturais, à produção de resíduos e ao eventual uso de aditivos químicos.	Xia et. al. (2020); Lee, et. al. (2020); Balachandar et al. (2020)

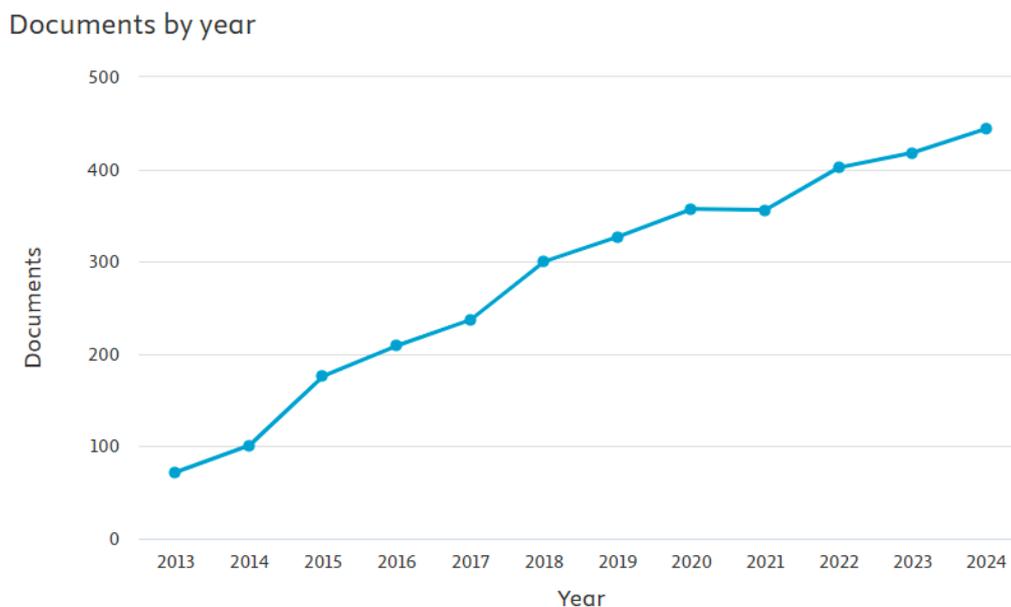
	Digestão anaeróbica	Bactérias presentes no trato gastrointestinal de animais ruminantes, como vacas e ovelhas, são capazes de gerar hidrogênio por meio da digestão anaeróbica de celulose e de outros carboidratos.	A digestão anaeróbica pode acarretar impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa, a geração de efluentes e resíduos, o uso de recursos naturais e a potencial competição com a produção de alimentos.	Liu et al. (2023); Córdova-Lizama et al. (2022); Timofeeva et al. (2022)
	Foto fermentação	Certas bactérias possuem a capacidade de gerar hidrogênio por meio da foto fermentação. Esse processo implica na decomposição da água em H ₂ e O ₂ na presença da luz solar, utilizando o hidrogênio produzido para a geração de energia.	Os impactos ambientais estão associados ao consumo de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa, tratamento de efluentes e subprodutos, e são influenciados pela dependência da eficiência energética das condições de luz solar.	Shui et al. (2023); Zhang et al. (2023); Zhang et al. (2023)
	Processos bioeletroquímicos	Algumas bactérias são capazes de produzir hidrogênio através de processos eletroquímicos, utilizando elétrons de elementos metálicos ou outros compostos como fonte de energia.	São processos que exigem uma avaliação ambiental cuidadosa. A origem sustentável da biomassa é essencial para evitar desmatamento e perda de biodiversidade. Emissões de gases, como metano, e o alto consumo de recursos naturais podem impactar o meio ambiente.	Hasnaoui et al. (2020); Qu et al. (2022); Zhang, et al. (2022)
Vias metálicas	Oxidação do alumínio	A reação entre alumínio e NaOH em estado aquoso resulta na formação de hidrogênio, proporcionando uma fonte de energia limpa e eficiente. A simplicidade e a rapidez do processo, aliadas ao baixo custo dos materiais envolvidos,	É um processo altamente exotérmico, demandando assim cautela na produção, mas no âmbito ambiental, gera-se apenas alumínio de sódio, que pode ter uma destinação	Huang et al., 2013; Ilyukhina et al., 2017

		tornam essa abordagem particularmente atraente para a produção em larga escala	industrial, evitando assim o descarte indevido de resíduos químicos.	
--	--	--	--	--

Fonte: A autora, (2025)

Diante de tal, há uma crescente adoção à métodos sustentáveis para a produção de hidrogênio, dentre eles, o uso de metais se destaca. A Figura 6 mostra essa tendência, sob uma ótica científica, a partir do Scopus®.

Figura 6: Gráfico Scopus – keywords: hydrogen generation and metals



Fonte: Scopus, (2025)

2.3 REAÇÕES MEDIADAS POR METAIS PARA A GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO

No âmbito químico, alguns metais exibem níveis de reatividade superiores a outros, tornando-os mais propensos a participar de reações que resultam na produção de hidrogênio (Greenwood, 1997). Para tornar mais visual essa reatividade dos metais, utiliza-se a relação de reatividade de metais. Notavelmente, os metais alcalinos e alcalino-terrosos, localizados nos grupos IA e IIA da tabela periódica, respectivamente, são amplamente empregados para a finalidade de geração de hidrogênio (Atkins, 2006).

A Tabela 3 apresenta exemplos de reações, juntamente com a probabilidade de ocorrência dessas reações, seja em meio básico ou ácido:

Tabela 3: Reatividade de metais em meio aquoso e ácido

	Metal	Reação com água	Reação com ácido	Reatividade
IA (Metais Alcalinos)	Lítio (Li)	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{Li} \rightarrow 2\text{LiOH} + \text{H}_2$	$2\text{Li} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{LiCl} + \text{H}_2$	Altamente reativos
	Sódio (Na)	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{Na} \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$	$2\text{Na} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{NaCl} + \text{H}_2$	
	Potássio (K)	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{K} \rightarrow 2\text{KOH} + \text{H}_2$	$2\text{K} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{KCl} + \text{H}_2$	
	Rubídio (Rb)	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{Rb} \rightarrow 2\text{RbOH} + \text{H}_2$	$2\text{Rb} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{RbCl} + \text{H}_2$	
	Césio (Cs)	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{Cs} \rightarrow 2\text{CsOH} + \text{H}_2$	$2\text{Cs} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CsCl} + \text{H}_2$	
		Frâncio (Fr)	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{Fr} \rightarrow 2\text{FrOH} + \text{H}_2$	Raramente
IIA (Metais Alcalinos Terrosos)	Magnésio (Mg)	$\text{H}_2\text{O}^* + \text{Mg} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$	$\text{Mg} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{H}_2$	Altamente reativos
	Cálcio (Ca)	$\text{H}_2\text{O} + \text{Ca} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$	$\text{Ca} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2$	
	Estrôncio (Sr)	$\text{H}_2\text{O} + \text{Sr} \rightarrow \text{Sr}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$	$\text{Sr} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{SrCl}_2 + \text{H}_2$	
	Bário (Ba)	$\text{H}_2\text{O} + \text{Ba} \rightarrow \text{Ba}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$	$\text{Ba} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{BaCl}_2 + \text{H}_2$	
		Rádio (Ra)	$\text{H}_2\text{O} + \text{Ra} \rightarrow \text{Ra}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$	$\text{Ra} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{RaCl}_2 + \text{H}_2$
Outros metais	Alumínio (Al)	$2\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2$	$2\text{Al} + 6\text{HCl} \rightarrow 2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2$	Reativo
	Zinco (Zn)	Não reage	$\text{Zn} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$	Reativo, mas precisa de meio ácido
	Ferro (Fe)	Não reage	$\text{Fe} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2$	

*H₂O quente

Fonte: A Autora, (2025)

Os metais mencionados na Tabela 3 têm a capacidade de liberar gás hidrogênio ao reagir com água ou ácidos. Embora Zn e Fe não reajam diretamente com a água, podem gerar gás hidrogênio ao reagir com agentes redutores. Em contraste, os metais Fr e Ra são raros e altamente radioativos, dificultando experimentos práticos. É essencial reconhecer que a reatividade desses metais pode variar, e a eficiência das reações pode depender de fatores como temperatura, concentração de ácido/base e condições específicas de reação (e.g. pressão).

2.4 ALUMÍNIO

O alumínio é um metal leve e versátil, de coloração prateada, cujo símbolo químico é Al e número atômico é 13. Ele desempenhou um papel essencial no desenvolvimento da civilização humana, especialmente durante a Revolução Industrial.

Devido às suas propriedades, o alumínio possui um alto valor agregado em diversos setores industriais (Constantino et al., 2001). Sua baixa densidade (2,7 g/cm³) e resistência moderada à corrosão fazem dele um material amplamente utilizado na fabricação de aeronaves, automóveis, embalagens e estruturas leves. A leveza do alumínio impulsionou melhorias na eficiência do transporte e no consumo de energia. Além disso, sua excelente condutividade térmica e elétrica o torna indispensável na produção de fios, cabos e diversos dispositivos eletrônicos (Greenwood, 1997).

A alta condutividade térmica e elétrica do alumínio torna-o um material essencial para o setor tecnológico. Sua versatilidade, impulsionada pelos avanços científicos e tecnológicos, foi determinante para essa evolução, consolidando-o como um dos pilares da civilização industrializada (Kauffman e Adams, 1990).

Atualmente, o ciclo de vida do alumínio destaca-se devido à sua alta taxa de reutilização, exigindo apenas cerca de 5% da energia necessária para a produção primária. Esse processo reduz significativamente a emissão de CO₂ e a extração de bauxita, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a economia circular. Além disso, o alumínio reciclado mantém suas propriedades físico-químicas, permitindo sua reaplicação nos segmentos industriais.

2.4.1 RECICLAGEM DE ALUMÍNIO NO BRASIL

No contexto brasileiro, a gestão da reciclagem de alumínio assume posição de destaque, refletindo uma trajetória ascendente ao longo dos anos. O alumínio, material que pode ser reciclado em ciclos indefinidos, emerge como protagonista em iniciativas sustentáveis, apresentando-se como alternativa ecoeficiente face à produção primária desse metal. A reciclagem de alumínio, notadamente voltada para latas de bebidas, figura como componente primordial nos esforços direcionados à sustentabilidade e à mitigação do impacto ambiental.

A Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alta Reciclabilidade (ABRALATAS) assume relevante papel no panorama nacional da reciclagem de alumínio. Representando os fabricantes de latas destinadas a bebidas, a ABRALATAS desempenha função crucial na promoção de práticas sustentáveis e na conscientização acerca da reciclagem de latas de alumínio. Entre suas iniciativas preponderantes, destaca-se o Programa "A Cada Lata Uma Nova História", que visa estimular a reciclagem de latas de alumínio e disseminar a consciência sobre a significância desse processo. A associação opera em estreita colaboração com diversas entidades, incluindo órgãos governamentais, empresas, cooperativas de catadores e a sociedade civil, alinhando esforços para fomentar boas práticas na gestão de resíduos e na cadeia de reciclagem de alumínio.

Conforme dados fornecidos pela ABRALATAS para o ano de 2021, o Brasil alcançou uma conquista notável ao atingir o recorde mundial na reciclagem de latinhas de bebidas consumidas, registrando uma taxa de aproximadamente 99%. Ainda, até o ano de 2022, a ABRALATAS relata a reciclagem de mais de 33 bilhões de unidades de latas de bebidas industriais, correspondendo a uma massa total de aproximadamente 415,500 milhões de quilogramas de alumínio reciclado. Destaca-se que, neste mesmo período, foi atingida a reciclagem de aproximadamente 98,7% desse montante.

No contexto global, o Brasil posiciona-se como o terceiro maior produtor de latas de bebidas, evidenciando sua expressiva participação na indústria. Além disso, destaca-se como líder mundial em termos de reciclagem de latas de alumínio, solidificando sua posição ao reciclar cerca de 98,7% das latinhas consumidas. Esses indicadores reforçam o comprometimento do Brasil com práticas sustentáveis e ressaltam seu papel proeminente no cenário internacional como um dos principais agentes na produção e reciclagem de latas de bebidas.

2.5 REAÇÃO QUÍMICA: ALUMÍNIO E SOLUÇÃO ALCALINA

Na busca pelo desenvolvimento de um sistema sustentável de produção de hidrogênio, o alumínio tem se destacado como reagente em reações químicas que resultam na geração de hidrogênio como produto (Bolt et al., 2020; Haller et al., 2021; Hurtubise et al., 2018). O aspecto econômico dessa escolha é promissor, pois os reagentes utilizados na reação, especialmente água e alumínio, são facilmente

obtidos. Ao serem combinados em meio alcalino com uma solução aquosa de hidróxido de sódio, eles reagem para produzir gás H₂ e aluminato de sódio. Esse sistema é economicamente vantajoso, uma vez que o hidróxido de sódio possui considerável importância industrial, e o processo não requer equipamentos dispendiosos para operar (Hiraki, 2007; Akiyama, 2009).

Além disso, este processo se destaca sobretudo quando se considera que a água do mar ou águas residuais podem ser utilizadas como a fonte de líquido, dispensando a necessidade de entrada de energia adicional no sistema, que sob uma ótica termodinâmica é um ponto favorável, pois o balanço de energia associado é menor (Soler et al., 2009)

Bolt, Dincer e Angelin-Chab, 2020, afirmam que o alumínio é o terceiro elemento mais abundante em nosso planeta e corresponde a 8,1% da composição da crosta terrestre. Por isso, o processo supracitado apresenta-se como uma matéria-prima estratégica nesse contexto (Parmuzina e Kravchenko, 2008).

A reação entre o alumínio e o hidróxido de sódio é altamente exotérmica, liberando uma energia térmica da ordem de 853 kJ/mol (Cassanelli, 2016). No entanto, um desafio surge quando o alumínio entra em contato com o ar atmosférico, oxidando-se e formando uma fina camada de passivação de óxido de alumínio que isola o metal do ambiente externo. Para superar isso, utiliza-se um catalisador para reduzir o tempo de reação, que naturalmente é prolongado, levando várias horas. O catalisador empregado neste estudo é a solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH), devido à sua ampla aplicação industrial, o que o torna facilmente disponível. No entanto, outros catalisadores básicos e hidretos químicos também podem ser utilizados para obter efeitos semelhantes (Jacob-Furlan, et. al., 2023).

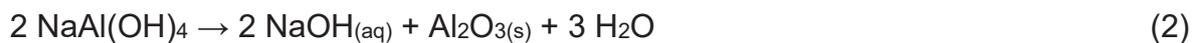
A presença do hidróxido de sódio na solução é crucial, pois ele se dissocia e forma íons OH⁻, impedindo a formação de óxido de alumínio. Isso permite que o metal entre em contato direto com a água e inicie a reação (Hsieh; Her; Chen, 2012).

A reação global que resume os principais processos químicos envolvidos, está escrita a seguir, conforme a Equação 1 a seguir:



Do ponto de vista químico, é essencial manter um controle preciso da reação para garantir um desempenho ideal, onde os reagentes e produtos possam ser

facilmente consumidos e gerados. Além da produção de H₂, a reação também resulta na formação de um composto de alumínio, que pode ser o aluminato de sódio (Jacob-Furlan, et. al., 2023). Este composto pode coexistir na forma de um complexo ionizável, a partir do íon alumina. Outra possibilidade é que o composto converta-se em alumina, uma base de óxido, que pode permanecer suspensa na solução de NaOH (vide Equação 2), ou na própria camada de passivação do metal, de acordo com o pH do meio.



2.6 ECONOMIA CIRCULAR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A crescente degradação ambiental associada ao descarte inadequado de resíduos e à intensa utilização de combustíveis fósseis para suprir a demanda energética global coloca em evidência a necessidade de adoção de modelos econômicos e energéticos mais sustentáveis. Nesse contexto, a economia circular propõe um sistema no qual os recursos sejam mantidos em uso pelo maior tempo possível, minimizando a geração de resíduos e maximizando o reaproveitamento de materiais e energia (GEISSDOERFER et al., 2017). Esse modelo representa uma ruptura com a economia linear tradicional, mitigando a extração excessiva de recursos naturais e os impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Simultaneamente, a transição para uma matriz energética baseada em fontes renováveis é amplamente reconhecida como uma estratégia essencial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e a escassez de recursos fósseis. A migração da matriz energética visa substituir as fontes tradicionais de energia por opções mais limpas e sustentáveis, como energia solar, eólica, biomassa e hidrogênio. Estudos recentes destacam que essa transição não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também promove a diversificação energética e a segurança no abastecimento (IEA, 2021).

A integração entre a economia circular e a transição energética se apresenta como uma abordagem promissora para enfrentar esses desafios de maneira sinérgica. Resíduos, que frequentemente são tratados como passivos ambientais,

podem ser transformados em insumos valiosos para a geração de energia renovável. Por exemplo, a biomassa oriunda de resíduos orgânicos tem sido amplamente utilizada na produção de biogás, enquanto resíduos industriais, como alumínio reciclado, têm demonstrado potencial para a produção de hidrogênio em condições controladas (LOUREIRO et al., 2023). Essas estratégias não apenas fecham ciclos produtivos, mas também contribuem para reduzir a demanda por combustíveis fósseis e ampliar a disponibilidade de energia limpa.

Além disso, a valorização de resíduos dentro de uma perspectiva de economia circular está alinhada aos ODS promovidos pela ONU, particularmente os relacionados à produção e consumo sustentáveis (ODS 12) e à ação contra a mudança global do clima (ODS 13) (United Nations, 2015). O reaproveitamento de materiais e a utilização de resíduos para a geração de energia renovável não apenas reduzem os impactos ambientais, mas também promovem inovação tecnológica e novas oportunidades econômicas.

Portanto, a integração entre economia circular e migração da matriz energética constitui um pilar fundamental para um futuro sustentável. A aplicação de tecnologias inovadoras e o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem o reaproveitamento de resíduos podem acelerar essa transição, resultando em uma economia mais resiliente e de menor impacto ambiental.

A seguir, a Tabela 4 retrata algumas destinações do aluminato de sódio, bem como seus benefícios e malefícios. Atualmente, diversas rotas de aplicação são exploradas, reforçando assim seu potencial de reaproveitamento em diferentes setores industriais e promovendo a economia circular em todo o processo produtivo, desde a formação do aluminato de sódio como subproduto até seu aproveitamento por meio de uma boa escolha para sua destinação.

Tabela 4: Potenciais destinações do aluminato de sódio

REUSO			
Destinação	Benefícios	Malefícios	Referências
Indústria Civil (Aditivo para cimento e concreto)	Possibilidade de reduzir o consumo de cimento, diminuindo a pegada de carbono; pode melhorar algumas propriedades do concreto.	Pode afetar a trabalhabilidade da mistura; necessidade de estudos para avaliar impactos a longo prazo.	PAYÁ BERNABEU, J. et al., 2022; CHEN et al., 2024.
Tratamento de águas (Coagulante)	Ajuda na remoção de impurezas e metais pesados; pode reduzir a turbidez da água.	Pode gerar lodo residual que necessita de descarte adequado; ajuste do pH da água pode ser necessário.	KRUPÍŇSKA, 2020
Síntese de materiais cerâmicos (Catalisador e precursor)	Pode ser usado como precursor na produção de cerâmicas avançadas e catalisadores; aproveitamento de resíduos.	Processamento pode ser complexo e exigir alto consumo energético.	HO et al., 2005
DESCARTE			
Tratamento de efluentes	Permite descarte controlado, reduzindo impacto ambiental.	Pode alterar o pH da água e requerer tratamento adicional antes do lançamento em corpos d'água.	WU et al., 2022

No contexto desta pesquisa, a economia circular proposta buscou viabilizar uma destinação sustentável para o resíduo gerado como subproduto do processo de produção de hidrogênio a partir de alumínio reciclado. O objetivo foi associar uma finalidade funcional ao resíduo, promovendo economia financeira e reduzindo impactos ambientais, ao mesmo tempo em que se explora a sua aplicação potencial na indústria civil, como substituto parcial do cimento em composições cimentícias.

2.7 INDÚSTRIA CIVIL E INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS

2.7.1 CIMENTO PORTLAND E ARGAMASSA

O termo "Cimento Portland" designa o tipo de cimento mais utilizado na construção civil. Sua invenção remonta a 1824, quando o inglês Joseph Aspdin desenvolveu uma mistura de pedra calcária e argila, que, ao ser aquecida a altas temperaturas, transformava-se em um pó fino. Esse material, com características semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland, foi nomeado Cimento Portland (FREITAS, 2018). Trata-se de um pó seco e fino, com propriedades aglomerantes, que, ao ser combinado com água, consegue unir materiais inertes como areia e brita. Essa habilidade de aglutinar resulta do processo de hidratação do clínquer, no qual ocorre uma reação química com a água, gerando compostos estáveis com características de pega e endurecimento. Os principais componentes do clínquer Portland são óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), sendo os silicatos os mais prevalentes e, conseqüentemente, os responsáveis pela resistência mecânica da pasta de cimento endurecida (COSTA, 2017; INOCENTE, 2020).

A resistência do cimento a intempéries e desgastes ambientais ao longo do tempo é um dos fatores que evidenciam sua versatilidade na construção civil, destacando-o em relação a outros materiais. Sua produção global apresenta um aumento anual de 2,5% (MEHTA; ASHISH, 2019). Além disso, ao longo dos anos, surgiram cimentos com adições químicas alternativas, ampliando as opções de aplicação do cimento e gerando sucessos variados no mercado (TROUT, 2019). Um exemplo notável é o cimento de aluminato de cálcio (CAC), desenvolvido na França e lançado em 1918, conhecido por sua excelente resistência ao sulfato. Embora não seja mais utilizado em concreto estrutural, o CAC ainda encontra aplicação em nichos

específicos, como construção subaquática, biogênica, refratária e em ambientes de altas temperaturas.

Já o cimento Portland, têm como uma de suas principais aplicações a produção de argamassas, que são utilizadas em assentamento e revestimento de paredes e tetos. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 13281:2005) define argamassa como uma mistura de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, podendo ou não conter aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser produzida no local ou de forma industrializada. No Brasil, o uso de argamassa remonta aos povos indígenas, que, após o contato com os portugueses, desenvolveram novas técnicas de construção, substituindo o uso de palha e madeira pela mistura de solo com esterco animal, areia, cal e óleo de baleia (LEITE, 2016).

As argamassas têm diversas aplicações, como regularização de pisos, assentamento de alvenaria e revestimentos, além de serem usadas como acabamento em projetos de construção (SANTOS; FIGUEIREDO, 2019). Seu comportamento é analisado em dois estados: fresco, quando se avaliam a trabalhabilidade e as características após secagem, e endurecido, em que se verificam a resistência mecânica, porosidade e absorção de água. A transição entre esses estados é importante, pois afeta o desempenho final da mistura (TEDESCO, 2016).

A produção de cimento, embora essencial para o desenvolvimento da sociedade, é vista atualmente como um fator negativo para a sustentabilidade. Para cada tonelada de cimento produzido, geram-se cerca de 0,95 toneladas de CO₂, o que torna esse material um dos maiores responsáveis pela poluição ambiental (MACCARINI, 2015). No entanto, com o avanço das tecnologias, materiais alternativos estão sendo pesquisados para substituir ou complementar o cimento Portland, contribuindo para a redução dos impactos ambientais causados pela indústria cimentícia (LEITE, 2016). Nesse contexto, a adição de minerais ao cimento Portland tem se mostrado uma estratégia eficaz para mitigar esses impactos, além de oferecer uma destinação adequada para diversos resíduos provenientes de outros setores industriais. Essa prática traz benefícios econômicos, técnicos e ambientais, também colaborando para a durabilidade de concretos e argamassas (GOBBI, 2014). A ABNT define as adições como materiais inorgânicos, naturais ou industriais, de partículas finas, que são incorporados às argamassas em proporção aos seus

componentes, modificando suas propriedades de forma eficiente (ABNT NBR 13529:2013).

2.7.2 Incorporação de resíduos e propriedades do cimento

A incorporação de resíduos na indústria civil, especialmente na produção de concreto e argamassa, é uma prática amplamente estudada e adotada. Essa abordagem visa reduzir os substanciais custos associados à aquisição de matérias-primas convencionais na construção. A utilização de resíduos não apenas oferece uma alternativa economicamente vantajosa, mas também contribui para a gestão responsável de resíduos, promovendo a sustentabilidade na indústria da construção (Costa; Ribeiro, 2021; Han et al., 2014).

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o uso de cimentos com adições teve um começo lento na década de 1950, mas ganhou força a partir dos anos 1990. Atualmente, quase 100% dos cimentos comercializados no país contêm algum tipo de adição em sua composição. A introdução dessas adições ao cimento Portland, seja em substituição ou adição ao clínquer, foi impulsionada por diversos estudos que investigaram o comportamento do material e as vantagens que essa prática pode trazer para concretos e argamassas (COSTA, 2017).

A avaliação cuidadosa dos resíduos é crucial para garantir economia financeira e, ao mesmo tempo, assegurar que os materiais resultantes atendam aos padrões de desempenho e durabilidade exigidos em projetos de construção.

A partir da Tabela 5, pode-se observar alguns dos principais resíduos utilizados como aditivos na indústria civil, juntamente com seus benefícios. Esses materiais, provenientes de diferentes setores industriais, apresentam propriedades pozolânicas, cimentícias ou reológicas que favorecem o desempenho do concreto e da argamassa, contribuindo para a durabilidade, resistência mecânica e sustentabilidade do setor.

Tabela 5: Principais resíduos utilizados na indústria civil em incorporações ao cimento

Resíduo Industrial	Origem	Composição majoritária	Benefícios	Limitações	Referências
Escória de Alto-Forno	Indústria siderúrgica (produção de ferro-gusa)	Silicatos e aluminatos de cálcio	Aumenta resistência, reduz calor de hidratação	Pode reduzir resistência inicial	FARIAS; LIMA, 2023
Cinza Volante	Termelétricas a carvão	Sílica amorfa, aluminatos	Melhora trabalhabilidade e durabilidade	Pode reduzir resistência inicial e tempo de pega	ALTHEMAN et. al, 2017
Cinza de Casca de Arroz	Indústria agrícola (queima de casca de arroz)	Sílica amorfa	Reatividade pozolânica, aumenta resistência	Exige controle de queima para evitar cristalização	MASUERO; CARPENA, 2014
Metacaullim	Calcinação do caulim (indústria cerâmica)	Caulinita calcinada ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)	Alta reatividade pozolânica, aumenta durabilidade	Alto custo de processamento	FIGUEIREDO et al., 2014; ARRUDA JUNIOR; BARATA, 2022
Fíler Calcário	Moagem de calcário	Carbonato de cálcio ($CaCO_3$)	Melhora reologia e reduz consumo de clínquer	Não tem reatividade pozolânica	AQEL; PANESAR, 2020
Resíduos de Vidro Moído	Reciclagem de vidro	Sílica amorfa	Ativação pozolânica, melhora resistência química	Necessita moagem fina e ativação alcalina	SANTOS et al, 2024
Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	Demolição de concreto e tijolos	Argilas, silicatos, cimento hidratado	Pode substituir agregados ou atuar como pozolana	Variabilidade na composição e possível contaminação	DIAS, et. al, 2021

Resíduos de Mineração (ex: lama vermelha)	Indústria do alumínio (processo Bayer)	Óxidos de ferro e alumínio	Pode atuar como aditivo pozolânico	Pode conter impurezas tóxicas e exigir pré-tratamento	ODA, et. al., 2024
Lodo de ETA (Estação de Tratamento de Água)	Estações de Tratamento de Água	Sílica, alumínio e ferro	Potencial pozolânico	Baixa reatividade e variação na composição química	FERREIRA et al., 2022

Ante o exposto na Tabela 5, é importante entender os conceitos indicados nos benefícios e limitações e os impactos que eles geram na indústria civil. Por exemplo, a ativação pozolânica consiste na capacidade de certos materiais, como cinzas volantes e metacaulim, reagirem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos cimentícios adicionais, o que pode aumentar a resistência e a durabilidade do concreto. Esse comportamento é essencial para a melhoria das propriedades do cimento quando aditivos como resíduos industriais são usados como substitutos parciais.

Já um acelerador de pega é um material ou aditivo que aumenta a velocidade com que o cimento começa a endurecer após ser misturado com água, enquanto um retardador de pega faz o processo de hidratação ocorrer mais lentamente, permitindo maior tempo de trabalhabilidade. O controle da cinética de hidratação do cimento, que envolve o estudo das taxas de reação entre o cimento e a água, é fundamental para otimizar o desempenho do concreto, ajustando o tempo de pega e a resistência inicial, o que é particularmente relevante quando se utilizam resíduos com comportamentos distintos de hidratação.

Outrora, a melhoria de reologia refere-se à alteração das propriedades de fluxo e viscosidade do concreto, tornando-o mais fácil de manusear e aplicar, sem comprometer sua resistência ou durabilidade. Já, o consumo de clínquer, que é o principal componente do cimento Portland, pode ser reduzido pela substituição parcial por adições cimentícias, como escória ou cinza volante, contribuindo para a redução de emissões de CO₂ associadas à sua produção.

Outro aspecto importante é a ativação alcalina, que por sua vez, envolve o uso de álcalis (geralmente hidróxido de sódio ou potássio) para ativar certos resíduos, como a cinza de casca de arroz ou a escória, fazendo-os reagir quimicamente com a matriz cimentícia, formando materiais semelhantes a geopolímeros e oferecendo maior durabilidade e resistência ao concreto.

Tais conceitos interagem de maneira complexa na indústria do cimento, impactando diretamente a sustentabilidade e o desempenho dos materiais de construção. É importante avaliar se os resíduos utilizados trarão benefícios econômicos e em termos de resistência e durabilidade das edificações. Dessa forma, a substituição do cimento por resíduos pode sim reduzir custos e contribuir para a destinação adequada de materiais descartados, mas, deve ser cuidadosamente

analisada para garantir que não comprometa a qualidade do concreto e a segurança das construções (Lima et. al, 2022).

Por fim, segundo Barbosa (2017), a incorporação de minerais ao cimento oferece benefícios em três áreas principais: i) tecnológicos, uma vez que contribui para o aumento da resistência mecânica, redução da permeabilidade e maior durabilidade dos elementos estruturais que contêm materiais cimentícios; ii) ambientais, pois o uso desses aditivos ajuda a minimizar os impactos ambientais, reduzindo a extração de matérias-primas não renováveis, permitindo o reaproveitamento de resíduos industriais descartados de maneira inadequada e diminuindo a emissão de CO₂ durante a fabricação do cimento Portland; e iii) econômicos, visto que a adição de minerais aos concretos e argamassas pode reduzir custos, seja pela substituição do cimento por resíduos, seja pela possibilidade de diminuir o tamanho dos elementos estruturais devido ao melhor desempenho mecânico e à maior durabilidade das construções.

2.7.3 Substituição parcial do cimento por resíduos industriais

A substituição parcial do cimento por resíduos industriais tem se mostrado uma estratégia promissora para reduzir o impacto ambiental da construção civil, ao mesmo tempo em que oferece alternativas mais sustentáveis para a produção de concreto. Diversos estudos têm investigado o uso de resíduos como aditivos no cimento, avaliando seu potencial de melhorar ou manter as propriedades do material.

Oliveira, Costa e Motta (2024) realizaram um estudo sobre a utilização de resíduos de *dregs* e *grits*, concluindo que é possível substituir até 36% do cimento para alcançar uma resistência à compressão de 25 MPa e até 15% para atingir 40 MPa. Similarmente, Lopes et al., (2021), utilizaram resíduo de vidro moído (RMV) que também tem sido avaliado como substituto parcial do cimento, com porcentagens variando entre 10% e 20% (m/m). Nesse estudo, a substituição foi considerada viável desde que o RMV seja adequadamente processado, para garantir sua reatividade pozolânica e minimizar os potenciais impactos na resistência mecânica do concreto.

Já o estudo de Meinhart et al., (2023), analisou a substituição de 25% do cimento por fíler basáltico (FB). Embora o FB tenha atendido a alguns requisitos químicos, ele apresentou resultados inferiores aos limites normativos aceitáveis em

termos de atividade pozolânica e resistência à compressão axial aos 180 dias, ou seja, nas idades avançadas do concreto, quando comparado ao cimento puro.

Enquanto o estudo de Meira et al., (2014), investigou resíduos do tijolo cerâmico moído (RTM), cuja substituição parcial do cimento em proporções de 10% e 30% (m/m) mostrou-se possível em estruturas com concretos armados, no entanto, a durabilidade do concreto frente à corrosão por cloretos indicou a necessidade de maior atenção. Um estudo antigo, mas relevante em resíduos cerâmicos, é o de Gonçalves, (2007), que utilizou resíduos provenientes da indústria de cerâmica utilizados na formulação de concretos, sendo que a substituição de até 20% do cimento não demonstrou impactos negativos na resistência à compressão e à tração, além de favorecer a capacidade de deformação do concreto.

2.7.4 Limites definidos para substituição de cimento por resíduos industriais

Ao que tange os limites de substituição, atualmente, não existe um órgão internacional que estabeleça valores universais para a substituição de cimento por resíduos industriais. As diretrizes e regulamentações sobre o uso de materiais suplementares ao cimento variam entre países e dependem das normas técnicas locais. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece parâmetros para a utilização de materiais pozolânicos e outras adições minerais no cimento, por meio da norma ABNT NBR 12653:2015.

Essa norma estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Embora a norma não especifique limites numéricos exatos para a substituição de cimento por materiais pozolânicos, ela define critérios de desempenho que esses materiais devem atender para serem considerados adequados. Esses critérios incluem parâmetros como a atividade pozolânica, composição química e propriedades físicas dos materiais. A conformidade com esses requisitos é essencial para garantir que a incorporação de materiais pozolânicos não comprometa a qualidade e a durabilidade das construções.

Por isso, todos os estudos devem trazer comparativos entre a mistura e o cimento puro. Essa comparação é fundamental para avaliar o impacto real da substituição de parte do cimento por resíduos industriais, garantindo que as propriedades mecânicas, a durabilidade e a segurança das construções não sejam comprometidas. Análises que incluem resistência à compressão, tração, módulo de

elasticidade e durabilidade frente a agentes agressivos permitem identificar possíveis vantagens ou desvantagens da utilização de resíduos, proporcionando embasamento técnico para a sua aplicação prática na construção civil. Além disso, tais estudos ajudam a definir limites seguros para a incorporação de materiais alternativos, assegurando que as estruturas atendam às normas e padrões estabelecidos, promovendo a sustentabilidade sem renunciar à qualidade e segurança das edificações.

2.7.5 Aluminato de sódio no cenário da construção civil

O aluminato de sódio é utilizado na construção civil principalmente como acelerador de pega para concretos, sendo particularmente eficiente em condições de baixas temperaturas (Wang et. al, 2022; Kim, 2022). A sua adição pode variar entre 1% e 4% em massa do cimento, promovendo uma redução significativa no tempo de pega e permitindo uma desforma mais rápida. No entanto, o uso desse aditivo deve ser cuidadosamente controlado, pois o excesso pode comprometer o desempenho do concreto, podendo prejudicar a segurança da estrutura.

Entre os principais benefícios do aluminato de sódio, destaca-se sua capacidade de acelerar o processo de endurecimento, favorecendo a rápida liberação de formas e aumentando a produtividade em obras (Ye et. al., 2021). Além disso, sua aplicação pode ser vantajosa em situações em que se busca minimizar o impacto de baixas temperaturas na hidratação do cimento. No entanto, seu uso inadequado pode levar à formação de macro poros e fissuras, reduzindo a compactação e comprometendo a durabilidade do concreto (Lin et. al., 2022; Kim, 2022).

Outro fator relevante é a compatibilidade do aluminato de sódio com diferentes tipos de cimento. A eficácia desse aditivo pode variar conforme a composição do cimento utilizado, sendo essencial a realização de testes prévios para assegurar que o desenvolvimento da resistência mecânica não seja prejudicado. Dessa forma, o uso do aluminato de sódio deve ser avaliado criteriosamente, buscando-se uma dosagem adequada que maximize seus benefícios sem comprometer a integridade estrutural do concreto.

3 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo geral

Caracterizar e propor uma potencial destinação aos subprodutos da geração de hidrogênio sustentável pela reação de alumínio e solução alcalina.

3.1.2 Objetivos específicos

- Analisar e caracterizar os resíduos da geração de H₂ com diferentes substratos (cavaco industrial e alumínio reciclado)
- Propor uma potencial destinação para o subproduto;
- Identificar possíveis oportunidades de otimização dos processos para máximo aproveitamento dos materiais existentes no subproduto.

4 MATERIAL E MÉTODOS

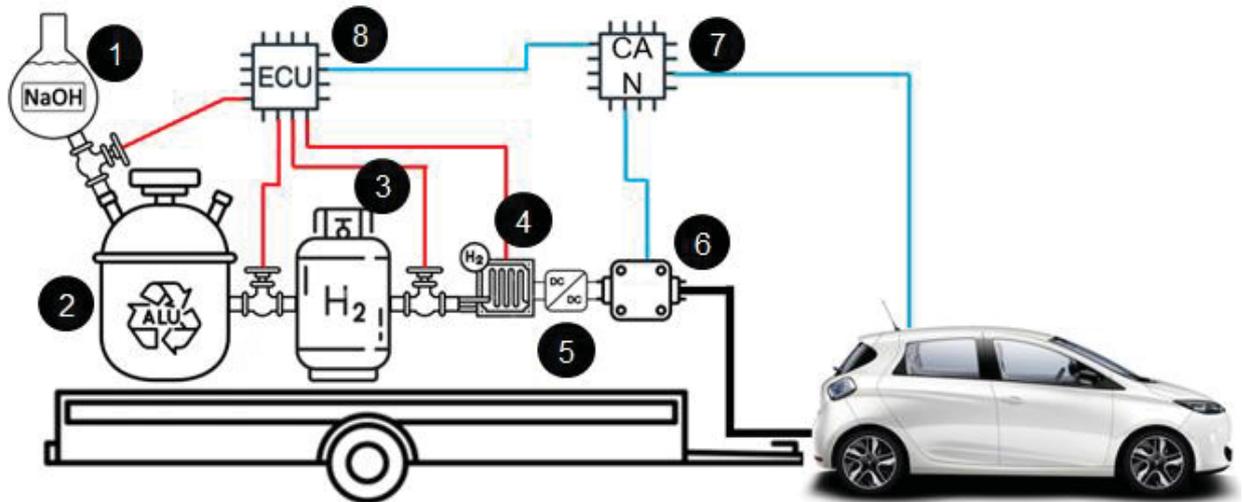
4.1 MATERIAIS:

- Latinhas de alumínio (provenientes de bebidas industrializadas)
- Tiras de cavaco de alumínio industriais
- Solução de NaOH – 2 mol/L
- Água destilada
- Reator
- Estufa

4.2 REAÇÃO QUÍMICA

A reação foi conduzida em um reator fechado, utilizando de forma estequiométrica, 250 g de alumínio, cortado em fragmentos de 2x2 cm, que reagem com 4,5 L de solução de NaOH 2 mol · L⁻¹, por aproximadamente 30 minutos. Durante o processo, sensores de pressão monitoram o sistema, enquanto o hidrogênio gerado é direcionado para um cilindro de armazenamento conectado ao reator. O resíduo sólido gerado pela reação sedimenta no fundo do reator. O processo descrito acima, faz parte dos processos 1, 2 e 3, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Fluxograma de processos do Projeto ROTA 2030



Fonte: A Autora, (2025)

Após a conclusão da reação, a queda da pressão sinaliza o fim da geração de hidrogênio. Nesse momento, o reator é purgado, liberando a solução residual de NaOH, na qual o resíduo permanece como sobrenadante. O hidrogênio, sendo o produto de maior interesse na reação, segue para a etapa 4, onde é utilizado para alimentar uma célula de combustível. Nessa etapa, a energia química é convertida em energia cinética, dando início ao processo seguinte (etapa 5). As etapas 6, 7 e 8 envolvem a adaptação eletromecânica do sistema para aplicação em veículos, visando aumentar sua autonomia em até 250 km.

Diante do exposto, é nítido que o subproduto gerado permanece no interior do reator, sem destaque no processo principal. No entanto, em vez de ser descartado sem um destino adequado, ele pode ser aproveitado de forma estratégica, agregando valor econômico ao sistema, de modo que, haja integração na aplicação a um processo que minimize o gasto termodinamicamente energético e venha ser potencialmente atrativo.

A separação do resíduo sólido suspenso na solução de NaOH foi realizada por dois métodos: i) decantação e ii) filtração a vácuo. Para a caracterização do material, optou-se pela filtração a vácuo devido ao menor volume de resíduo, enquanto para a aplicação na indústria civil, a decantação foi a técnica escolhida, pois permitiu a execução de múltiplas bateladas de forma mais eficaz.

No entanto, existem algumas ressalvas a serem consideradas diante dos dois métodos. A decantação, baseada na sedimentação gravitacional, facilita a separação da fase sólida em grandes volumes, mas pode resultar na ressuspensão do material durante a remoção do líquido, caso o processo não seja realizado com cautela. Por outro lado, a filtração a vácuo oferece uma remoção mais eficiente do líquido e acelera a secagem do resíduo, especialmente em volumes menores. Contudo, sua aplicação em larga escala requer um sistema de filtração de alta capacidade e uma bomba de vácuo adequada, o que pode aumentar o tempo de processamento, acarretando custos adicionais em termos de energia e tempo.

4.3 PREPARO DE AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Para a caracterização, aproximadamente 500 mL de resíduo foram coletados em uma garrafa plástica após o término da reação, sendo as amostras provenientes de duas matérias-primas distintas: latinha de alumínio e cavaco industrial. O material foi homogeneizado e submetido à filtração a vácuo. O resíduo úmido resultante foi então seco em estufa a 60°C por 48 horas, obtendo-se um material sólido composto por partículas finas, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Amostras em pó, após preparo, sendo a) S1 e b) S2



Fonte: A Autora, (2025)

As amostras foram devidamente denominadas como “amostra-1” e “amostra-2”, e codificadas como S-1 (a) e S-2 (b). A categoria de divisão das amostras, segue conforme Tabela 6:

Tabela 6: Grupo amostral e relação com origem do alumínio

Amostra	Origem do alumínio
S-1	Cavaco industrial de alumínio
S-2	Latinhas de bebidas industrializadas

Fonte: A autora, (2025)

As amostras apresentaram características visuais distintas, o que forneceu informações primárias sobre sua composição física. A amostra com tonalidade esbranquiçada, proveniente dos cavacos de alumínio (S-1), sugere um nível de pureza maior, possivelmente devido à ausência de impurezas, o que se reflete em sua cor. Por outro lado, a amostra com tonalidade amarelada, proveniente das latas de bebidas industrializadas (S-2), foi inicialmente associada à presença de tintas em suas superfícies. Nesse contexto, a tinta foi considerada um possível fator responsável pela cor amarelada dessas amostras, sendo uma observação preliminar antes das análises subsequentes.

4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A relação de análises para caracterização a serem realizadas, está descrita a partir do Quadro 1:

Quadro 1: Técnicas de Caracterização do Subproduto

Técnica de Caracterização	Objetivo da análise	Especificações do equipamento utilizado	Local
Difração de Raios X (DRX)	Analisar a estrutura cristalina e validá-la pela correspondência precisa dos picos de difração, garantindo a identificação química do resíduo.	Difratômetro de Raios X, DRX (Bruker, Modelo Advanced D8);	UEM – COMCAP/CAM - Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Obter imagens de alta resolução da superfície do resíduo e analisar detalhes morfológicos e topográficos.	Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU; resolução de 3 nm e ampliação de até 300 kX, operando sob pressão controlada (3–500 Pa). Permite análise tridimensional via	UFPR – CME - Centro de Microscopia Eletrônica
Dispersão de Energia (EDS)	Identificar a composição química a partir da topografia da amostra		

		estereoscopia de elétrons secundários (software Mex, Alicona) e conta com sistema EDS (Oxford) com detector SDD de 80 mm ² e software AZ Tech (Advanced).	
Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)	Determinar a concentração e a composição dos elementos químicos presentes na amostra.	Espectrômetro de Emissão Óptica em Plasma Acoplado Indutivamente, modelo Thermo Scientific iCap 6500	UFPR – CADQui - Central Analítica do Departamento de Química

Fonte: A autora, (2025)

4.4.1 DRX

Inicialmente, a amostra foi submetida a uma homogeneização cuidadosa, assegurando uma distribuição uniforme das partículas e minimizando efeitos de orientação preferencial. Em seguida, o pó foi peneirado para obter uma granulometria adequada, com partículas abaixo de 10 µm, a fim de otimizar a difração e evitar alargamento ou distorção dos picos na análise.

Após a preparação, o material foi disposto em um porta amostras (*stub*) apropriado, utilizando a técnica de compactação manual para garantir uma superfície lisa e homogênea, e reduzindo espaços com ar no porta amostra. O suporte foi então posicionado no difratômetro, e os parâmetros de análise, como intervalo angular (2θ), tempo de aquisição e radiação Cu-K α , foram ajustados conforme regulamento interno do laboratório da UEM.

4.4.2 MEV e EDS

As amostras entregues ao laboratório do CME-UFPR foram separadas em frações menores e fixadas no porta amostra do equipamento (*stubs* de alumínio) com fita de carbono dupla face. Em seguida, as duas amostras (S1 e S2) passaram pelo processo de metalização, em que uma fina camada de ouro foi depositada na superfície das amostras para aumento da condutividade elétrica, essencial para a análise no MEV. Esse processo de metalização garante uma melhor qualidade de

imagem, permitindo a visualização detalhada da morfologia da superfície das amostras e a obtenção de informações precisas durante a análise. Após a metalização, as amostras foram colocadas no MEV, onde foram realizadas as observações das suas características superficiais, incluindo a identificação de possíveis impurezas, mas principalmente sua topografia e morfologia.

A preparação das amostras para EDS seguiu os mesmos princípios do MEV, com pequenas adaptações conforme o objetivo da análise. Enquanto o MEV prioriza a observação da topografia, destacando vales e picos da superfície, no EDS é essencial um polimento adequado para minimizar interferências na quantificação elementar. Em amostras não condutoras, a metalização com ouro ou platina é comum no MEV para evitar carga eletrostática, enquanto no EDS prefere-se a deposição de carbono para não comprometer a detecção de elementos metálicos. Além disso, enquanto o MEV analisa predominantemente a superfície por meio de elétrons secundários e retroespalhados, o EDS detecta raios X emitidos a diferentes profundidades, dependendo da tensão aplicada pelo feixe do microscópio. Dessa forma, as amostras foram inicialmente analisadas por EDS e, posteriormente, por MEV, garantindo que o processo de metalização com ouro não interferisse na detecção elementar do EDS.

4.4.3 ICP-OES

A preparação das amostras para análise por ICP-OES seguiu um protocolo padronizado para garantir a solubilização completa dos elementos de interesse e minimizar interferências analíticas. Inicialmente, os resíduos sólidos foram secos em estufa a 105 °C para remoção de umidade residual. Logo em seguida, foram submetidos a digestão ácida em sistema fechado, utilizando uma mistura de ácidos nítrico (HNO_3) e clorídrico (HCl) na proporção adequada para promover a dissolução eficiente dos constituintes metálicos. O processo foi realizado sob aquecimento controlado, assegurando a completa degradação da matriz e a liberação dos elementos em solução. Após a digestão, as amostras foram filtradas, diluídas em água deionizada e armazenadas em frascos de polipropileno até a análise. Esse procedimento foi adotado para garantir a reprodutibilidade dos resultados e reduzir interferências que poderiam comprometer a exatidão das medições.

4.5 PREPARO DE AMOSTRAS PARA A POTENCIAL DESTINAÇÃO CIVIL

Para a potencial destinação, devido ao grande volume de resíduo, optou-se pelo processo de decantação. Cerca de 20 L de resíduo proveniente das latinhas industrializadas, foram submetidos a 48 horas de sedimentação, permitindo a separação físico-química por remoção da fase líquida. O material de interesse, depositado no fundo do reservatório, apresentou-se em forma pastosa e, por isso, foi distribuído em finas camadas dentro de formas plásticas e seco em estufa a 60°C por 72 horas – tempo de secagem até peso constante, garantindo a ausência de umidade da amostra (Figura 9).

Figura 9: Preparo de amostras na estufa

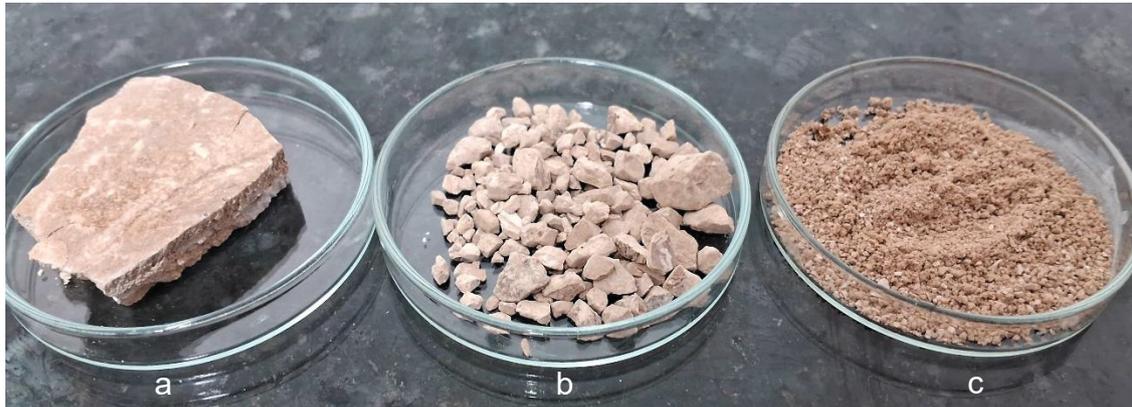


Fonte: A Autora, (2025)

O material resultante formou placas sólidas de grande dimensão (Fig. 10a), que foram posteriormente trituradas com pilão (Fig. 10b) e peneiradas em malha de

75 μm , obtendo-se um pó fino (Fig. 10c) o qual foi então enviado ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) no Lactec para avaliar sua potencial aplicação como aditivo ao cimento.

Figura 10: Etapas de preparo de amostra



Fonte: A Autora, (2025)

Já no LAME, as amostras foram preparadas de acordo com normativas técnicas específicas, da ABNT NBR. Para isso, utilizou-se cimento CP V ARI RS (Itambé – Balsa Nova) e como agregado, utilizou-se a areia “normal brasileira” – composta por 4 tipos de areias fracionadas de acordo com sua granulometria: fração grossa, fração média grossa, fração média fina e fração fina –, conforme estabelecido pela NBR 7214:2015, fornecida pelo IPT. A dosagem seguiu as diretrizes da NBR 7215:2019, empregando água potável e substituindo parcialmente a massa de cimento pela adição em estudo, nos teores de 1% e 3%.

A moldagem dos corpos de prova foi conduzida segundo os procedimentos estabelecidos pelas normas NBR 7215:2019, para determinação da resistência à compressão, e NBR 8522-1:2021, para avaliação dos módulos de elasticidade e deformação. As proporções utilizadas, para definir os traços da composição da amostra foram de 624 g de cimento ($\pm 0,4$ g), 300 g de água ($\pm 0,2$ g) e 468 g de areia ($\pm 0,3$ g).

Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura em tanque contendo solução saturada de hidróxido de cálcio (cal), sob temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, até as idades de ensaio preestabelecidas em 7, 28 e 90 dias.

As condições ambientais do laboratório LAME foram mantidas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, com umidade relativa superior a 50%, a fim de garantir a uniformidade das condições de exposição e minimizar interferências externas nos resultados dos ensaios.

Foram produzidos 6 corpos de prova para cada teste realizado, totalizando um conjunto de 18 amostras. A nomenclatura "CP" foi utilizada para identificar os corpos de prova, seguida pelo número que representa a porcentagem de resíduo substituindo o cimento. O CP padrão refere-se à amostra "branca", composta exclusivamente por cimento puro. No Quadro 2, há a de forma resumida a relação dos traços de cimento para cada conjunto de corpo de prova produzido.

Quadro 2: Traços dos corpos de prova

CP	COMPOSIÇÃO			
	CIMENTO (g)	RESÍDUO (g)	AGREGADOS (AREIAS) (g)	ÁGUA (g)
CP Padrão	624,0 \pm 0,4	–	1872 \pm 0,3	300 \pm 0,2
CP1%	617,8 \pm 0,4	6,2 \pm 0,4	1872 \pm 0,3	300 \pm 0,2
CP3%	605,3 \pm 0,4	18,7 \pm 0,4	1872 \pm 0,3	300 \pm 0,2

Fonte: A Autora, (2025)

4.6 POTENCIAL DESTINAÇÃO JUNTO A CONSTRUÇÃO CIVIL, COMO ADIÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

O potencial de destinação do subproduto gerado será avaliado com ênfase na indústria civil, pois a aplicação do material como aditivo em processos cimentícios oferece uma solução sustentável e econômica, além de agregar valor ao resíduo, contribuindo para a redução de custos na produção de cimento. Conforme o item 2.7 discute, a indústria civil especialmente no contexto de construção civil e infraestrutura, tem grande demanda por materiais que possam substituir parcialmente o cimento, e a viabilidade desse resíduo como substituto representa uma alternativa interessante para o reaproveitamento de resíduos industriais. Outras áreas, como a indústria farmacêutica, não foram consideradas devido às especificidades de pureza exigidas, que são mais rigorosas, além de questões relacionadas a regulamentações e aplicabilidade restrita.

Para isso, com o auxílio do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e do Lactec, serão realizados os seguintes ensaios, conforme detalhado no Quadro 3, observando as normas ABNT NBR específicas:

Quadro 3: Ensaios de potencial destinação do resíduo na indústria civil

Ensaio	Norma	Objetivo do ensaio	Local
Dosagem experimental	ABNT NBR 12821:2009	Confecção de corpos de prova de 5x10cm. Preparo do concreto com substituição de 1% e 3% em sua composição pelo resíduo.	LACTEC – Laboratório de Tecnologia do Paraná/LAME – Laboratório de Materiais
Módulo de Elasticidade Estático – Método Tangente: Concreto	ABNT NBR 8522-1:2021	Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.	
Compressão 3 idades – Cimento Portland	ABNT NBR 7215:2019	Determinação da resistência à compressão para 3 idades (7, 28 e 90 dias).	

Fonte: A autora, (2025)

A ABNT NBR 8522-1:2021 estabelece o método para determinar os módulos de elasticidade e de deformação do concreto endurecido, com ênfase no cálculo do módulo estático à compressão utilizando o método tangente. Este ensaio é fundamental para avaliar a rigidez e a capacidade de deformação do concreto sob carregamento, aspectos essenciais para o dimensionamento e a segurança das estruturas.

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica do concreto que reflete sua capacidade de se deformar elasticamente sob uma carga aplicada. Quanto maior o módulo de elasticidade, menor será a deformação do concreto quando submetido a tensões. O método tangente é uma técnica específica usada para determinar esse módulo, baseada na obtenção da tangente à curva de tensão-deformação no início da fase elástica do concreto.

O ensaio consiste, portanto, em aplicar uma carga gradual sobre um corpo de prova cilíndrico de concreto até que ele atinja um limite de deformação pré-estabelecido. Durante o processo, as tensões e as deformações são registradas, permitindo que, a partir da curva obtida, seja determinada a inclinação da tangente no

início da curva (onde o comportamento do material é predominantemente elástico). Esse valor obtido para o módulo de elasticidade é crucial para o controle da qualidade do concreto, pois influencia diretamente a performance estrutural, a durabilidade e a capacidade do concreto de resistir a cargas sem deformações excessivas.

Já o ensaio de módulo de compressão, como descrito na NBR 7215:2019 é fundamental para a avaliação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos produzidos com cimento Portland, sendo uma das metodologias mais utilizadas no controle de qualidade de materiais na indústria da construção civil. A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes do cimento, pois ela indica a sua capacidade de suportar cargas e esforços sem falhas, refletindo diretamente sua adequação para o uso em obras de infraestrutura.

O ensaio, então consiste em submeter os corpos de prova, após a cura em condições controladas, a uma carga progressiva até sua ruptura, o que permite mensurar a força máxima que o material pode suportar antes de colapsar. Os resultados obtidos são cruciais para garantir que o cimento atenda aos requisitos normativos e para assegurar a confiabilidade e segurança das estruturas construídas com ele.

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Na caracterização, buscou-se alcançar padrões experimentais semelhantes aos teóricos, visando alinhar o conhecimento teórico ao prático. Nas diversas técnicas de caracterização a serem mencionadas a seguir, enfatizou-se a análise em dois grupos amostrais distintos: o primeiro grupo, classificado como subproduto da reação a partir de alumínio proveniente de latas recicláveis; e o segundo grupo, cujo subproduto teve origem em alumínio proveniente de cavacos industriais.

A análise para esses dois grupos é importante, para que comprove que o alumínio reciclável possui o rendimento similar ao uso de alumínio “puro” como no caso do cavaco. Avaliações além da caracterização foram realizadas para isso, como consta no item 5.1.5.

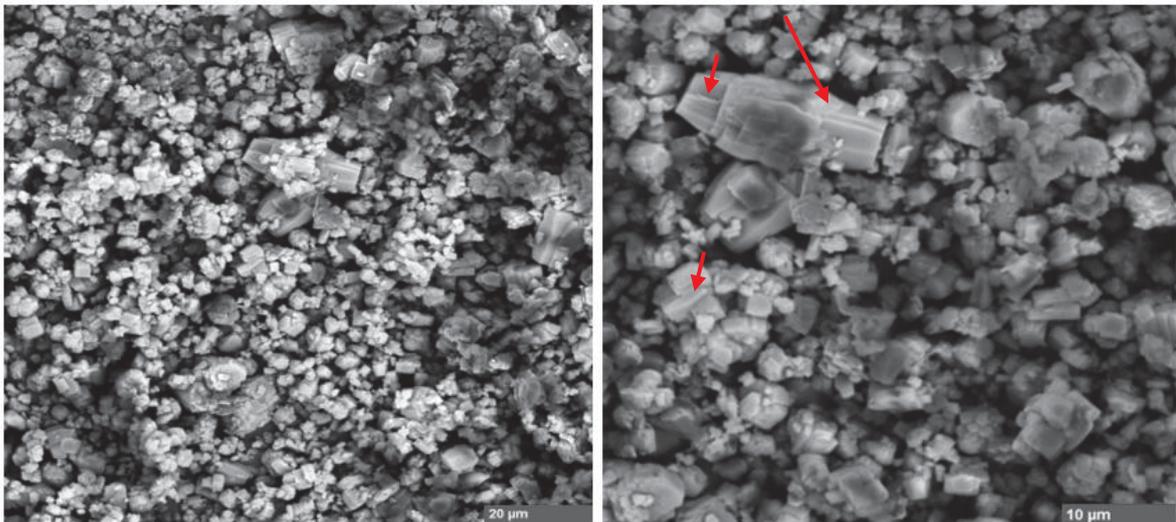
5.1.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).

O principal objetivo do MEV é a obtenção de imagens de alta resolução da superfície da amostra para que possa ser possível analisar os detalhes morfológicos e topográficos. Para isso, utilizou-se da infraestrutura disponível no CME-UFPR e a técnica foi realizada para os dois grupos amostrais, S-1 e S-2.

Para a amostra S-1, conforme ilustrado na Figura 11, a micrografia obtida em 2000x e 4000x de ampliação, respectivamente, evidencia uma morfologia predominantemente cristalina e heterogênea. A presença de grãos bem definidos e cristais prismáticos com faces distintas, conforme ampliação em 4000x, sugere a formação de fases cristalinas específicas, indicando um processo de nucleação e crescimento direcionado. Tais características estão em concordância com a pureza do metal proveniente do cavaco industrial, o que pode influenciar diretamente a composição e estrutura do subproduto gerado.

Além disso, a superfície da amostra apresenta pequenos veios rugosos (vide setas vermelhas na Fig. 11), indicativos da presença de NaOH, como também notado na caracterização de materiais por Patel (2018), o que sugere a permanência de hidróxido mesmo após a separação entre a solução e o precipitado. Essa característica confere ao resíduo um caráter básico, reforçando a influência do meio reacional em sua composição. Esse resultado corrobora a formação do complexo cristalino de aluminato de sódio, conforme previsto pela reação química.

Figura 11: Microscopia Eletrônica de Varredura para o conjunto de amostras oriundos do cavaco.

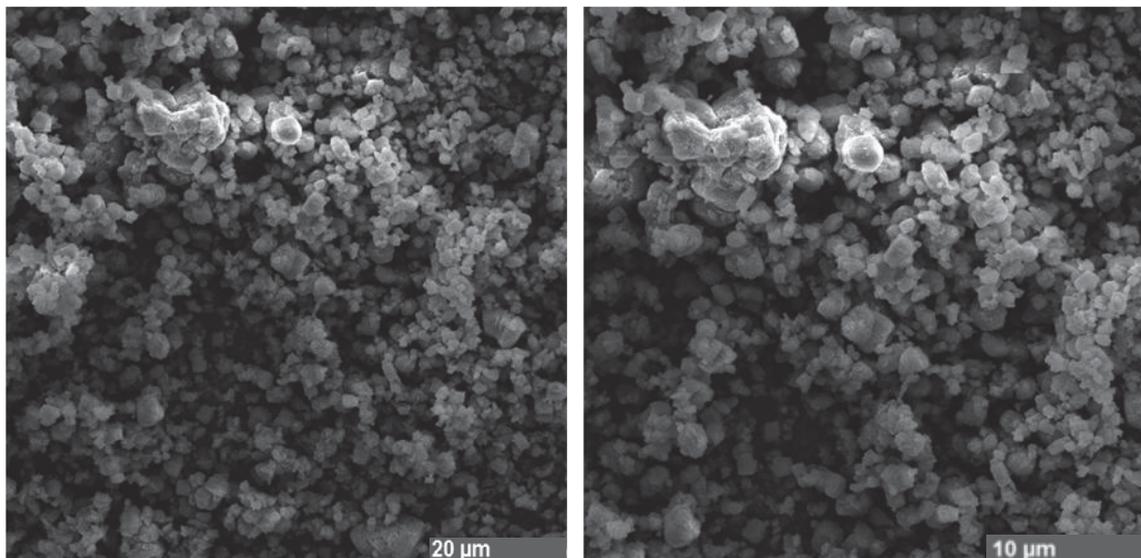


Fonte: A autora, (2023).

Para o conjunto de amostras provenientes das latas recicladas, conforme ilustrado na Figura 12, observa-se uma estrutura predominantemente granular, caracterizada por elevada porosidade. A distribuição das partículas foi heterogênea, apresentando regiões de maior compactação intercaladas com áreas de menor densidade. Além disso, notou-se a presença de aglomerados irregulares, possivelmente atribuídos a impurezas ou à fusão parcial do material durante o processo de reciclagem, o que está em conformidade com a natureza da matéria-prima.

Apesar dessas variações estruturais, a morfologia e a topografia da amostra indicam a presença de cristalinidade. Adicionalmente, embora a rugosidade observada seja inferior àquela da amostra proveniente do cavaco industrial (Figura 11), ela ainda está presente, sugerindo a permanência de hidróxido na superfície. Essa característica contribui para a influência constante da alcalinidade do material analisado.

Figura 12: Microscopia Eletrônica de Varredura para o conjunto de amostras oriundos da latinha.

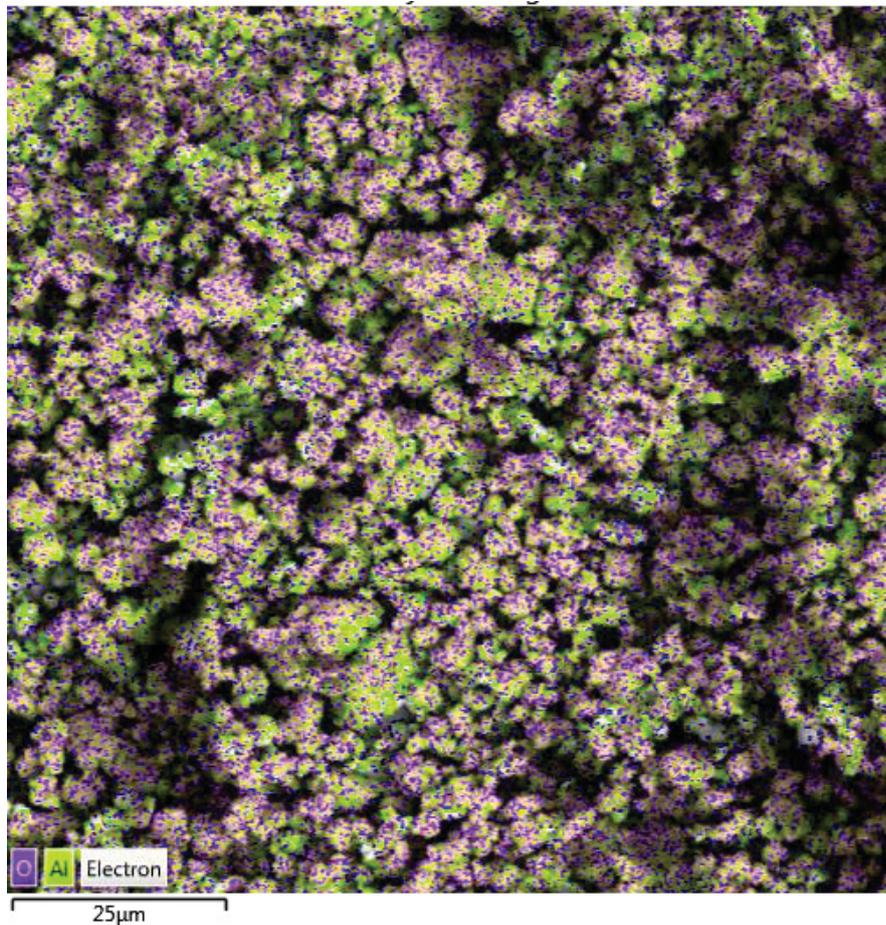


Fonte: A autora, (2023).

Acoplado ao sistema do MEV, o EDS tem por principal objetivo auxiliar na identificação da composição química a partir da topografia da amostra. Embora não seja totalmente qualitativo, ele expressa uma boa margem de avaliação para a caracterização, fornecendo dados que norteiam posteriores análises, como o DRX.

O EDS foi realizado juntamente com o MEV, e o mapeamento foi realizado à medida que as amostras iam sendo analisadas morfologicamente pelo MEV. Para o conjunto de amostras provenientes do cavaco, o resultado semiquantitativo da composição, seguiu conforme a Figura 13, apresentando uma área bem densa de oxigênio e alumínio, com característica cristalina, derivada da análise realizada pelo MEV, conforme descrito anteriormente. Os pontos em verde neon representam o metal alumínio, e os em roxo, representam o oxigênio.

Figura 13: EDS realizado para a amostra derivada do cavaco

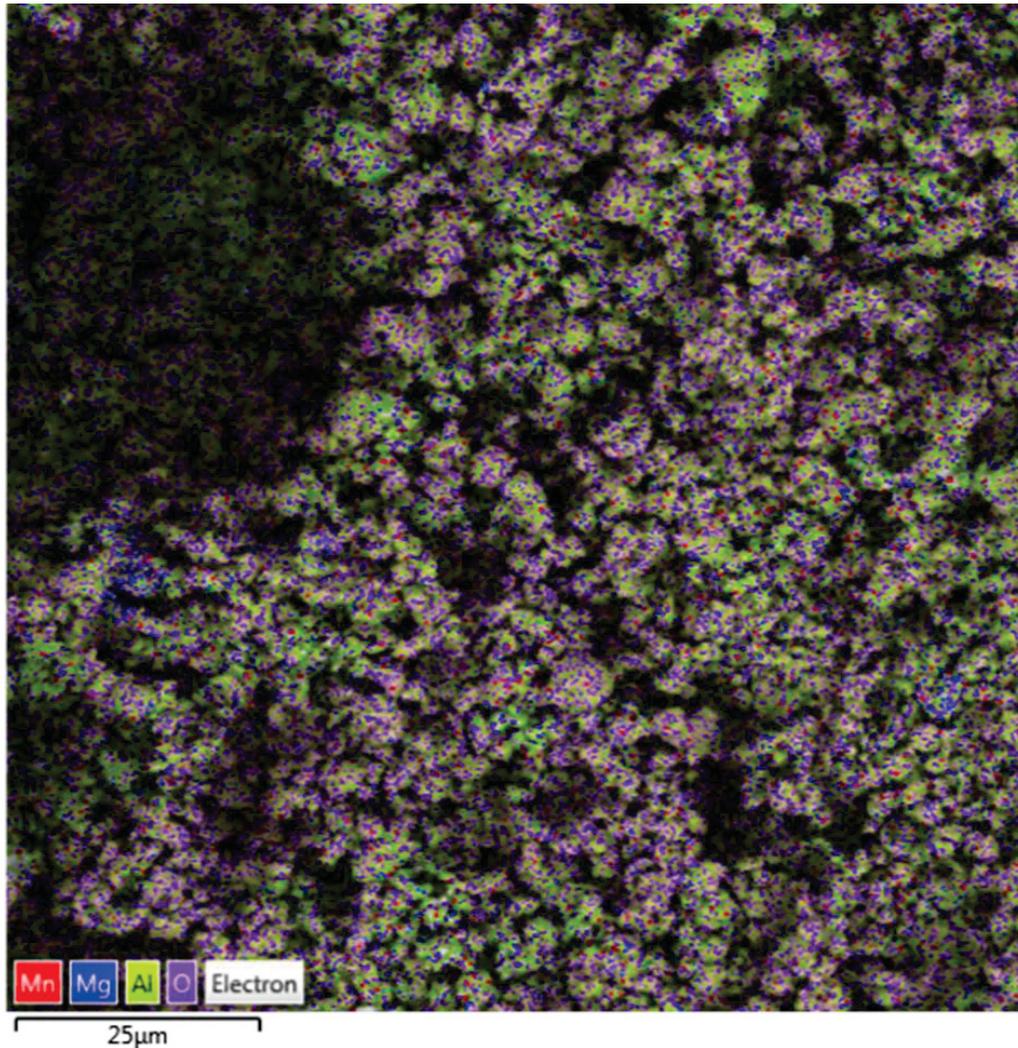


Fonte: A autora, (2023)

Já, para os resíduos das latinhas, notou-se a presença de outros metais, bem como presenciado no ICP-OES – técnica seguinte. Esses metais, são consideradas impurezas decorrentes das tintas externas e do verniz que reveste o exterior da latinha.

Os pontos em verde neon representam o metal alumínio, e os em roxo, representam o oxigênio. Para os pontos vermelhos, há a presença de manganês e para os pontos azuis a presença de magnésio, considerados impurezas na estrutura da liga que compõe a latinha de alumínio. Segue conforme Figura 14 demonstra:

Figura 14: EDS realizado para a amostra derivada da latinha de alumínio



Fonte: A autora, (2023)

Ainda, realizou-se uma análise pontual por EDS em cinco regiões específicas da amostra, com o objetivo de avaliar a composição majoritária das áreas mais cristalinas. Na Tabela 7, observa-se a relação dos elementos químicos presentes, onde as siglas S1 e S2, atribuídas às regiões analisadas, referem-se, respectivamente, ao cavaco industrial e às latinhas recicladas, e o número à frente da sigla simboliza a região analisada.

Tabela 7: Teores de Elementos Químicos nas Amostras Analisadas por EDS

	O (%)	Al (%)	Mg (%)	Na (%)	Mn (%)	Fe (%)	P (%)
1-S2	70,9	27,8	0,5	0,4	0,2	0,2	-
1-S1	75,0	24,5	-	0,4	-	-	0,1
2-S2	75,1	24,2	0,3	0,4	-	-	-
2-S1	74,9	24,8	-	0,3	-	-	-
3-S2	75,8	22,9	0,5	0,5	0,2	-	0,1
3-S1	73,2	26,4	-	0,4	-	-	-
4-S2	73,9	25,1	0,7	0,3	-	-	-
4-S1	74,9	24,7	0,3	-	-	-	0,1
5-S2	72,4	26,6	0,6	0,4	0,1	-	-
5-S1	72,6	27,1	-	0,3	-	-	-

Fonte: A Autora, (2025)

A Tabela 7 revela que, apesar das diferenças na origem da matéria-prima, os teores de alumínio e oxigênio entre as amostras provenientes do cavaco industrial e das latinhas recicladas apresentam valores bastante próximos, garantindo a conservação das propriedades majoritárias do material. O teor de alumínio varia entre 22,9% e 27,8% para as amostras S1 e 24,5% e 27,1% para as amostras S2, demonstrando uma distribuição consistente entre os dois grupos.

O oxigênio, por sua vez, mantém-se em níveis comparáveis, oscilando entre 70,9% e 75,8% nas amostras S1 e 72,6% e 75,0% nas amostras S2. Essa equivalência indica que, mesmo com processos distintos de fabricação, a oxidação superficial do alumínio ocorre de maneira semelhante, contribuindo para a estabilidade da composição química.

Pequenas variações nos elementos secundários, como magnésio (Mg), sódio (Na), manganês (Mn), ferro (Fe) e fósforo (P), podem estar associadas a impurezas inerentes ao processo de reciclagem, mas sem impacto significativo na conservação das propriedades estruturais e funcionais do material. Dessa forma, os dados indicam que a reciclagem das latinhas não compromete a composição majoritária, possibilitando sua aplicação em contextos equivalentes ao do alumínio de maior pureza.

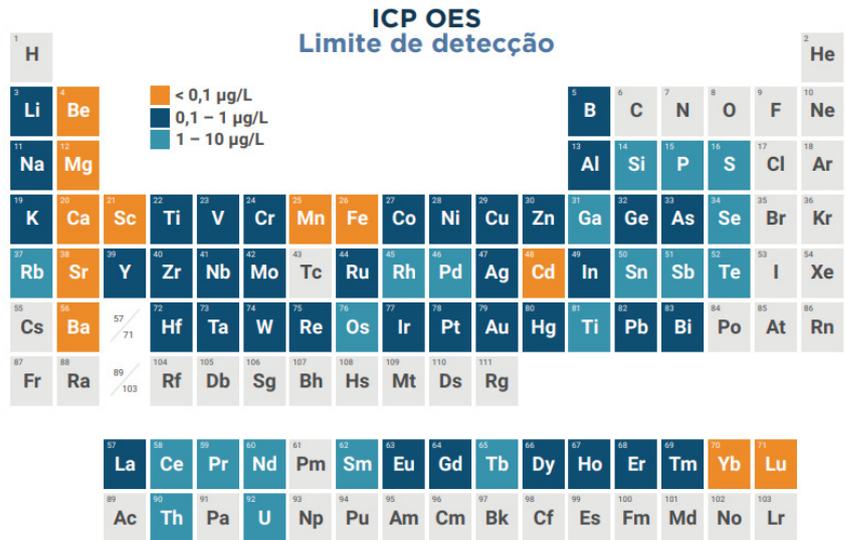
5.1.2 ICP-OES

A técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) foi empregada para a determinação quantitativa de elementos químicos em amostras líquidas, permitindo a análise da composição dos resíduos gerados no processo. As análises foram conduzidas no Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná (DQ – UFPR), utilizando um espectrômetro equipado com detecção multi elementar, garantindo alta sensibilidade e precisão na quantificação dos constituintes presentes, conforme descrito pela metodologia neste trabalho no Quadro 1.

Os elementos analisados incluem majoritariamente Al, Na, Fe, Si, Ca e Mg, devido à sua relevância na caracterização do resíduo e à influência desses componentes nas propriedades físico-químicas do material. O limite de detecção (LOD) e o limite de quantificação (LOQ) variam conforme cada elemento e as condições operacionais do equipamento, sendo influenciados por fatores como intensidade da emissão óptica, matriz da amostra e potencial de interferências espectrais.

De maneira geral, o ICP-OES apresenta LOD na faixa de ppb ($\mu\text{g/L}$) para a maioria dos metais analisados, permitindo a identificação de vestígios elementares. Contudo, elementos com baixa eficiência de excitação no plasma ou que apresentam linhas espectrais sobrepostas podem ter limites de detecção mais elevados. A Tabela Periódica na Figura 15 apresenta os valores específicos de detecção e quantificação para cada elemento analisado, destacando eventuais restrições associadas à técnica.

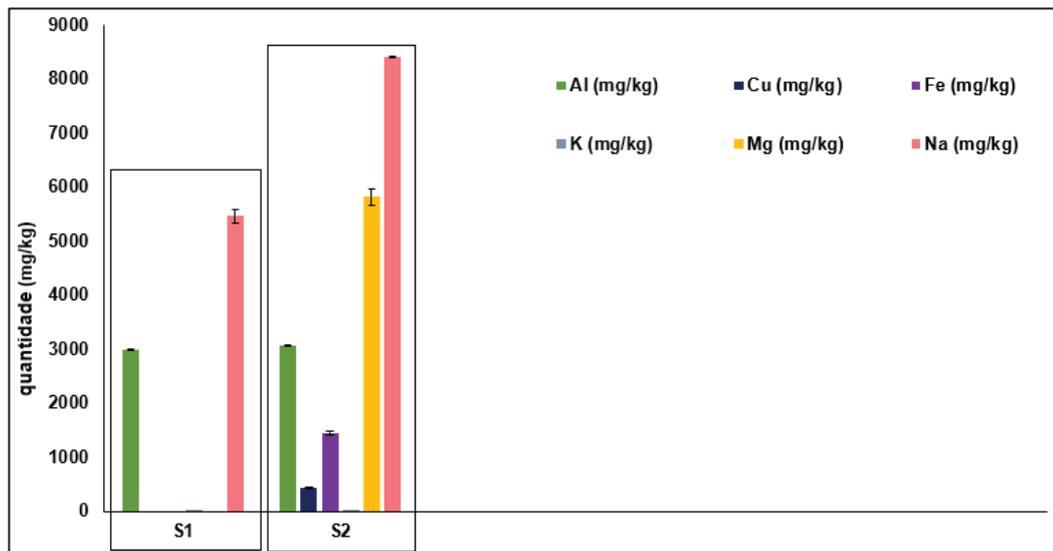
Figura 15: Limite de detecção do ICP-OES



Fonte: DQ-UFPR, (2023)

Desse modo, a avaliação foi conduzida com base nas concentrações de metais específicos, incluindo Na, Cu, Fe, K, Mg e Al, cuja presença nas amostras foi investigada. As concentrações detectadas para todos os metais analisados foram superiores a 1 µg/L, atendendo aos limites de quantificação estabelecidos pelo método e garantindo a confiabilidade dos dados obtidos. Esses resultados estão apresentados na Figura 16, onde são detalhadas as concentrações medidas e suas respectivas variações entre os grupos amostrais.

Figura 16: ICP-OES – concentrações relativas as amostras com ênfase nos metais de interesse



Fonte: A Autora, (2025)

O que se percebe é que a análise física preliminar notada no item 4.1, logo na amostragem foi bastante coerente. A amostra S1, que utilizou cavaco de alumínio na reação apresentou grau de pureza equivalente ao esperado, onde dificilmente apresentaram vestígios de concentração de outros elementos, como Fe, Cu e Mg. Por outro lado, a amostra S2, proveniente da latinha reciclada apresentou um grau de concentração de outros elementos, como o Mg, Fe e Cu. Em ambas as amostras, o nível de K foi muito baixo, quase insignificante no sistema como um todo.

Os metais (Cu, Mg e Fe) avaliados poderiam ser provenientes de contaminantes presentes na liga da lata de bebida industrializada, ou poderiam ser decorrentes da liga metálica que compõe o reator, portanto a análise ICP-OES foi crucial para avaliar em quão severa é a reação básica com o meio em que ocorre, demonstrando também uma eficiência satisfatória em não agredir a parede metálica interna do reator. Os valores de erro (desvio padrão - DP) associados ao sistema de dados da Figura 16 acima também estão descritos, e são baixos, trazendo maior confiança ao método escolhido.

A fim de corroborar com a Figura 16, a Tabela 8 abaixo, traz os valores em mg/kg de cada metal avaliado pelo método do ICP-OES.

Tabela 8: Dados detectados pelo ICP-OES em mg/kg dos metais em análise

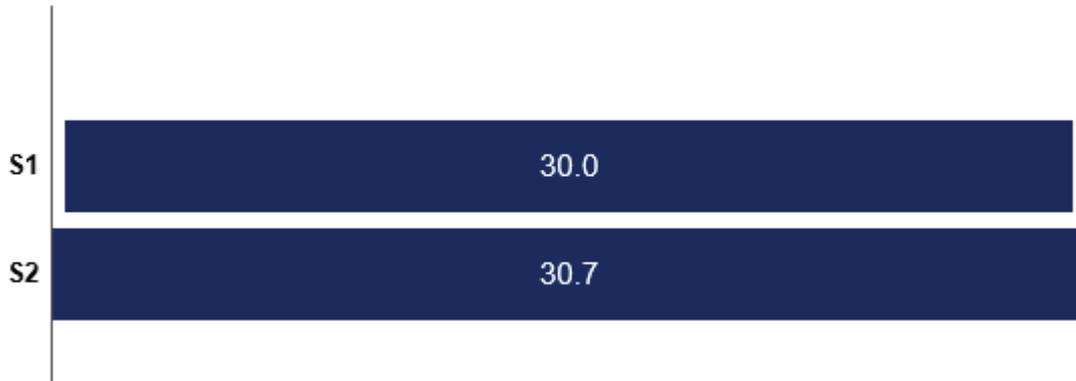
	Al (g/kg)		Cu (mg/kg)		Fe (mg/kg)		K (mg/kg)		Mg (mg/kg)		Na (mg/kg)	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
S1	299,6	0,7	ND	ND	ND	ND	2,8	0,3	ND	ND	5458,3	118,5
S2	307,2	3,6	435,6	13,4	1448,6	33,8	14,2	1,1	5809,6	152,7	8396,1	18,1

\bar{x} = média; s = desvio padrão; ND = Não determinado (concentração menor que o limite de detecção).

Fonte: A autora, (2023)

Ainda, uma avaliação da porcentagem de alumínio presente em cada amostra foi realizada, tendo os resultados reunidos conforme Figura 17 a seguir:

Figura 17: Concentração de alumínio em porcentagem de amostra.



Fonte: A Autora, (2025)

*taxa de desvio padrão foi inferior a 0,4%, portanto não inferiu na veracidade dos dados retratados acima

De certa forma, foi possível deduzir que, ao término da reação, a lata de alumínio ainda se destaca por apresentar uma proporção similar de alumínio em sua composição. Isso, em parte, é positivo, pois os valores aproximam-se consideravelmente dos cavacos de torno (considerados alumínio mais concentrado devido à sua composição). Entretanto, ao final da reação, a o cavaco exibe uma concentração menor em seu resíduo, indicando, de certa maneira, que as impurezas presentes na latinha prejudicam a formação da camada de passivação e a geração de óxidos na superfície do metal, favorecendo a formação de hidrogênio de forma mais pura e favorecendo também a formação do aluminato de sódio na sua forma mais estável e concentrada em função do alumínio.

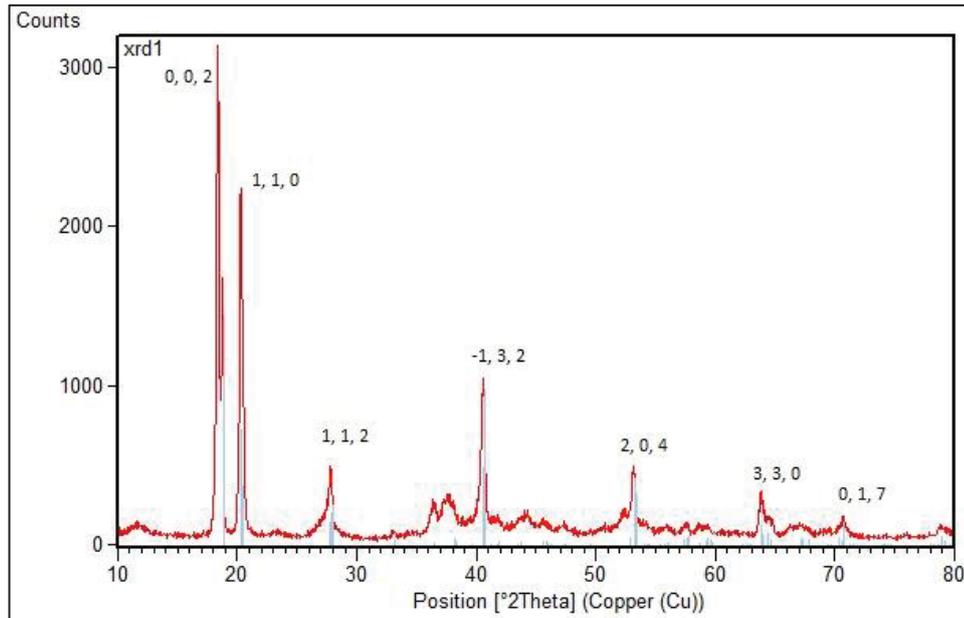
5.1.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).

A análise de DRX conforme apresentada no Quadro 1, tem como principal objetivo a caracterização da cristalinidade das amostras, permitindo a identificação das fases presentes e a avaliação da organização estrutural do material. A partir da posição e intensidade dos picos de difração, é possível reconhecer estruturas cristalinas bem definidas, além de detectar eventuais fases secundárias ou amorfas.

Os difratogramas obtidos nos ensaios realizados na UEM (Figuras 18 e 19) apresentam picos predominantes em torno de $20^\circ 2\theta$, indicando a presença de hidróxidos ou oxi-hidróxidos de alumínio, como gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ou boehmita ($\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$). Essa característica confirma a existência de traços de basicidade na estrutura da amostra, corroborada pelas ranhuras observadas nas Figuras 11 e 12 do

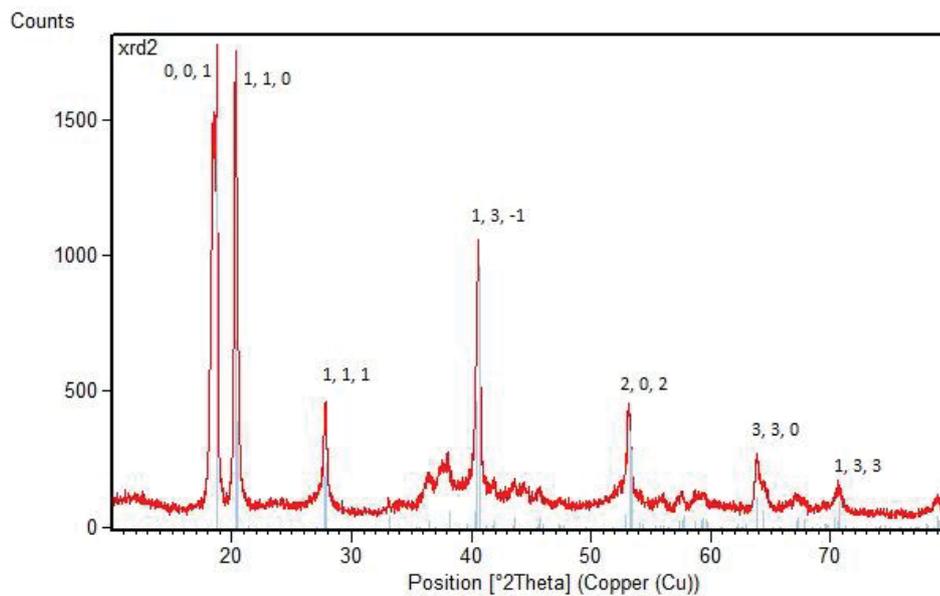
MEV. Além disso, variações na intensidade e no deslocamento dos picos podem estar relacionadas a diferenças na pureza, no tamanho dos cristais ou a possíveis transformações estruturais decorrentes do processo de síntese, aspectos também analisados no MEV com base na conformidade dos grãos.

Figura 18: Difratograma da amostra proveniente da latinha de alumínio



Fonte: A Autora, (2025)

Figura 19: Difratograma da amostra proveniente do cavaco industrial



Fonte: A Autora, (2025)

Os padrões cristalográficos evidenciados demonstram fases bem definidas, com reflexões intensas em baixas regiões de 2θ . A atribuição dos índices de Miller a cada pico confirma a coerência estrutural com materiais cristalinos, fortalecendo a identificação das fases por meio da comparação com padrões do banco de dados do *software X'Pert HighScore Plus*. A nitidez e a intensidade dos picos reforçam a alta cristalinidade da amostra e a ausência de fase amorfa, o que também é verificado visualmente na morfologia dos grãos exibida nas Figuras 11 e 12 do MEV.

As diferenças na posição e intensidade dos picos entre os dois difratogramas analisados sugerem variações estruturais, diferenças na pureza das amostras ou mudanças na organização cristalina, conforme também indicado na Figura 12 do MEV. Além disso, reflexões em ângulos mais elevados podem estar associadas à presença de fases secundárias ou a distorções estruturais originadas por impurezas ou modificações no processo de síntese. Esses resultados fornecem informações importantes sobre a fabricação da matéria-prima, possibilitando inferências sobre sua origem e estrutura cristalina.

Dessa forma, concluiu-se que a amostra obtida a partir da latinha de alumínio reciclada apresenta – com base na caracterização realizada – evidências dos processos de reciclagem aos quais foi submetida, os quais influenciam diretamente sua estrutura cristalina e grau de organização. No entanto, é relevante destacar que, apesar dessas transformações, a amostra ainda mantém características de basicidade, atribuídas à presença de NaOH na reação primária, cujos traços permanecem detectáveis mesmo após modificações estruturais.

5.2 POTENCIAL DESTINAÇÃO

Os resultados serão subdivididos conforme os ensaios realizados.

5.2.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TANGENCIAL

Primeiramente, os resultados foram refinados e então reunidos em duas tabelas, para uma melhor compreensão e comparação das análises.

O módulo de elasticidade (E), teve suas informações reunidas conforme Tabela 9:

Tabela 9: Módulo de Elasticidade Estática (E) – GPa

	7 dias			28 dias			90 dias		
	E_{c_7}	s	CV	$E_{c_{28}}$	s	CV	$E_{c_{90}}$	s	CV
	GPa	%		GPa	%		GPa	%	
CP	34,50	0,70	2,03	37,93	0,31	0,81	37,17	1,52	4,08
CP1%	33,87	1,10	3,24	34,93	3,55	10,17	38,50	1,77	4,60
CP3%	33,77	1,37	4,04	35,40	0,52	1,47	38,33	0,59	1,53

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variância.

Fonte: A Autora, (2025)

Aos 7 dias, observou-se que o módulo de elasticidade das amostras com adição foi inferior ao módulo sem a adição. O concreto com 1% de resíduo também apresentou a mesma tendência em relação ao concreto padrão, e com 3% de resíduo houve uma redução mais acentuada. Tais valores indicam que a incorporação de resíduos reduz a rigidez inicial do concreto, tornando-o menos resistente à compressão nesse estágio inicial de cura.

Aos 28 dias, o comportamento se torna mais irregular, não seguindo um padrão de crescimento ou decréscimo em relação ao comparativo. O concreto com 1% de resíduo ainda permaneceu com resultados inferiores em relação ao concreto padrão, enquanto o concreto com 3% de resíduo demonstrou uma recuperação parcial do módulo de elasticidade quando comparado ao seu comportamento aos 7 dias. Embora o valor ainda esteja abaixo do concreto sem adição de resíduos, a diferença é menos significativa do que comparando no cenário com a idade de 7 dias, sugerindo que o concreto com resíduos começa a conservar sua capacidade elástica com o tempo, sendo um parâmetro de comparação cabível ao material sem adição dos traços de resíduo.

Aos 91 dias, o módulo de elasticidade apresenta resultados superiores com a adição de resíduos. O concreto com 1% de resíduo alcança um valor superior ao concreto padrão, enquanto o concreto com 3% mantém-se próximo ao valor do concreto com 1%. Esse comportamento sugere que, em idades mais avançadas, a adição de resíduos pode compensar a perda de rigidez inicial e até melhorar a estabilidade estrutural do concreto.

Ao analisar o coeficiente de variação (CV%), que indica a dispersão dos resultados em relação à média, verifica-se que o concreto com resíduos apresenta maior variabilidade em idades iniciais. Aos 7 dias, o CV% do concreto padrão é o mais

baixo, enquanto os concretos com 1% e 3% de resíduos apresentam aumento da variabilidade. Esse aumento sugere que a adição de resíduos torna o comportamento do concreto menos uniforme no início. No entanto, aos 28 dias, a dispersão dos resultados diminui significativamente nos concretos com resíduos, indicando maior homogeneidade em idades intermediárias. Aos 91 dias, a variabilidade no concreto com 3% de resíduo é a mais baixa, indicando maior estabilidade a longo prazo em comparação com as outras composições.

Em relação ao comportamento ao longo do tempo, verifica-se que, nas idades iniciais (7 dias), a adição de resíduos tem um impacto negativo no módulo de elasticidade, reduzindo a rigidez e aumentando a variabilidade dos resultados. Em 28 dias, o concreto com 3% de resíduo se aproxima do desempenho do concreto padrão, sugerindo uma recuperação gradual da rigidez. Ainda, em 91 dias, a adição de resíduos não apenas mantém o módulo de elasticidade em níveis semelhantes ao concreto padrão, mas também apresenta maior homogeneidade, especialmente com 3% de resíduo.

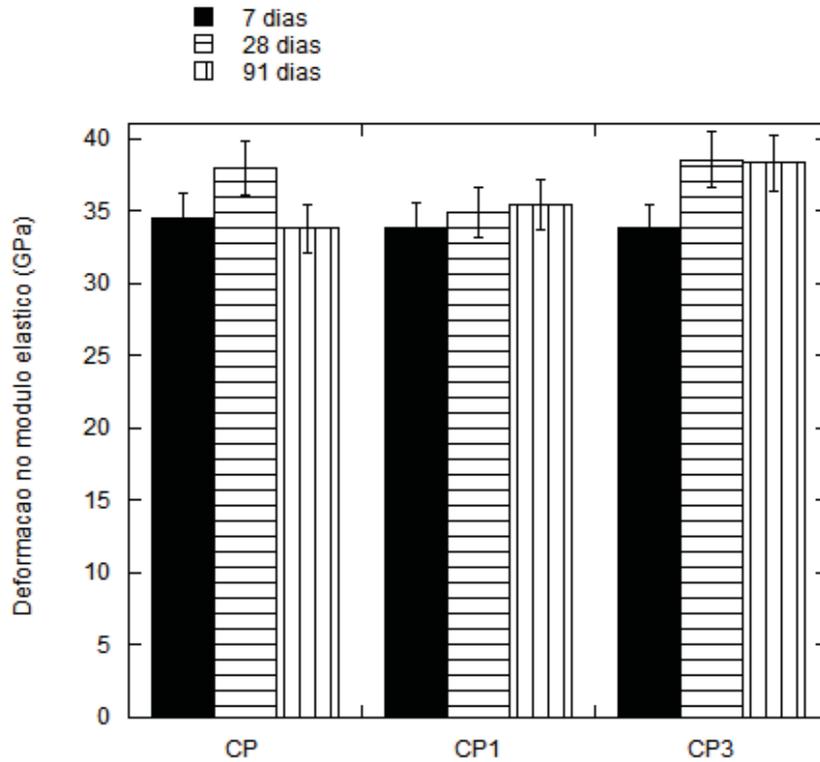
A análise dos resultados permite algumas considerações técnicas relevantes. Inicialmente, a adição de resíduos compromete o módulo de elasticidade, mas, com o tempo, o concreto com resíduos recupera ou até supera os valores do concreto padrão. A quantidade de 1% de resíduo pode ser mais adequada para estruturas que exigem maior flexibilidade inicial, mas apresenta maior variabilidade em idades mais avançadas. Por outro lado, o concreto com 3% de resíduo demonstra um desempenho mais estável e homogêneo ao longo do tempo, sugerindo que essa proporção pode ser mais vantajosa em estruturas que exigem durabilidade e estabilidade a longo prazo.

Em termos de aplicações práticas, para projetos que demandam resistência inicial elevada, deve-se evitar o uso de resíduos em grande quantidade devido à perda de rigidez inicial. Entretanto, para estruturas mais sustentáveis, a adição de até 3% de resíduo pode ser benéfica, pois proporciona de um ponto de vista técnico, maior estabilidade e menor variabilidade no comportamento do concreto ao longo do tempo e do ponto de vista sustentável menor custo e menor emissão de pegada de carbono.

A Figura 20 apresenta a variação do módulo de elasticidade ao longo do tempo, evidenciando a redução inicial com a adição de resíduos e a recuperação gradual observada nas idades mais avançadas. Nota-se que, aos 7 dias, o concreto com resíduos tem menor rigidez, enquanto aos 28 dias ocorre uma recuperação

parcial, especialmente para 3% de resíduo. Aos 91 dias, os valores se estabilizam, com desempenho próximo ou superior ao concreto padrão. Os intervalos de erro indicam maior variabilidade inicial, que diminui ao longo do tempo, confirmando a tendência de homogeneização dos concretos com resíduos.

Figura 20: Variação do módulo de elasticidade ao longo do tempo



Fonte: A Autora, (2025)

A resistência à compressão (f_c) no módulo de elasticidade também foi avaliada, e os valores estão dispostos conforme Tabela 10:

Tabela 10: Resistência à Compressão no Módulo de Elasticidade (MPa)

	7 dias			28 dias			90 dias		
	f_{c7}	s	CV	f_{c28}	s	CV	f_{c90}	s	CV
	MPa	%		MPa	%		MPa	%	
CP	38,10	0,66	1,72	43,33	2,72	6,28	47,83	3,43	7,17
CP1%	35,77	1,05	2,94	37,63	4,51	11,98	48,20	1,15	2,39
CP3%	34,13	0,15	0,45	38,67	0,12	0,30	43,53	4,04	9,28

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variância.

Fonte: A Autora, (2025)

Aos 7 dias, observou-se que a resistência média do CP padrão foi 38,10 MPa, enquanto o CP1% e o CP3% apresentaram valores inferiores, de 35,77 MPa e 34,13 MPa, respectivamente. Essa redução pode estar associada a uma interferência na hidratação inicial do cimento causada pela presença do resíduo, retardando o desenvolvimento da resistência.

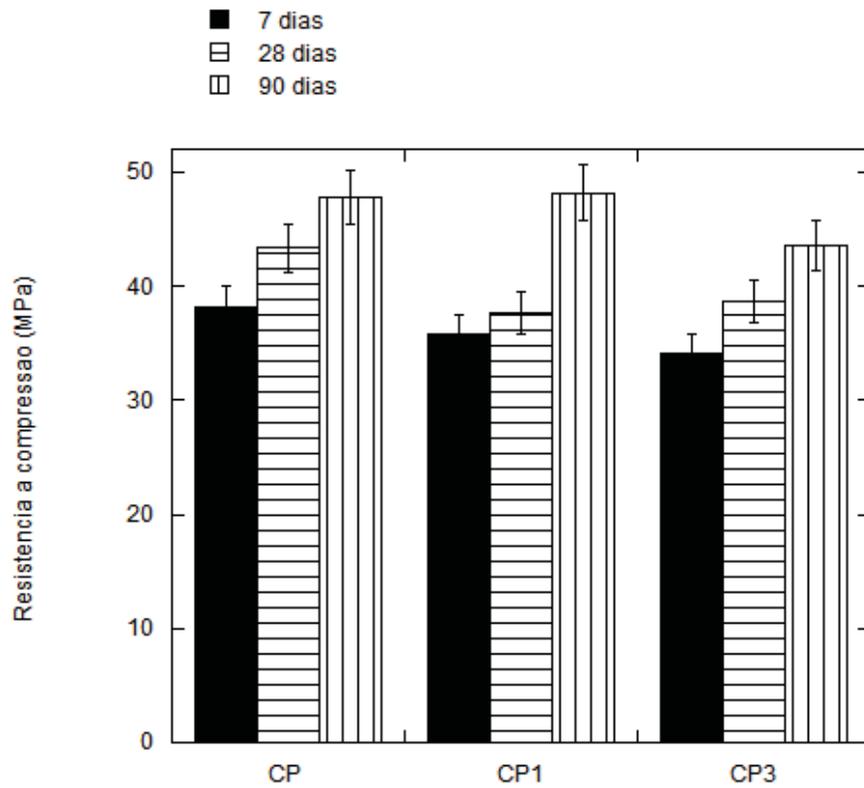
Aos 28 dias, o CP padrão atingiu 43,33 MPa, enquanto o CP1% obteve uma resistência média inferior (37,63 MPa, redução de 13,2%), e o CP3% apresentou 38,67 MPa, um valor mais próximo do CP padrão. Esse comportamento indica que, embora a adição do resíduo possa comprometer a resistência inicial, os valores tendem a se estabilizar com o tempo. No entanto, o CP1% apresentou o maior coeficiente de variação (11,98%), sugerindo uma dispersão significativa nos resultados, possivelmente devido a uma distribuição não homogênea do resíduo na matriz cimentícia.

Aos 90 dias, a resistência do CP padrão foi de 47,83 MPa, enquanto o CP1% apresentou um valor semelhante (48,20 MPa), demonstrando que a adição do resíduo em pequenas quantidades pode não comprometer o desempenho mecânico a longo prazo. Já o CP3% teve um desempenho inferior, com 43,53 MPa, além de um coeficiente de variação elevado (9,28%), indicando maior variabilidade nos resultados e, possivelmente, desafios na homogeneização da mistura.

Com base nos resultados, a substituição parcial do cimento por resíduos industriais pode ser viável, especialmente em teores de até 1%, sem comprometer significativamente a resistência à compressão. No entanto, a adição de 3% de resíduo apresentou maior variabilidade nos resultados e uma leve redução na resistência final, sugerindo a necessidade de um controle mais rigoroso na formulação e no processo de mistura.

A seguir, a Figura 21, traz um comparativo visual de como esse comportamento se deu ao passar as idades dos CPs com relação a resistência à compressão nesse ensaio, demonstrando de forma nítida e visual que com o passar do tempo, o CP1 é o que obteve um desempenho equivalente ao CP padrão, enquanto que o CP3 sofreu um declínio, impactando na resistência do material.

Figura 21: Resistência à compressão em relação ao tempo



Fonte: A Autora, (2025)

5.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM 3 IDADES – CIMENTO PORTLAND

Similarmente ao ensaio anterior, os resultados foram refinados e então reunidos também em duas tabelas, para uma melhor compreensão e comparação das análises. Avaliou-se a resistência a compressão (f_c) e a força suportada até a ruptura do corpo de prova nas 3 idades.

Para a resistência a compressão, f_c , temos a seguinte Tabela 11:

Tabela 11: Resistência à Compressão – Cimento Portland (MPa)

	7 dias			28 dias			90 dias		
	f_{c_7}	s	CV	$f_{c_{28}}$	s	CV	$f_{c_{90}}$	s	CV
	MPa	%		MPa	%		MPa	%	
CP	37,63	0,70	1,87	42,67	1,78	4,17	50,40	1,83	3,64
CP1%	32,53	4,27	13,13	38,60	1,97	5,10	44,43	1,46	3,28
CP3%	31,03	0,32	1,04	36,77	4,05	11,01	45,10	0,85	1,89

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variância.

Fonte: A Autora, (2025)

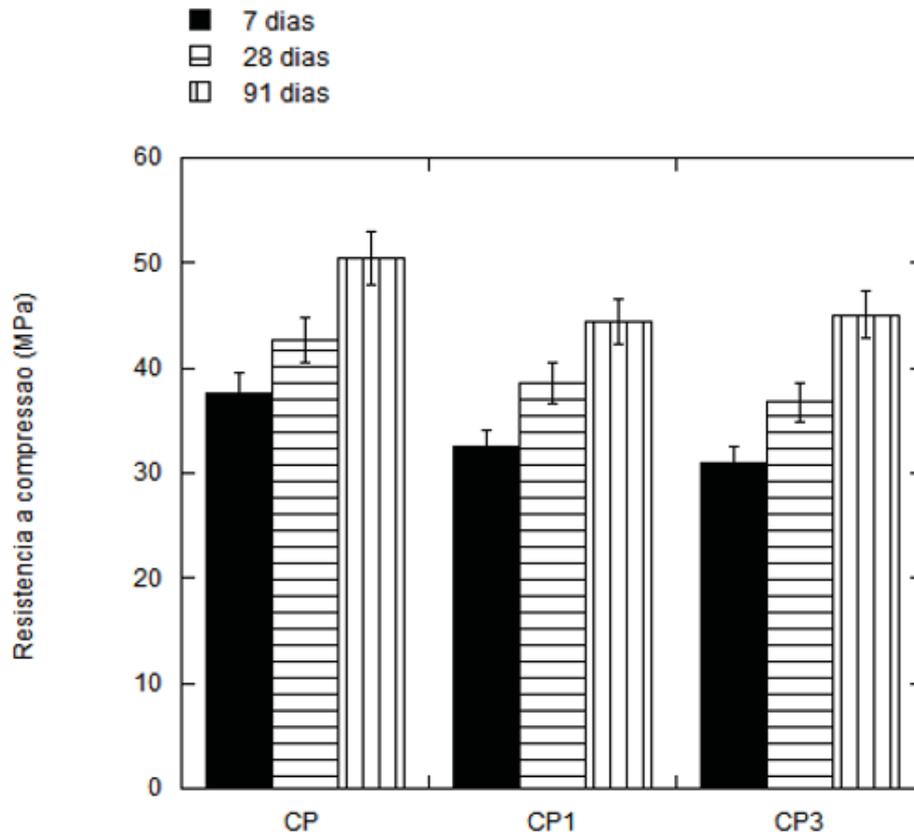
Os resultados da resistência à compressão indicam que o cimento puro (CP) apresenta os maiores valores médios em todas as idades analisadas (7, 28 e 90 dias). O CP1%, com 1% de adição de resíduo, apresenta uma leve redução nos valores médios de resistência, principalmente nos primeiros dias de cura, mas se aproxima do CP ao longo do tempo. Já o CP3%, com 3% de adição de resíduo, demonstrou uma resistência inicial inferior às demais amostras e um crescimento menos expressivo ao longo dos 90 dias.

A análise do coeficiente de variação (CV) demonstra que a dispersão dos dados para CP1% é a maior entre as três formulações, especialmente nos primeiros dias (13,13% para 7 dias). Esse comportamento pode indicar uma maior heterogeneidade do material devido à incorporação do resíduo, afetando a uniformidade da resistência. O CP3% apresentou um comportamento mais homogêneo nos primeiros e últimos períodos, mas aos 28 dias teve uma variação mais expressiva (CV = 11,01%), sugerindo instabilidades na cura ou no ganho de resistência intermediário.

Em termos de evolução da resistência ao longo do tempo, nota-se que o CP tem um crescimento contínuo e previsível, enquanto os corpos de prova com adição de resíduo apresentam um comportamento menos linear. Isso pode estar relacionado à influência do resíduo na formação da matriz cimentícia e à possível interferência no processo de hidratação do cimento. Ainda assim, a resistência final do CP1% mostra que a incorporação de resíduo pode ser viável a longo prazo, por não prejudicar tanto a resistência do material quando comparada ao CP, de forma que pode impactar numa economia substancial na indústria cimentícia e promover também uma destinação sustentável para o resíduo em estudo.

A Figura 22 apresenta a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo, evidenciando a superioridade do concreto padrão (CP) em todas as idades e a influência da adição de resíduos. Observa-se que o CP1% apresenta leve redução inicial, mas se aproxima do CP com o tempo, enquanto o CP3% tem a menor resistência inicial e um crescimento menos expressivo. A variabilidade dos resultados é maior no CP1% nos primeiros dias e mais acentuada no CP3% aos 28 dias, sugerindo diferenças na homogeneidade e no processo de cura. Esses resultados indicam que a incorporação de resíduos afeta o desenvolvimento da resistência, mas pode ser viável a longo prazo, especialmente para CP1%.

Figura 22: Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo – Cimento Portland



Fonte: A Autora, (2025)

Uma outra análise acerca da força aplicada até a ruptura dos CPs também foi realizada, de forma que os valores de força em N, foram reunidos conforme a Tabela 12:

Tabela 12: Força aplicada até ruptura (N) – Cimento Portland

	7 dias			28 dias			90 dias		
	F_7	σ	CV	F_{28}	σ	CV	F_{90}	σ	CV
	N	%		N	%		N	%	
CP	75.025,67	1.293,83	1,72	84.543,33	3.133,40	3,71	100.486,33	3.596,38	3,58
CP1%	64.493,33	8.292,26	12,86	76.206,67	4.101,17	5,38	88.897,00	3.392,11	3,82
CP3%	61.075,00	564,90	0,92	72.875,33	8.217,68	11,28	89.336,67	1.207,16	1,35

Fonte: A Autora, (2025)

Como já esperado, os valores das forças aplicadas até a ruptura dos corpos de prova apresentam um comportamento semelhante ao observado na resistência à

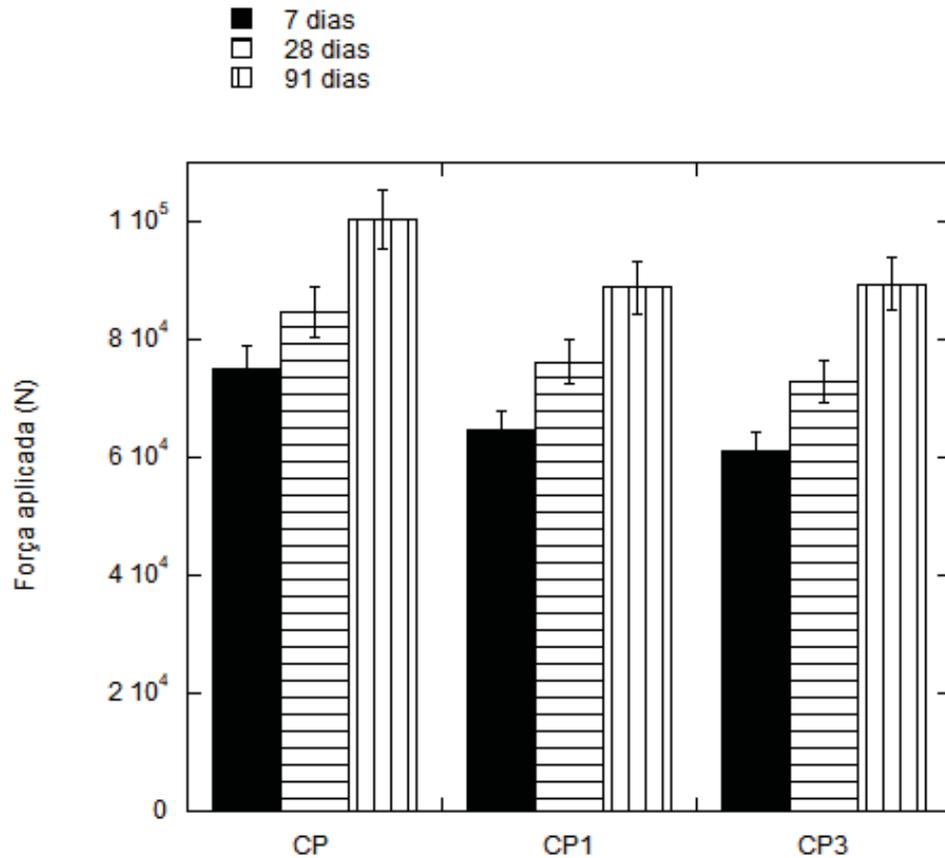
compressão. O CP demonstrou os maiores valores médios de força em todas as idades, reforçando sua superioridade estrutural em relação às amostras com adição de resíduo. O CP1% mostrou uma redução na resistência inicial e um crescimento moderado ao longo do tempo, enquanto o CP3% apresentou os menores valores médios, indicando que a adição de resíduo impactou a capacidade do material de suportar cargas antes da ruptura.

A análise do coeficiente de variação mostra que o CP1% teve a maior dispersão nos primeiros 7 dias ($CV = 12,86\%$), confirmando uma maior variabilidade na formação inicial da estrutura. O CP3% apresentou um comportamento mais estável nos primeiros e últimos períodos, mas teve uma variação significativa aos 28 dias ($CV = 11,28\%$), semelhante ao observado na resistência à compressão. Isso pode indicar uma diferença na taxa de hidratação do cimento quando misturado com o resíduo, afetando a forma como o material distribui tensões internas antes da ruptura.

Além disso, os valores de força aplicada na ruptura confirmam a tendência já observada na resistência à compressão, sugerindo que, apesar de a adição de resíduo reduzir a resistência do material, essa perda pode ser controlada dependendo da quantidade de resíduo utilizada. O CP1% apresentou um desempenho intermediário, podendo ser uma alternativa interessante caso a leve perda de resistência seja compensada por benefícios ambientais ou econômicos, conforme supracitado anteriormente. Infelizmente, o CP3% apresentou maior perda estrutural, o que pode limitar seu uso em aplicações que demandam alta resistência mecânica, demonstrando assim, que aumentar os traços de resíduos na incorporação da mistura cimentícia nem sempre pode promover um aumento das propriedades mecânicas do material, mas pode levar a degradar as propriedades já pré-existentes.

A Figura 23 ilustra a força aplicada até a ruptura dos corpos de prova, refletindo o comportamento observado na resistência à compressão. O CP apresentou os maiores valores médios em todas as idades, enquanto o CP1% mostrou uma redução inicial seguida de crescimento moderado. O CP3% exibiu os menores valores, indicando um impacto negativo da adição de resíduo na capacidade de suportar cargas. A variabilidade foi maior no CP1% aos 7 dias e no CP3% aos 28 dias, sugerindo diferenças na hidratação do cimento e na distribuição de tensões. Esses resultados reforçam que a adição de resíduos deve ser controlada para equilibrar perdas estruturais e possíveis benefícios ambientais ou econômicos.

Figura 23: Força aplicada até a ruptura dos corpos de prova



Fonte: A Autora, (2025)

5.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A Tabela 13 apresenta a contribuição científica obtida ao longo da trajetória deste mestrado, dentro da temática abordada pelo tema da dissertação, abrangendo publicações em livros e periódicos internacionais, além da participação em congressos internacionais relevantes na área. Os trabalhos em ***itálico-negrito***, representam autoria principal, enquanto os demais, co-autoria.

É válido destacar também que houve a participação de co-autoria em outros trabalhos com assuntos voltados à biotecnologia, microalgas e energias renováveis (trabalhos estes que não estão citados abaixo).

Tabela 13: Produção científica

Categoria	Título	Evento/Revista	Ano	DOI
Capítulo de livro internacional	Production of H ₂ for use in low temperature fuel cells	Nanotechnology for Hydrogen Production and Storage, Elsevier	2024	10.1016/B978-0-443-21456-1.00023-0
	Hydrogen Storage in Nanomaterials			10.1016/B978-0-443-21456-1.00014-X
Congressos internacionais	Study Of The Disposal Of The Waste From The Hydrogen Generation Reaction From Aluminum Oxidation In An Alkaline Solution	19th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Bento Gonçalves	2022	10.26678/ABCM .ENCIT2022.CIT 22-0293
	Mathematical modeling of a hydrogen production reactor from aluminum waste			10.26678/ABCM .ENCIT2022.CIT 22-0302
	Mathematical Modeling And Simulation Of CO ₂ Removal From An Alkaline Solution For Fuel Cells Applications			10.26678/ABCM .ENCIT2022.CIT 22-0359
	Characterization of Waste from Sustainable Hydrogen Generation via Metal-based Pathways	XXI B-MRS Meeting (SBPMAT), Maceió	2023	-
	Characterization of Residues Arising from Sustainable Hydrogen Generation via Metal-Mediated Reactions	27th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Florianópolis	2023	10.26678/ABCM .COBEM2023.C OB2023-1745
	Comparative Analysis of Proton Exchange Membranes and Anion Exchange Membranes for Low-Temperature Fuel Cells			10.26678/ABCM .COBEM2023.C OB2023-1828
	Generation Of Hydrogen By Metallic Way And Its Applications For The Use Of Renewable Energy			10.26678/ABCM .COBEM2023.C OB2023-1773
	An Economy Based On Hydrogen And Its Utilization In Renewable Energies			10.26678/ABCM .COBEM2023.C OB2023-2322

	Mathematical Model Of A Filter For CO ₂ Removal Of Continuous Gas Supply For An Alkaline Membrane Fuel Cell			10.26678/ABCM .COBEM2023.C OB2023-2340
	Waste management in the transition to sustainable energy from hydrogen generation through metal-mediated reactions	20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Foz do Iguaçu	2024	10.26678/ABCM .ENCIT2024.CIT 24-0871
	Analysis and Perspectives of Sustainable Hydrogen Generation at Airports for On-Site Energy Production and Consumption in Aircraft.			10.26678/ABCM .ENCIT2024.CIT 24-0278
	Sustainable Hydrogen Production through Aluminum Utilization in Alkaline Solution and Electrolysis: A Comparative Perspective.			10.26678/ABCM .ENCIT2024.CIT 24-0576
	Mathematical Modeling And Simulation Of CO ₂ Removal From An Alkaline Solution For Fuel Cells Applications			10.5380/reterm. v21i4.89679
Revistas Internacionais	Study On The Disposal Of Waste From The Hydrogen Generation By Aluminum Oxidation In Alkaline Solution	Thermal Engineering (RETERM)	2024	10.5380/reterm. v22i2.91754
	An Economy Based On Hydrogen And Its Utilization In Renewable Energies			10.5380/reterm. v23i1.96845
Editorial	Editorial, Volume 22	Thermal Engineering (RETERM)	2023	10.5380/reterm. v22i1.90

Fonte: A Autora, (2025)

6 CONCLUSÃO

A busca por energias renováveis tem se intensificado diante das crises climáticas e oscilações no mercado de petróleo, incentivando o desenvolvimento de tecnologias para geração de energia limpa, como o hidrogênio. Neste estudo, optou-se por gerar hidrogênio por rotas metálicas, sendo ele destinado para a autonomia estendida de um carro elétrico, enquanto o resíduo produzido foi avaliado quanto ao seu potencial uso como aditivo na construção civil.

A caracterização do resíduo revelou informações importantes sobre sua composição química, estrutura cristalina e morfologia, permitindo avaliar sua viabilidade em aplicações sustentáveis.

A análise por MEV evidenciou diferenças morfológicas entre os resíduos provenientes do cavaco industrial e das latinhas recicladas, de forma que:

- i) enquanto o cavaco apresentou uma estrutura cristalina bem definida, os resíduos das latinhas exibiram uma morfologia granular e porosa, com a presença de impurezas metálicas como manganês e magnésio, oriundas do processo de reciclagem.
- ii) o mapeamento químico por EDS confirmou a predominância de alumínio e oxigênio em ambas as amostras, e, apesar das impurezas, a composição majoritária dos materiais mostrou-se semelhante. Isso indica que a reciclagem das latinhas não compromete suas propriedades estruturais, tornando viável sua reutilização em aplicações equivalentes ao alumínio de maior pureza.

Já a espectrometria por ICP-OES reforçou essa conclusão ao demonstrar que

- iii) o cavaco industrial apresentou maior pureza em relação às latinhas recicladas, que continham pequenas concentrações de Cu, Mg e Fe.

A origem dessas impurezas pode estar associada tanto à liga metálica das embalagens quanto ao próprio reator utilizado na reação. No entanto, a baixa corrosão do sistema sugere que a reação não compromete significativamente a integridade do equipamento. Além disso, observou-se também que:

- iv) a presença dessas impurezas nas latinhas dificultou a formação da camada de passivação, favorecendo a geração de hidrogênio mais puro e a formação do aluminato de sódio na sua forma mais estável.

A análise estrutural das amostras por DRX confirmou a alta cristalinidade do resíduo, permitindo identificar fases como gibbsita e boehmita, associadas à presença de hidróxidos ou oxi-hidróxidos de alumínio. A variação na posição e intensidade dos picos entre as amostras indicou diferenças estruturais relacionadas ao processo de reciclagem, refletindo alterações na organização cristalina do material. Apesar dessas mudanças, a presença de NaOH na reação inicial manteve traços de basicidade na amostra, evidenciando a influência do meio reacional mesmo após transformações estruturais distintas.

A partir desses resultados, avaliou-se a viabilidade da reutilização desse resíduo na construção civil, por meio de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático. As análises demonstraram, portanto, que:

- v) a evolução da resistência ao longo do tempo está diretamente ligada à composição do cimento e à presença de aditivos.
- vi) o cimento padrão apresentou bom desempenho inicial, mas sofreu queda na resistência aos 90 dias, sugerindo que sua formulação sem aditivos pode não ser suficiente para garantir estabilidade a longo prazo.
- vii) o cimento com 1% de adição mostrou-se mais eficiente, mantendo uma resistência elevada e constante ao longo do tempo.
- viii) a formulação com 3% de adição, apesar do bom desempenho inicial, apresentou uma redução na resistência aos 90 dias, indicando um possível limite de saturação do aditivo na matriz cimentícia.

Os resultados deste estudo indicam que o resíduo gerado na produção de hidrogênio por rotas metálicas possui características estruturais e químicas que possibilitam sua aplicação na construção civil. Além disso, a reciclagem de latinhas de alumínio mostrou-se uma alternativa sustentável, já que as impurezas presentes não comprometem significativamente a composição do material.

Assim, além de contribuir para a produção de hidrogênio renovável, este processo oferece uma destinação ambientalmente responsável para o resíduo gerado, promovendo a sustentabilidade e a valorização de materiais reciclados em novas aplicações industriais.

Por fim, sob uma ótica conclusiva: a melhor escolha para a potencial aplicação é a formulação com 1% de adição, pois ela se equipara ao desempenho do cimento padrão, mantendo uma resistência similar e estável ao longo do tempo, contrastando

das concentrações mais altas, que demonstraram uma inferioridade na resistência após 90 dias, dessa forma, a adição de 1% não compromete as propriedades mecânicas do material, garantindo um equilíbrio entre sustentabilidade e desempenho estrutural.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante:

- i. realizar a caracterização dos corpos de prova padrão (apenas argamassa/cimento) e daqueles com a adição do resíduo (CP 1% e CP 3%), com o objetivo de analisar e comparar a morfologia do compósito, verificando as possíveis alterações estruturais e de conformação decorrentes da substituição parcial do cimento;
- ii. realizar ensaios com a adição de 2% de resíduo aos corpos de prova (CP2%), com o objetivo de avaliar se a resistência mecânica obtida se aproxima da apresentada pelo CP1% ou pelo CP3%, considerando que, sob uma perspectiva quantitativa, 2% representa o dobro da menor substituição realizada nesse trabalho, e que foi a de melhor rendimento. Essa abordagem pode gerar uma discussão relevante sobre o efeito da quantidade de resíduo na performance do compósito.;
- iii. calcular a redução de custos e realizar uma análise econômica aplicada à construção civil, visando verificar a viabilidade financeira da substituição parcial do cimento pelo resíduo;
- iv. estimar a redução da pegada de carbono associada à substituição parcial do cimento, a fim de avaliar os benefícios ambientais da proposta no contexto da sustentabilidade.

8 REFERÊNCIAS

Abas, N., et al. (2020). Nature inspired artificial photosynthesis technologies for hydrogen production: Barriers and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 20787-20799.

ABNT NBR 12653:2015. Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT NBR 12821:2009. Chaminés industriais – Projeto e construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT NBR 13281:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT NBR 13529:2013. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT NBR 7215:2019. Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT NBR 8522-1:2021. Concreto endurecido — Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação — Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABRALATAS. Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alta Reciclabilidade. Disponível em: <abralatas.org.br>. 2022.

Alharthi, M., Hanif, I., & Alamoudi, H. (2022). Impact of environmental pollution on human health and financial status of households in MENA countries: Future of using renewable energy to eliminate the environmental pollution. *Renewable Energy*, 190, 338-346.

ALTHEMAN et al. Evaluation of coal fly ash in cementitious matrices. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 6, p. 1320–1337, 1 nov. 2017.

Américo, A. Estudo de rota de beneficiamento do resíduo do carvão mineral rico em pirita para possíveis aplicações tecnológicas. Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade) – UFSC, Araranguá, 2022.

Amiri, T.Y., GhaseMZageh, K., & Iulianelli, A. (2020). Membrane reactors for sustainable hydrogen production through steam reforming of hydrocarbons: A review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 157, 108148.

Ang, T.-Z., et al., 2022. A comprehensive study of renewable energy sources: classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Rev.* 43, 100939.

AQEL, M.; PANESAR, D. Physical and chemical effects of limestone filler on the hydration of steam cured cement paste and mortar. *Revista ALCONPAT*, v. 10, n. 2, p. 191–205, 30 abr. 2020.

ARRUDA JUNIOR, E. S.; BARATA, M. S. Cimento de baixo impacto ambiental a partir dos resíduos cauliniticos da Amazônia. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 1, 2022.

Asal, S., Özkaya, M., Acir, A., 2023. A study of hydrogen production by using SMR, S-I and HTE methods in a PACER fusion concept based on thorium molten salt fuel. *Fuel* 333, 126602.

Asal, Ş., Özkaya, M., & Acir, A. (2023). A study of hydrogen production by using SMR, S-I and HTE methods in a PACER fusion concept based on thorium molten salt fuel. *Fuel*, 333, 126602.

Atkins, P. and Jones, L. (2008) *Chemical Principles: The Quest for Insight*. 4th Edition, W. H. Freeman and Company, United States of America, 236.

Balachandar, G., et al. (2020). Biological hydrogen production via dark fermentation: A holistic approach from lab-scale to pilot-scale. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(8), 5202-5215.

BARBOSA, Jairo Mendes. A influência da moagem na atividade pozolânica do resíduo de granito. 2017. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017

Bolt, A., Dincer, I., Agelin-Chaab, M. "Experimental study of hydrogen production process with aluminum and water". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 45, No. 28, pp. 14232-14244, 2020

Brabazon, D.; Raffer, A., *Emerging Nanotechnologies for Manufacturing Second Edition*, 576 p. Elsevier Ltd., 2015

Burton, N. A., et al. (2021). Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110255.

CARVALHO, I. C. et al. The role of foreign ions in Portland cement production and properties: A state-of-the-art review on phase formation, polymorphism and hydration. *Cement and Concrete Composites*, p. 105989, 17 fev. 2025.

Cassanelli, Luís Guilherme Trovó. "Desenvolvimento de um reator de hidrogênio, por meio da reação entre alumínio e água, para alimentação de uma célula combustível". *Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo –São Carlos*, 2016.

CHEN, F. et al. A novel development of ultra-high performance concrete (UHPC) incorporating ordinary portland cement/calcium aluminate cement: Mechanical properties and microstructure. *Journal of Building Engineering*, v. 99, p. 111672, 26 dez. 2024.

Chen, G., et al. (2022). Hydrogen-polarized vacuum ultraviolet photolysis system for enhanced destruction of perfluoroalkyl substances. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 3, 100072.

Çoker, B., Çatlioğlu, H., & Birgin, O. (2010). Conceptions of students about renewable energy sources: a need to teach based on contextual approaches. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(2), 1488-1492.

Constantino, V. L., Araki, K., Oliveira, D. S., Oliveira, W. Preparation of aluminum compounds from bauxite: considerations about some aspects involved in a didactic experiment. *Química Nova*. vol. 25. Issue 3, pp: 490-498. Published by: Chemical Society Brazilian, 2002.

Córdova-Lizama, A., et al. (2022). Improving hydrogen production from the anaerobic digestion of waste activated sludge: Effects of cobalt and iron zero valent nanoparticles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30074-30084.

Cormos, C.-C. (2023). Green hydrogen production from decarbonized biomass gasification: An integrated techno-economic and environmental analysis. *Energy*, 270, 126926.

COSTA, F. L. et al. Influência do uso de aditivo acelerador de resistência baseado em nitrato de cálcio no desempenho de argamassas de cimento Portland com adição de cinza volante. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, 18 out. 2018.

Costa, F. N.; Ribeiro, D. V. Evaluation of phase formation and physical-mechanical properties of Portland cements produced with civil construction waste. *Cement*, v. 5, p. 100012, set. 2021.

Da Silva, Fabrício Carneiro. (2020). Desenvolvimento e modelagem de reator de geração de hidrogênio a partir da oxidação do alumínio. Dissertação de Mestrado de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Deebika, P., Saravanakumar, M. P. Utilization of RO rejects and waste aluminum scraps for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.

DENG, Z., Chen, M., Che, Q., Wang, H. Oxygen starvation control of proton exchange membrane fuel cell through fusion control strategy. *Applied Soft Computing*. Vol. 159, 111655, 2024.

DIAS, et. al. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO SEM E COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO/ USE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE (RCD) IN THE MANUFACTURE OF CONCRETE BLOCKS WITHOUT AND WITH THE ADDITION OF GRAPHENE OXIDE. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 5972–5989, 1 jan. 2021.

Duarte, L.C. et al. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura e Sistema de Energia Dispersiva no estudo de gemas: exemplos brasileiros. Instituto de Geociências, Porto Alegre: UFRGS, 2003.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition, 2013.

Emmott, S. (2013). Ten Billion: A Warning of Population and Power. London: Penguin Books

Epelle, E. I., et al. (2022). A Comprehensive Review of Hydrogen Production and Storage: A Focus on the Role of Nanomaterials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(47), 20398-20431.

Evans, K. A. Em *Industrial Inorganic Chemicals: Production and Uses*; Thompson, R., ed.; The Royal Society of Chemistry; Cambridge, cap. 11, p. 277-349, 1995.

FARIAS, M. M.; LIMA, C.; MARCELO. Escória de Alto Forno como substituição parcial ao cimento Portland. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 28, n. 2, 1 jan. 2023.

FERREIRA, G. et al. Emprego do lodo de uma estação de tratamento de água beneficiado como material suplementar ao cimento Portland. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, p. 653–661, 19 ago. 2022.

FIGUEIREDO, C. et al. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 4, p. 685–708, 5 ago. 2014.

FREITAS, Yasmin Ribeiro. Estudo do comportamento de argamassas cimentícias e geopoliméricas com a incorporação de resíduo de ETA. 2018. 58p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, I. R. DE; PANDOLFELLI, V. C. Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio. *Cerâmica*, v. 53, n. 325, p. 42–56, 1 mar. 2007.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy - a New Sustainability Paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, n. 1, p. 757–768, 1 fev. 2017.

Ghodke, P. K. et al. (2023). Hydrogen-rich syngas production from the lignocellulosic biomass by catalytic gasification: A state of art review on advance technologies, economic challenges, and future prospectus. *Fuel*, v. 342, p. 127800.

GOBBI, Andressa. Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares. 2014. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 60, n. 4, p. 639–644, dez. 2007.

Greenwood, N.N.; Earnshaw, A.; *Chemistry of the Elements*, Butterworth Heinemann; Oxford, 2ª ed., p. 216-277. 1997.

Guo, Y. et al. (2022). Near-infrared response Pt-tipped Au nanorods/g-C₃N₄ realizes photolysis of water to produce hydrogen. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 119, p. 53-60.

GÜR, T.M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy Environment*, 2018, v. 11, p. 2696–2767.

Haller, M. Y., Amstad, D., Dudita, M., Englert, A., Häberle, A. “Combined heat and power production based on renewable aluminium-water reaction”. *Renewable Energy*. Vol. 174, pp. 879-893, 2021.

Han, J. et al. Influence of sodium aluminate on cement hydration and concrete properties. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 342–349, ago. 2014.

HAN, Jianguo et al. Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics. *Journal Construction and Building Materials*, p. 457-462, 2015

Hasnaoui, S. et al. (2020). Enhancement of bio-hydrogen generation by spirulina via an electrochemical photo-bioreactor (EPBR). *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 11, p. 6231-6242.

Hiraki, T.; Akiyama, T. "Exergetic life cycle assessment of new waste aluminium treatment system with co-production of pressurized hydrogen and aluminium hydroxide". *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, n. 1, p. 153-161., 2009.

HO, L.-N. et al. Synthesis of a thermally stable mesoporous aluminophosphate by using sodium aluminate as precursor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 268, n. 1-3, p. 40–44, 24 ago. 2005.

Hsieh, S. -S.; Her, B.-S.; Chen, C.-I. "Aluminum-based hydrogen generator for a minitype próton Exchange membrane fuel cell with an innovative flow Field plate". *International Journal of Electrochemical Science*, v. 7, p.6859-6876, 2012.

HUANG, X. et al. A review: Feasibility of hydrogen generation from the reaction between aluminum and water for fuel cell applications. *Journal of Power Sources*. Vol. 229, p. 133-140, 2013.

Hurtubise, D. W., Klosterman, D. A., Morgan, A. B. "Development and demonstration of a deployable apparatus for generating hydrogen from the hydrolysis of aluminum via sodium hydroxide". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 43, No. 14, pp. 6777-6788, 2018.

Hurtubise, D. W., Klosterman, D. A., Morgan, A. B. "Development and demonstration of a deployable apparatus for generating hydrogen from the hydrolysis of aluminum via sodium hydroxide". *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 43, No. 14, pp. 6777-6788, 2018.

ILYUKHINA, A. V.; KRAVCHENKO, O. V.; BULYCHEV, B. M. Studies on microstructure of activated aluminum and its hydrogen generation properties in aluminum/water reaction. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 690, p. 321-329, 2017.

Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., Morosuk, T. "Colors" of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, v. 291, p. 117294, 2023.

INOCENTE, Jordana Mariot. Estudo da produção de metacaulim de alta reatividade em reator flash a partir de um caulim de elevada pureza. 2020. 111p. Dissertação

(Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2020.

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). Maiores reservas provadas de petróleo em 2020. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-reservas-provadas-de-petroleo-em-2020/>>, 2020.

International Energy Agency (IEA), 2020.

Jacob-Furlan, B. et. al. Study on the disposal of waste from the hydrogen generation by aluminum oxidation in alkaline solution. RETERM - Thermal Engineering, v. 22, n. 2, p. 07–12, 2023.

Kauffman, G. B.; Adams, M. L.; Educ. Chem, 36, 1990.

Khan, T.; Yu, M.; Waseem, M. (2022). Review on recent optimization strategies for hybrid renewable energy system with hydrogen technologies: State of the art, trends and future directions. International Journal of Hydrogen Energy.

Kim, T. Effects of sodium aluminate and reverse osmosis brine on hydration and mechanical properties of slag. Construction and Building Materials, v. 360, p. 129577, 19 dez. 2022.

Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons: New York, 4a ed., vol. 2, p. 317-330. 1992.

KRUPIŃSKA, I. The effect of the type of hydrolysis of aluminium coagulants on the effectiveness of organic substances removal from water. DESALINATION AND WATER TREATMENT, v. 186, p. 171–180, 2020.

Lee, J., Lim, J., Roh, C., Whang, H.S., Lee H. Electrochemical CO₂ reduction using alkaline membrane electrode assembly on various metal electrodes. Journal of CO₂ Utilization. Vol. 31, p. 244-250, 2019.

Lee, S. H. et al. (2020). Biological process for coproduction of hydrogen and thermophilic enzymes during CO fermentation. Bioresource Technology, v. 305, p. 123067.

LEITE, Juliano Moreira. A influência da vermiculita em argamassa geopolimérica com adição de nanotitânia. 2016. 49p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

Li, M., et al., 2023. A review on the extraction and recovery of critical metals using molten salt electrolysis. *J. Environ. Chem. Eng.* 11 (3), 109746.

Li, Y. et al. (2021). Liquid crystalline texture and hydrogen bond on the thermal conductivities of intrinsic thermal conductive polymer films. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 82, p. 250-256.

Lin, C. et al. Effects of sodium aluminate on the performance of seawater sea-sand engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 345, p. 128422, ago. 2022.

Lin, Y., et al., 2020. Zwitterionic hydrogels formed via quadruple hydrogen-bonds with ultra-fast room-temperature self-healing ability. *Mater. Lett.* 269, 127665.

Liu, B. et al. (2022). Hydrogen sulfide improves tall fescue photosynthesis response to low-light stress by regulating chlorophyll and carotenoid metabolisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 170, p. 133-145.

Liu, X. et al. (2023). Effects of adding *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* in the hydrogen production stage of a two-stage anaerobic digestion system on hydrogen-methane production and microbial communities. *Fuel*, v. 342, p. 127831.

LOPES, R. K. et al. Partial replacement of Portland cement with industrial glass waste in mortars. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 2, 2021.

Loureiro, D. L. C., Silva, J. F., & Costa, M. P. (2023). Aluminum recycling as a source of hydrogen for renewable energy applications. *Renewable Energy*, 175, 568-579.

Lozano-Martín, D.; Moreau, A.; Chamorro, C. R. (2022). Thermophysical properties of hydrogen mixtures relevant for the development of the hydrogen economy: Review of available experimental data and thermodynamic models. *Renewable Energy*, v. 198, p. 1398-1429.

Ma, Q. et al. (2022). Natural resources tax volatility and economic performance: Evaluating the role of digital economy. *Resources Policy*, v. 75, p. 102510.

Ma, Q. et al. (2022). Natural resources tax volatility and economic performance: Evaluating the role of digital economy. *Resources Policy*, v. 75, p. 102510.

MACCARINI, Helena Somer. Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim. 2015. 58 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

Maggio, G.; Squadrito, G.; Nicita, A. (2022). Hydrogen and medical oxygen by renewable energy based electrolysis: A green and economically viable route. *Applied Energy*, v. 306, p. 117993.

Mahbub, P. et al. (2022). Scalable production of hydroxyl radicals (.OH) via homogeneous photolysis of hydrogen peroxide using a continuous-flow photoreactor. *Chemical Engineering Journal*, v. 427, p. 131762.

Manish, S.; Pillai, I. R.; Banerjee, R. (2006). Sustainability analysis of renewables for climate change mitigation. *Energy for Sustainable Development*, v. 10, n. 4, p. 25–36.

Martin, D. F. The Race for Cheap Aluminum: Hall Versus Héroult. *Technology and Innovation*, Vol. 13, pp. 233–238, 2011

MASUERO; CARPENA. Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA) através da técnica de Refinamento de Rietveld. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 19, n. 2, p. 150–158, 1 jun. 2014.

MEHTA, Ankur; ASHISH, Deepankar Kumar. Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, p. 1-18, 2019.

MEINHART, A. H. et al. Análise do potencial de uso do fíler basáltico como substituição parcial do cimento Portland. *Ambiente Construído*, v. 23, n. 4, p. 169–186, dez. 2023.

MEIRA, G. R. et al. Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 33–52, dez. 2014.

MUHAMMED, N.S., Gbadamosi, A.O., Epelle, E.I., Abdulrasheed, A.A., Haq B., Patil S., Al-Shehri, D., Kamal, M.S. Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy. *Journal of Energy Storage*. Vol. 23, 109207, 2023.

O'Keeke, T. J. Pourbaix Diagrams. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B0080431526013991>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ODA, S. et al. Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 29, n. 2, 2024.

Olesik, J. W. ICP-OES. *Encyclopedia of Materials Characterization Surfaces, Interfaces, Thin Films*. Elsevier. p. 633–644, 1 jan. 1992.

OLIVEIRA, Y. S. DE; COSTA, E. B. C.; MOTTA, L. A. DE C. Uso de dregs e grits em substituição parcial ao cimento: caracterização e resistência mecânica. *Ambiente Construído*, v. 24, dez. 2024.

Onwuemezie, L.; Gohari Darabkhani, H.; Moghimi Ardekani, M. (2023). Hybrid solar-driven hydrogen generation by sorption enhanced–chemical looping and hydrocarbon reforming coupled with carbon capture and Rankine cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Organização das Nações Unidas (ONU). 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), 2017.

Pareesh H. S.; Bharat, A. B. Characterization Tools and Techniques for Nanomaterials, Cap. 3, p. 83-111. *Nanomaterials for Green Energy*. Elsevier Ltd., jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813731-4.00003-5>.

Parmuzina, A. V., Kravchenko, O. V. Activation of aluminium metal to evolve hydrogen from water. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 12, p. 3073-3076, 2008.

Pata, U. K. (2018). Renewable energy consumption, urbanization, financial development, income and CO2 emissions in Turkey: Testing EKC hypothesis with structural breaks. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, p. 770-779.

PATEL, K. et al. Polydopamine films change their physicochemical and antimicrobial properties with a change in reaction conditions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 20, n. 8, p. 5744–5755, 2018.

PAYÁ BERNABEU, J. et al. Activadores alternativos para cementos de activación alcalina. *Revista ALCONPAT*, v. 12, n. 1, p. 16–31, 1 jan. 2022.

Qu, D., et al., 2022. Perchlorate removal by a combined heterotrophic and bio-electrochemical hydrogen autotrophic system. *Sci. Total. Environ.* 851, 158178.

Ribeiro, J. L. B. Estudo das interações rocha-fluido em arenitos inconsolidados com simuladores físicos utilizando tomografia computadorizada e microfluorescência de raios-X por luz síncrotron. Tese (Doutorado em Química) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

Sadeghi, S.; Baniasad Askari, I. (2020). Performance and economic investigation of a combined phosphoric acid fuel cell/organic Rankine cycle/electrolyzer system for sulfuric acid production; Energy-based organic fluid selection. *International Journal of Energy Research*, 44(4), 2704–2725.

Santika, W. G. et al. (2019). From goals to joules: A quantitative approach of interlinkages between energy and the Sustainable Development Goals. *Energy Research & Social Science*, v. 50, p. 201–214.

SANTOS et al. Influência da incorporação de resíduo de lapidação de vidro nas propriedades da argamassa de cimento Portland. *Matéria*, v. 29, n. 2, 1 jan. 2024.

SANTOS, Juzelia; FIGUEIREDO, Nathália Cristina Xavier de. Controle tecnológico de argamassa produzida com: um, dois e 58089 *International Journal of Development Research*, Vol. 12, Issue, 08, pp. 58081-58090, August, 2022 três anos de idade com agregado de resíduo de louça sanitária e agregado natural. *Revista Profiscientia*, n. 13, p.60-79, 2019.

Sher, F. et al. Enhancing hydrogen production from steam electrolysis in molten hydroxides via selection of non-precious metal electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 53, p. 28260–28271.

Shui, X. et al. Enhancement of static magnetic field on biological hydrogen production via photo-fermentation of giant reed. *Bioresource Technology*, v. 367, p. 128221.

Skoog, D. A; West, D. M.; Holler, F.J.; Crouch, S.R. *Fundamentals of analytical chemistry*; tradução: Marco Tadeu Grassi; revisão técnica Célio Pasquini. São Paulo, Cengage Learning, 2009.

SOLER, L. et al. In situ generation of hydrogen from water by aluminum corrosion in solutions of sodium aluminate. *Journal of Power Sources*, v. 192, n. 1, p. 21–26, 1 jul. 2009.

Soler, L., Candela, A. M., Macanas, J., Muñoz, M., & Casado, J. Hydrogen generation by aluminum corrosion in seawater promoted by suspensions of aluminum hydroxide. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, n. 20, p. 8511-8518, 2009.

Tashie-Lewis, B. C.; Nnabuife, S. G. (2021). Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100172.

TEDESCO, Thais Delaqua Costa. Desenvolvimento de argamassas utilizando granulometrias distintas de perlita. 2016. 47 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016

Timofeeva, S. S. et al. (2022). Steam gasification of digestate after anaerobic digestion and dark fermentation of lignocellulosic biomass to produce syngas with high hydrogen content. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Toepel, J. et al. (2023). Photosynthesis driven continuous hydrogen production by diazotrophic cyanobacteria in high cell density capillary photobiofilm reactors. *Bioresource Technology*, 373, 128703.

Turner, J. A. (1999). A Realizable Renewable Energy Future. *Science*, 285(5428), 687–689.

- Valizadeh, S. et al. (2022). Valorization of biomass through gasification for green hydrogen generation: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 365, 128143.
- Vargas, J. V. C., Bejan, A. (2004). Thermodynamic optimization of internal structure in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 28(4), 319-339.
- Vargas, J. V. C., Ordonez, J. C., Bejan, A. (2004). Constructal flow structure for a PEM fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(19-20), 4177-4193.
- Wang, G. et al. (2018) Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: A review. *Fuel Processing Technology*, v. 179, p. 203–228.
- Wang, G., et al., 2018. Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: a review. *Fuel Process. Technol.* 179, 203-228.
- Wang, H., et al., 2022. Thermodynamic analysis of low-temperature and high-pressure (cryo-com-pressed) hydrogen storage processes cooled by mixed-refrigerants. *Int. J. Hydrog. Energy*.
- Wang, Y. et al. Effects of sodium aluminate and quicklime on the properties of CSA grouting materials. *Journal of Building Engineering*, v. 58, p. 105060, 15 out. 2022.
- Wanghon, Alexandre José Lobato. Energia do hidrogênio. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil - Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.
- Woo, Y. et al. (2023). Kinetic modeling of the steam reforming of light hydrocarbon mixture from waste resources: Effects of gas composition on hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- WU, G. et al. Enhanced phosphate removal with fine activated alumina synthesized from a sodium aluminate solution: performance and mechanism. *RSC Advances*, v. 12, n. 8, p. 4562–4571, 4 fev. 2022.

Xia, D.; Huang, S.; Zhang, H. (2020). Transformation analysis of key liquid phase products during lignite fermentation to produce biological hydrogen. *Natural Gas Industry B*, v. 7, n. 2, p. 168–175.

Ye, F. et al. Influence of sodium aluminate on calcium leaching of shotcrete in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 117, p. 104156–104156, 1 nov. 2021.

Ye, P.-H.; Qi, T.-G.; Zhou, Q.-S.; Wu, X.-P.; Peng, Z.-H.; Liu, G.-H.; Li, X.-B. Particles Evolution during Seeded Precipitation of Sodium Aluminate Solution by Adding Active Seed. *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao Chin. J. Nonferr. Met.* 2020, 30, 1172–1181.

ZHANG, B., Hua, Y., Gao, Z. Strategies to optimize water management in anion exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*. Vol. 525, 231141, 2022.

Zhang, T., et al., 2022. Feasibility of hydrogen recovery and optimization of gas production from protein-rich food waste by bio-electrochemical system. *Int. J. Hydrog. Energy*.

Zhang, X., et al., 2023. Modeling and optimization of photo-fermentation biohydrogen production from co-substrates basing on response surface methodology and artificial neural network integrated genetic algorithm. *Bioresour. Technol.* 374, 128789.