

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

MARIA CECÍLIA RAMOS DE ARAÚJO VELOSO

**ANÁLISE INTEGRADA DO RESÍDUO DE BAUXITA E DO COMBUSTÍVEL
DERIVADO DE RESÍDUOS: REVISÕES, CARACTERIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE
COMPÓSITOS PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Sorocaba
Junho/2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

MARIA CECÍLIA RAMOS DE ARAÚJO VELOSO

**ANÁLISE INTEGRADA DO RESÍDUO DE BAUXITA E DO COMBUSTÍVEL
DERIVADO DE RESÍDUOS: REVISÕES, CARACTERIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE
COMPÓSITOS PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis para obtenção do título de doutora em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade Federal de São Carlos. Área de concentração: Produção Sustentável.

Orientação: Prof. Dr. Fabio Minoru Yamaji
Co-orientação: Gabriela Tami Nakashima
Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

Sorocaba
Junho/2025

Veloso, Maria Cecília Ramos de Araújo

Análise integrada do resíduo de bauxita e do Combustível Derivado de Resíduos: revisões, caracterização e produção de compósitos para aplicação na indústria cimenteira / Maria Cecília Ramos de Araújo Veloso -- 2025.
177f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Fabio Minoru Yamaji

Banca Examinadora: Gabriela Bertoni Belini, José Cláudio Caraschi, Juliana Tófano de Campos Leite Toneli, Leandro Cardoso de Moraes

Bibliografia

1. Valorização de resíduos. 2. Waste-to-Energy. 3. Sustentabilidade. I. Veloso, Maria Cecília Ramos de Araújo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Maria Cecília Ramos de Araújo Veloso, realizada em 25/06/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji (UFSCar)

Prof. Dr. José Cláudio Caraschi (UNESP)

Prof. Dr. Leandro Cardoso de Moraes (UNESP)

Profa. Dra. Juliana Tófano de Campos Leite Toneli (UFABC)

Profa. Dra. Gabriela Bertoni Belini (CBA)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

AGRADECIMENTOS

Sou grata ao Universo e a cada uma de suas formas. Grata pela vida que me foi dada. Por ter tido saúde, paciência e perseverança com as oportunidades que cruzaram meu caminho e me trouxeram até aqui.

Agradeço à Universidade Federal de São Carlos, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis, pela estrutura física e científica disponíveis para desenvolvimento da minha pesquisa.

À Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em nome do Roberto Seno Júnior, pela iniciativa de desenvolver projetos juntamente com a Universidade e pelo acompanhamento durante todo o período.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos membros da banca, Dr. José Caraschi, Dr. Gabriela Belini, Dr. Leandro de Moraes, Dr. Juliana Toneli, Dr. Robmilson Gundim e Dr. Elias Padilla pela disponibilidade e contribuições dadas.

Em especial, um agradecimento ao meu orientador Fabio Yamaji pelo suporte, apoio, paciência e disposição. Elementos necessários nessa etapa. Também a Gabriela Nakashima pela co-orientação, auxílio e disposição.

A todos os meus colegas de laboratório que, direta e indiretamente, me ajudaram nos experimentos, análises e desenvolvimento de ideias. Em especial à Anna Júlia que teve uma importância significativa aqui.

Um agradecimento mais que especial aos meus pais, Carlos (†) e Jeanine, e aos meus irmãos, Camila e Hugo, que entenderam meu caminho, a ausência que ele trouxe e, mesmo de longe, nunca deixaram de me apoiar. Um agradecimento especial também ao Andrés que, acompanhando mais de perto neste último ano, sempre encontrou uma forma de me animar a seguir em frente e evoluir. Amo vocês.

Muito obrigada a todos!

“Vivemos em uma época perigosa. O homem domina a natureza antes que tenha aprendido a dominar a si mesmo.”

Albert Schweitzer

RESUMO

VELOSO, Maria Cecília Ramos de Araújo. Análise integrada do resíduo de bauxita e do Combustível Derivado de Resíduos: revisões, caracterização e produção de compósitos para aplicação na indústria cimenteira. 2025. Tese (Doutorado em Planejamento e uso de recursos renováveis) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2025.

O objetivo deste trabalho foi aprofundar o entendimento sobre o resíduo de bauxita (RB) (proveniente da produção de alumínio) e o Combustível Derivado de Resíduos (CDR) (proveniente de resíduos sólidos urbanos e industriais) no Brasil e no mundo, além de produzir e avaliar um compósito formulado com esses materiais, capaz de atuar simultaneamente como combustível e como componente do clínquer na indústria cimenteira. O trabalho foi organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica, os Capítulos 2 e 3 contemplam revisões sistematizadas da literatura de caráter quantitativo e qualitativo sobre o RB e o CDR, o Capítulo 4 traz uma caracterização experimental do CDR e o Capítulo 5 apresenta a produção e avaliação do material compósito. A revisão sistematizada sobre o RB teve como base a análise de 1.539 artigos científicos indexados na base Web of Science no período de 1995 a 2024. Foram mapeadas as principais tendências e aplicações do RB, com destaque para seu uso na produção de materiais. A análise também revelou lacunas de conhecimento sobre o RB e diferenças na pesquisa entre o cenário brasileiro e mundial. A revisão sistematizada sobre o CDR foi realizada com a análise de 774 artigos, sendo 16 com autoria brasileira. O estudo demonstrou que, embora o CDR tenha grande potencial como fonte energética alternativa, suas propriedades e exigências regulatórias limitam sua adoção mais ampla. Ainda, demonstrou que o Brasil necessita avançar no contexto *waste-to-energy* e que o CDR no país está quase exclusivamente relacionado ao uso em cimenteiras. Entre as análises realizadas na caracterização do CDR: composição gravimétrica, umidade, teor de voláteis, cinzas, carbono fixo, poder calorífico superior, análise elementar e mineralógica. Os dados obtidos forneceram subsídios para o entendimento do comportamento térmico do CDR, do seu potencial como combustível alternativo e das dificuldades na sua utilização. Por fim, foi desenvolvido um material compósito combinando o RB e o CDR em diferentes proporções, visando à produção de um combustível sólido com dupla função: geração de energia térmica e atuação como matéria-prima para o clínquer. O compósito foi produzido por processo termo-rotacional e avaliado quanto às propriedades energéticas e composição das cinzas, com destaque para o enriquecimento em óxidos metálicos proporcionado pelo RB, favorecendo o uso em fornos de

cimento. Os resultados indicaram que todos os compósitos mantiveram propriedades compatíveis com aplicações térmicas e apresentaram composição elementar otimizada para sua utilização como matéria-prima do clínquer, reforçando o duplo potencial: como combustível alternativo e como insumo mineral. Como contribuição geral, o trabalho integra diferentes abordagens para propor soluções viáveis e sustentáveis no contexto do aproveitamento de resíduos, com potencial impacto ambiental positivo e alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: resíduo de bauxita; Combustível Derivado de Resíduos; valorização de resíduos; propriedades físico-químicas; sustentabilidade industrial.

ABSTRACT

VELOSO, Maria Cecília Ramos de Araújo. Integrated analysis of bauxite residue and Refuse-Derived Fuel: reviews, characterization, and composite production for application in the cement industry. 2025. Thesis (Ph.D. in Planning and Use of Renewable Resources) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2025.

The aim of this work was to deepen the understanding of bauxite residue (BR) (originating from aluminum production) and Refuse-Derived Fuel (RDF) (originating from municipal and industrial solid waste) in Brazil and worldwide, as well as to produce and evaluate a composite formulated with these materials, capable of acting simultaneously as a fuel and as a clinker component in the cement industry. The work is organized into five chapters. Chapter 1 presents a literature review; Chapters 2 and 3 include systematized quantitative and qualitative literature reviews on BR and RDF; Chapter 4 presents an experimental characterization of RDF; and Chapter 5 covers the production and evaluation of the composite material. The systematized review on BR was based on the analysis of 1,539 scientific articles indexed in the Web of Science database between 1995 and 2024. The main trends and applications of BR were mapped, with emphasis on its use in the production of materials. The analysis also revealed knowledge gaps regarding BR and differences in research between the Brazilian and global contexts. The systematized review on RDF was based on the analysis of 774 articles, 16 of which had Brazilian authorship. The study showed that, although RDF has great potential as an alternative energy source, its properties and regulatory requirements limit broader adoption. It also demonstrated that Brazil needs to advance in the waste-to-energy context, and that RDF in the country is almost exclusively associated with use in cement plants. The characterization of RDF included the following analyses: gravimetric composition, moisture content, volatile matter, ash content, fixed carbon, higher heating value, elemental and mineralogical analyses. The data obtained provided insights into the thermal behavior of RDF, its potential as an alternative fuel, and the challenges of its utilization. Finally, a composite material was developed by combining BR and RDF in different proportions, aiming to produce a solid fuel with dual function: thermal energy generation and use as raw material for clinker. The composite was produced by a thermo-rotational process and evaluated in terms of energy properties and ash composition, with emphasis on the enrichment in metallic oxides provided by the BR, favoring its use in cement kilns. The results indicated that all composites maintained properties compatible with thermal

applications and presented an optimized elemental composition for their use as clinker raw material, reinforcing the dual potential: as an alternative fuel and as a mineral input. As a general contribution, this work integrates different approaches to propose viable and sustainable solutions for waste utilization, with potential positive environmental impact and alignment with the Sustainable Development Goals.

Keywords: bauxite residue; Refuse-Derived Fuel; waste valorization; physicochemical properties; industrial sustainability.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1.	PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO	16
2.1.1.	Processo Bayer	17
2.1.2.	Resíduo de bauxita	19
2.1.3.	Desafios e possibilidades para o resíduo de bauxita.....	23
2.2.	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	24
2.2.1.	Aproveitamento energético dos RSU	27
2.3.	INDÚSTRIA CIMENTEIRA	30
2.3.1.	Produção do cimento	30
2.3.2.	Coprocessamento	32
2.4.	MATERIAIS COMPÓSITOS	34
	REFERÊNCIAS	36
3.	CAPÍTULO 2: APLICAÇÕES E TECNOLOGIAS ASSOCIADAS AO RESÍDUO DE BAUXITA NO BRASIL E NO MUNDO: UMA REVISÃO DE LITERATURA	42
3.1.	INTRODUÇÃO.....	42
3.2.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	44
3.2.1.	Fundamentação e parâmetros metodológicos.....	44
3.2.2.	Análise dos dados.....	45
3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
3.3.1.	Análise quantitativa.....	48
3.3.1.1.	Cenário de pesquisas sobre o resíduo de bauxita no mundo	48
3.3.1.2.	Cenário de pesquisas sobre o resíduo de bauxita no Brasil.....	56
3.3.2.	Categorização temática e análise descritiva	60
3.3.3.	Considerações, desafios e lacunas de pesquisa.....	67
3.4.	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS	69
4.	CAPÍTULO 3: COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) COMO UMA ESTRATÉGIA DE WASTE-TO-ENERGY: UMA REVISÃO DA LITERATURA NO CONTEXTO MUNDIAL E BRASILEIRO.....	73

4.1.	INTRODUÇÃO.....	74
4.2.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	76
4.2.1.	Coleta de dados	76
4.2.2.	Análise de dados	78
4.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.3.1.	Cenário global de pesquisa sobre o CDR	80
4.3.1.1.	Evolução da produção científica.....	80
4.3.1.2.	Áreas de pesquisa e principais temas	81
4.3.1.3.	Principais periódicos	83
4.3.1.4.	Distribuição geográfica e redes de colaboração	84
4.3.1.5.	Categorização temática e interpretação descritiva.....	86
4.3.1.6.	Considerações, desafios, lacunas e direções futuras de pesquisa	97
4.3.2.	Cenário da pesquisa brasileira sobre o CDR	98
4.3.2.1.	Tendências da produção científica no Brasil	98
4.3.2.2.	Áreas de investigação emergentes e tópicos em destaque.....	98
4.3.2.3.	Principais periódicos no cenário brasileiro.....	100
4.3.2.4.	Categorização temática e interpretação descritiva no cenário brasileiro..	101
4.3.2.5.	Considerações, desafios, lacunas e futuras direções de pesquisa	105
4.4.	CONCLUSÕES	107
	REFERÊNCIAS	107

5. CAPÍTULO 4: COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E PROPRIEDADES DE UM COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) PROVENIENTE DO SUDESTE DO BRASIL

5.1.	INTRODUÇÃO.....	116
5.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	118
5.2.1.	Obtenção e preparo do Combustível Derivado de Resíduos	118
5.2.2.	Caracterização do Combustível Derivado de Resíduos	119
5.2.3.	Análise estatística.....	121
5.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	121
5.3.1.	Propriedades físicas.....	121
5.3.2.	Propriedades químicas	124
5.3.3.	Propriedades energéticas	127
5.3.4.	Caracterização estrutural	128
5.4.	CONCLUSÕES	131

REFERÊNCIAS	132
6. CAPÍTULO 5: PRODUÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) E RESÍDUO DE BAUXITA PARA USO COMO FONTE ENERGÉTICA E COMPONENTE DO CLÍNQUER	137
6.1. INTRODUÇÃO.....	137
6.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	139
6.2.1. Obtenção e preparo das matérias-primas	139
6.2.2. Caracterização das matérias-primas	140
6.2.3. Produção dos compósitos	142
6.2.4. Avaliação dos compósitos.....	143
6.2.5. Análise estatística.....	144
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	144
6.3.1. Características e propriedades das matérias-primas	144
6.3.1.1. Combustível Derivado de Resíduos (CDR).....	144
6.3.1.2. Resíduo de bauxita (RB)	149
6.3.2. Características e propriedades dos compósitos produzidos	153
6.3.2.1. Propriedades físicas	153
6.3.2.2. Propriedades químicas e estruturais	156
6.3.2.3. Propriedades energéticas	161
6.3.2.4. Caracterização das cinzas dos compósitos	162
6.4. CONCLUSÕES	167
REFERÊNCIAS	168
7. CONCLUSÕES GERAIS	175
REFERÊNCIAS	176

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é produzido em larga escala em todo o mundo e tem grande importância para a população devido às suas propriedades intrínsecas que possibilitam inúmeras aplicações em diversos setores industriais (Galevsky; Rudneva; Aleksandrov, 2018; Kolbeinsen, 2020). O material está entre os principais metais produzidos no mundo (40% da produção de metal industrial em 2021) sendo a China o maior produtor (Bhutada, 2022). O processo Bayer é o método mais utilizado para o refino da bauxita e produção da alumina, sendo responsável por 95% da produção mundial (Wang, L. *et al.*, 2019).

Este processo, no entanto, acarreta a geração de grandes quantidades de resíduo, comumente chamado de resíduo de bauxita. O legado de quase 120 anos de extração de alumina a partir da bauxita se manifesta como cerca de 2,7 bilhões de toneladas do resíduo e essa quantidade está aumentando em aproximadamente 120 milhões de toneladas por ano (Mtpa) (Power; Gräfe; Klauber, 2011). Devido suas características, como a extrema alcalinidade (pH ~ 12), seu gerenciamento deve ser muito bem controlado, o que se torna um processo complexo e desafiador para as indústrias de alumínio (Evans, 2015, 2016; Gräfe; Power; Klauber, 2011).

Paralelamente a isso, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) correspondem a um grupo de materiais gerado mundialmente em larga escala, acompanhando o exponencial crescimento populacional e as mudanças nos padrões de consumo. A geração *per capita* de RSU no Brasil em 2022 foi de 381 kg (kg/habitante/ano) (Abrelpe, 2022). Ainda segundo a fonte, o Brasil gerou aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU em 2022 e o montante de 39% tiveram disposição inadequada (lixões e aterros controlados). A ineficiência no gerenciamento desses materiais se tornou uma problemática ambiental.

É urgente a criação de propostas que viabilizem a utilização de ambos os materiais em outros processos para propiciar uma melhor destinação destes resíduos. A inserção do resíduo de bauxita na indústria do cimento vem sendo estudada e mostra-se uma alternativa de utilização do material (Ortega *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; Wang, Y. *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2009).

Em relação ao RSU, observa-se um maior interesse no seu aproveitamento energético (Azam *et al.*, 2021; Nowak, 2023; Porshnov; Ozols; Klavins, 2020; Sarc; Lorber, 2013). Nesse contexto está o Combustível Derivado de Resíduos (CDR), um produto constituído da fração energética do RSU, e de outros resíduos sólidos não perigosos, que tem as indústrias de cimento como principais consumidoras. É relatado que ele pode substituir parcialmente os

combustíveis fósseis sem comprometer a qualidade do clínquer (Haas; Weber, 2010; Kara, 2012).

Tanto para o resíduo de bauxita como para o CDR, existem fatores relacionados às suas características físico-químicas que inviabilizam o uso ou o limitam à pequenas porcentagens: para o RB destaca-se o pH elevado (~ 12) e para o CDR destacam-se a heterogeneidade e baixa densidade. É necessária a criação de uma alternativa que viabilize a utilização desses materiais em larga escala. A produção de um compósito com a junção destes dois materiais vem a ser uma alternativa partindo do princípio de que suas características serão modificadas com a produção de um terceiro e novo material (Callister Junior; Rethwisch, 2016). Testes e análises laboratoriais são necessários e fundamentais para verificar as propriedades obtidas no material, suas características, desempenho e, por fim, verificar a viabilidade de produção.

O objetivo deste trabalho foi aprofundar o entendimento sobre o resíduo de bauxita e o CDR no Brasil e no mundo, além de produzir e avaliar um compósito formulado com esses materiais, capaz de atuar simultaneamente como combustível e como componente do clínquer. O trabalho está dividido em seis capítulos: Capítulo 1: Introdução; Capítulo 2: Revisão bibliográfica; Capítulo 3: Artigo 1 - Revisão sistematizada sobre o resíduo de bauxita; Capítulo 4: Artigo 2 - Revisão sistematizada sobre o CDR; Capítulo 5: Artigo 3 - Caracterização de um CDR; e Capítulo 6: Artigo 4 - Produção e avaliação do material compósito.

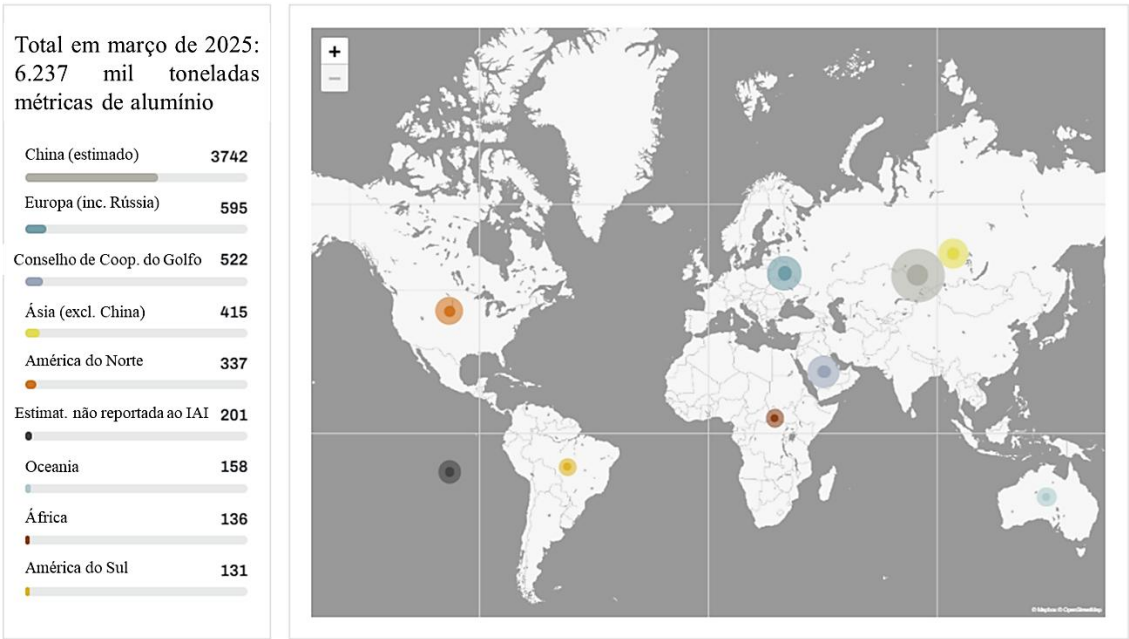
2. CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO

O alumínio é um dos metais mais utilizados pela humanidade e isso se deve às suas propriedades intrínsecas que possibilitam inúmeras aplicações em diversos setores industriais como construção civil, setores automotivo e de transporte, embalagens, energia, máquinas e equipamentos e bens de consumo. Dentre essas propriedades é possível citar a leveza, altas condutividades elétrica e térmica, resistência a corrosão, alta relação resistência/peso, reflexibilidade, ductibilidade, impermeabilidade e o fato de ser infinitamente reciclável (Galevsky; Rudneva; Aleksandrov, 2018; Kolbeinsen, 2020).

Na Figura 1 é possível observar como a produção do alumínio primário está distribuída no mundo.

Figura 1. Produção de alumínio primário no mundo em março de 2025.



Fonte: Adaptado de International Aluminium Institute (2025).

Segundo dados da Associação Brasileira do Alumínio (2024), o Brasil é o oitavo maior produtor de alumínio primário, precedido pela China, Índia, Rússia, Canadá, Emirados Árabes, Bahrein e Austrália; o quarto maior produtor de bauxita, atrás da Austrália, Guiné e China, e terceiro maior produtor de alumina, atrás da China e da Austrália. Ainda segundo a

fonte, em 2023 a indústria do alumínio no Brasil gerou 511.595 empregos e faturou 27 bilhões de reais.

A matéria-prima do alumínio é a bauxita, um mineral rico em alumina (Al_2O_3). Na Tabela 1 estão apresentados os principais constituintes da bauxita.

Tabela 1. Composição elementar e mineralógica geral das bauxitas.

Elementos (óxidos)	Teor em massa (%)			Principais fases minerais	Fórmula de célula unitária
	Mín.	Méd.	Máx.		
Al_2O_3	20	26–60	70	Gibbsita Boemita	$\text{Al}(\text{OH})_3$ $\gamma\text{-AlOOH}$
Fe_2O_3	0.5	10–35	65	Goethita Hematita	$\alpha\text{-FeOOH}$ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
TiO_2	0.1	2–4	25	Anatase Rutilo Ilmenita	TiO_2 TiO_2 TiFeO_3
SiO_2	0.1	4–8	15	Caulinita Quartzo	$\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ SiO_2

Fonte: Bardossy e Aleva (1990) apud Gräfe; Power; Klauber (2011).

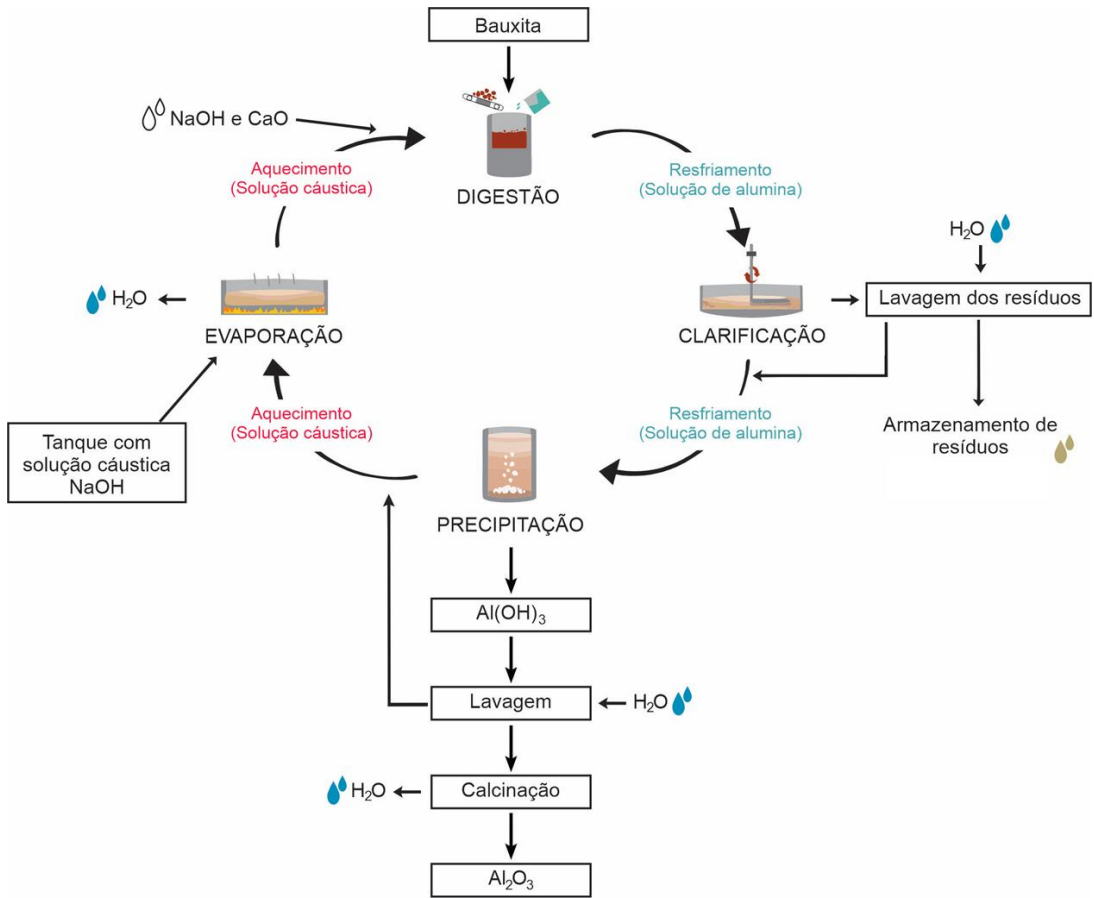
O processo de transformação da bauxita em alumínio envolve várias etapas, incluindo o refino. O método mais utilizado para o refino e produção da alumina é chamado de Processo Bayer, responsável pela produção de 95% da alumina do mundo (Wang *et al.*, 2019).

2.1.1. Processo Bayer

O processo Bayer, utilizado hoje em larga escala para a produção de alumina, foi descoberto originalmente em São Petersburgo (Rússia), por Karl Josef Bayer, na Planta Química Tentelev para fornecimento de mordentes para a indústria têxtil (Habashi, 2017). Ainda segundo a fonte, o processo, evoluiu do método anterior de Le Chatelier, com seu próprio método de preparação de hidróxido de alumínio por semeadura em 1888, e posteriormente, em 1892, com a lixiviação da bauxita sob pressão para recuperação do hidróxido de sódio utilizado.

O processo tem uma característica cíclica, envolvendo etapas de digestão, clarificação, precipitação e calcinação (Figura 2).

Figura 2. Representação esquemática do processo Bayer descrevendo sua natureza cíclica.



Fonte: Adaptado de Hind; Bhargava; Grocott (1999).

Uma breve descrição das etapas é apresentada a seguir seguindo o relatado por Hind; Bhargava; Grocott (1999), Power; Gräfe; Klauber (2011) e Seno Junior (2023):

- Na etapa de digestão, a bauxita previamente triturada é solubilizada com o hidróxido de sódio, formando uma solução cáustica, e submetida a temperaturas de até 270 °C. Nesta etapa, os compostos de alumínio estão presentes como gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e boemita (AlOOH). A Tabela 2 apresenta as variáveis do processo de digestão desses compostos.

Tabela 2. Variáveis do processo Bayer.

Principais minerais	Gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$	Boemita $\gamma\text{-AlOOH}$
Temperatura (°C)	104 – 145	200 – 232
Pressão (atm)	1,0 – 3,0	6,0
NaOH (M)	8,9 – 3,6	5,0 – 3,6

Fonte: Hudson (1987) *apud* (Gräfe; Power; Klauber, 2011).

- Na etapa de clarificação, a solução supersaturada em aluminato de sódio (NaAl(OH)_4), conhecida como licor Bayer, é separada do seu resíduo por meio da decantação e filtração. Todo o material que não foi solubilizado na etapa de digestão é chamado de resíduo de bauxita, também conhecido como lama vermelha. O resíduo é descartado enquanto o licor é enviado para a etapa de precipitação.
- Na etapa de precipitação, o aluminato de sódio, que se encontra supersaturado no licor Bayer, é precipitado na forma de hidróxido de alumínio (Al(OH)_3).
- Na etapa de calcinação, o hidróxido de alumínio, precipitado anteriormente, é calcinado a altas temperaturas (900 – 1000 °C) para eliminação da água e, como resultado, obtêm-se o óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3).

2.1.2. Resíduo de bauxita

O legado de quase 120 anos de extração de alumina a partir do minério de bauxita se manifesta como cerca de 2,7 bilhões de toneladas de material residual e essa quantidade está aumentando em aproximadamente 120 milhões de toneladas por ano (Mtpa) (Power; Gräfe; Klauber, 2011) (Figura 3). O material, chamado de resíduo de bauxita ou lama vermelha, é gerado durante o refino da bauxita no processo Bayer. A estimativa é de que para cada tonelada de alumina produzida é gerada, em média, 1,5 tonelada de resíduo de bauxita.

Figura 3. Taxa de produção global e inventário cumulativo de resíduos de bauxita.



Fonte: Adaptado de Power; Gräfe; Klauber (2011).

O resíduo de bauxita apresenta características físico-químicas que impedem sua destinação ao ambiente, como o alto pH (~ 12), alta quantidade de partículas muito finas (tipicamente 80% menor que $10\ \mu\text{m}$) e a presença de óxidos de ferro, alumínio, sílica, dentre outros. As Tabelas 3 e 4 apresentam as composições química e mineralógica do material, respectivamente.

Tabela 3. Faixa de composição química (%) do resíduo de bauxita (componentes principais).

Componente químico	Faixa típica (%)
Fe_2O_3	20 – 45
Al_2O_3	10 – 22
TiO_2	4 – 20
CaO	0 – 14
SiO_2	5 – 30
Na_2O	2 – 8

Fonte: International Aluminium Institute (2015).

Tabela 4. Faixa de composição mineralógica (%) do resíduo de bauxita.

Componente mineralógico	Faixa típica (%)
Sodalita ($3\text{Na}_2\text{O}.3\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{SiO}_2.\text{Na}_2\text{SO}_4$)	4 – 40
Goethita (FeOOH)	10 – 30
Hematita (Fe_2O_3)	10 – 30
Magnetita (Fe_3O_4)	0 – 8
Sílica (SiO_2) cristalina e amorfa	3 – 20
Aluminato de cálcio ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{H}_2\text{O}$)	2 – 20
Boemita (AlOOH)	0 – 20
Dióxido de titânio (TiO_2) Anatásio e Rutilo	2 – 15
Muscovita ($\text{K}_2\text{O}.3\text{Al}_2\text{O}_3.6\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O}$)	0 – 15
Calcita (CaCO_3)	2 – 20
Caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O}$)	0 – 5
Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$)	0 – 5
Perovskita (CaTiO_3)	0 – 12
Cancrinita ($\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}].2\text{CaCO}_3$)	0 – 50
Diásporo (AlOOH)	0 – 5

Fonte: International Aluminium Institute (2015).

A composição do resíduo de bauxita varia de acordo com as variáveis do processo de digestão (Tabela 2). Segundo Wu *et al.* (2022), a cancrinita, por exemplo, formada pela transformação cristalina do hidrato de aluminossilicato de sodalita ($1,08\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,68\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) para cancrinita ($1,3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), tem a taxa de transformação aumentada com o aumento da temperatura e do tempo de digestão.

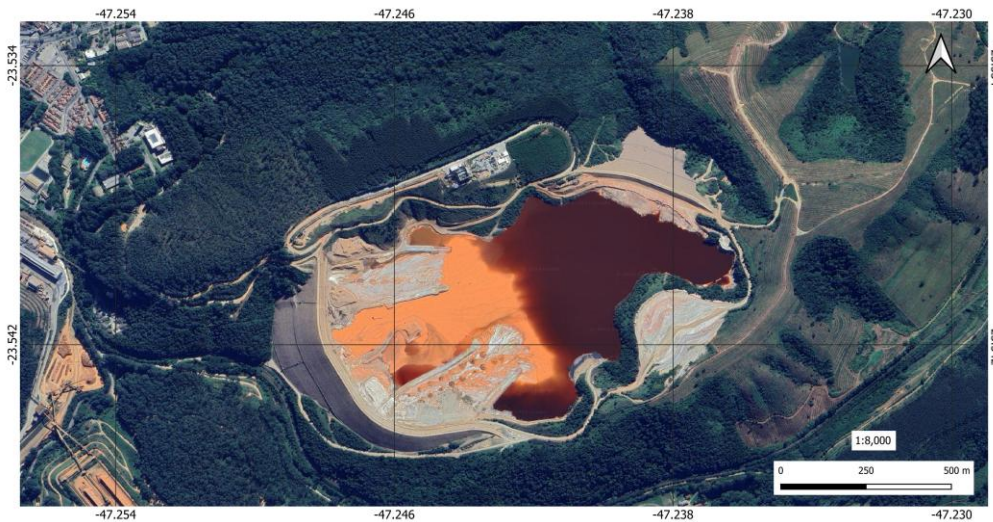
Os demais sólidos como a sodalita, calcita, aluminato de cálcio, whewellita ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e/ou apatita ($\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6(\text{OH})_2$), também são gerados a partir das reações do processo tornando-se parte da mistura de resíduos de bauxita a granel (Gräfe; Power; Klauber, 2011).

Devido ao grande volume gerado e às características físico-químicas do resíduo, o seu gerenciamento deve ser muito bem controlado, o que torna o processo complexo e desafiador para as indústrias de alumínio (Evans, 2016; Power; Gräfe; Klauber, 2011). Existem, basicamente, três formas de disposição do resíduo de bauxita: barragens, empilhamento a seco e disposição seca.

A escolha do método varia globalmente dependendo da disponibilidade de terras, da disponibilidade de tecnologia, das condições climáticas e geográficas, da logística, dos requisitos regulatórios e da tixotropia apresentada pelo resíduo (comportamento como sólido ou líquido) (International Aluminium Institute, [s. d.]; Seno Junior, 2023). A seguir, os métodos de disposição são apresentados em detalhes de acordo com o descrito por International Aluminium Institute (2015):

- Barragem: O resíduo é bombeado para lagoas terrestres, onde camadas naturalmente impermeáveis ou selantes minimizam a infiltração (Figura 4). O resíduo é normalmente depositado como uma lama diluída. Os sólidos são sedimentados e água superficial é coletada para retornar ao processo de refino.

Figura 4. Barragem para armazenamento do resíduo de bauxita, localizada no Brasil.



Fonte: Autoria própria.

- Empilhamento a seco: O resíduo é espessado até formar uma pasta de alta densidade e seco antes da deposição de camadas sucessivas (Figura 5). É formada uma rampa, permitindo o escoamento da água da chuva e minimizando o líquido armazenado na área de disposição, o que reduz o risco de vazamentos e melhora a integridade estrutural. A água recuperada da superfície é bombeada de volta para a planta para recuperar e reciclar os sais de sódio solúveis. O resíduo seco empilhado é frequentemente subdrenado para melhorar a consolidação do resíduo e recuperar a água para reuso na refinaria.

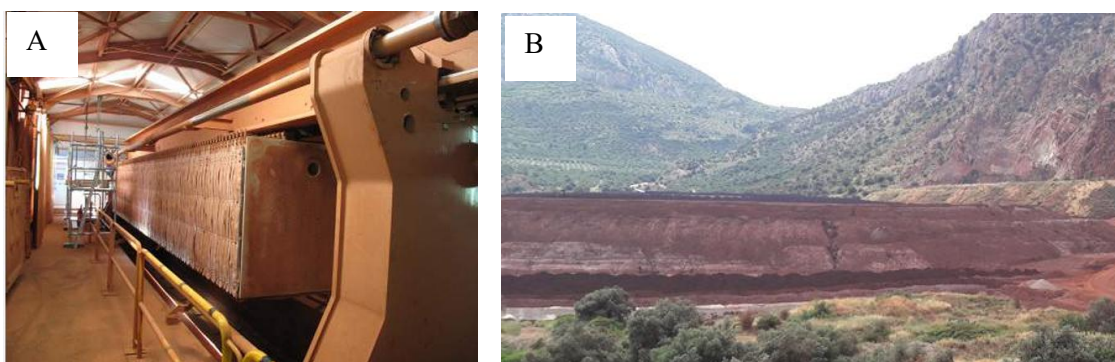
Figura 5. Resíduo de bauxita estocado pelo método de empilhamento a seco, na Irlanda.



Fonte: International Aluminium Institute (2015).

- Disposição seca: Após a lavagem, o resíduo é filtrado para produzir uma massa seca. Filtros de tambor são utilizados para esse fim desde a década de 1930, mas atualmente há um uso crescente de filtros prensa, capazes de atingir de 70% a 75% de sólidos (Figura 6A). O material residual seco é transportado para o local de armazenamento e armazenado sem tratamento adicional (Figura 6B). Esse método reduz a área necessária para armazenamento e o risco de vazamento de águas subterrâneas. Os custos de reabilitação e fechamento são significativamente reduzidos, e o material se torna mais facilmente utilizável.

Figura 6. A) Filtro prensa. B) Resíduo de bauxita estocado pelo método de disposição seca.



Fonte: International Aluminium Institute (2015); Seno Junior (2023).

2.1.3. Desafios e possibilidades para o resíduo de bauxita

As características do resíduo de bauxita se tornam desafios para a sustentabilidade do seu gerenciamento a longo prazo. No entanto, estudos indicam que existe um interesse crescente no desenvolvimento de tecnologias para a utilização desse material (Seno Junior, 2023).

Projetos na Índia, Austrália, Irlanda e Jamaica estão focados em biorremediação, visando converter resíduos de bauxita em um solo bem estruturado por meio de tratamento químico e físico a partir da redução do pH (International Aluminium Institute, [s. d.]). Os métodos para reduzir o pH incluem carbonatação, lavagem com água do mar e adição de gesso e adubo mineral (ou bitterns).

São analisadas, também, outras formas de aplicação e utilização do resíduo como: viabilidade de recuperação de metais e demais componentes valiosos do resíduo de bauxita (Jayasankar *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2018); fabricação de materiais de construção como geopolímeros, tijolos e concreto (Bin *et al.*, 2020; Mucsi *et al.*, 2019; Wang,

Y. *et al.*, 2019); tratamento de efluentes líquidos (Lyu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2005). Destacam-se os estudos sobre a inserção do resíduo na indústria cimenteira, como componente do clínquer (Ortega *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; Wang, Y. *et al.*, 2019) sendo o grande foco até então (Seno Junior, 2023).

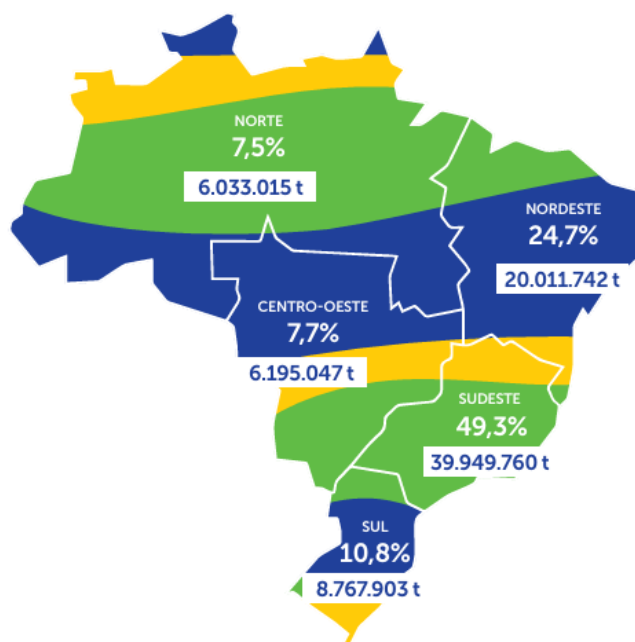
Essas diferentes abordagens evidenciam o potencial de valorização do resíduo de bauxita em aplicações diversas. Os estudos voltados à incorporação do resíduo na indústria cimenteira ganham destaque como uma das alternativas mais promissoras, tanto pela capacidade de absorção de grandes volumes quanto pela sinergia com os processos já existentes. No entanto, entende-se que são necessários esforços para acelerar a adoção de algumas dessas aplicações. Para isso, a indústria da alumina deve considerar o trabalho conjunto com outras empresas ou institutos de pesquisa, possivelmente com apoio governamental (International Aluminium Institute, [s. d.]). Essas ações contribuem com a sustentabilidade industrial da produção de alumina/alumínio.

2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são materiais gerados pela população habitante dos centros urbanos. Neles se enquadram os resíduos domiciliares, provenientes das atividades domésticas, e os resíduos de limpeza urbana, originários da varrição e limpeza de logradouros (Brasil, 2010).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), 2024), há uma estimativa de que, em 2023, o Brasil tenha gerado aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU, o que equivale a mais de 221 mil toneladas de resíduos geradas todos os dias, ou cerca de 382 kg de RSU por habitante durante o ano. Na Figura 7 são observadas as contribuições de cada região no país nesse montante.

Figura 7. Participação regional na geração brasileira de RSU em 2023.



Fonte: ABREMA (2024).

A região Sudeste, com maior densidade populacional, é a principal responsável pela geração de resíduos, representando aproximadamente 50% da geração nacional. Ressalta-se que, para essa região, houve um crescimento de 0,9% em relação a 2022, equivalente à geração de 1,237 kg de RSU por habitante por dia (kg/hab/dia) (ABREMA, 2024).

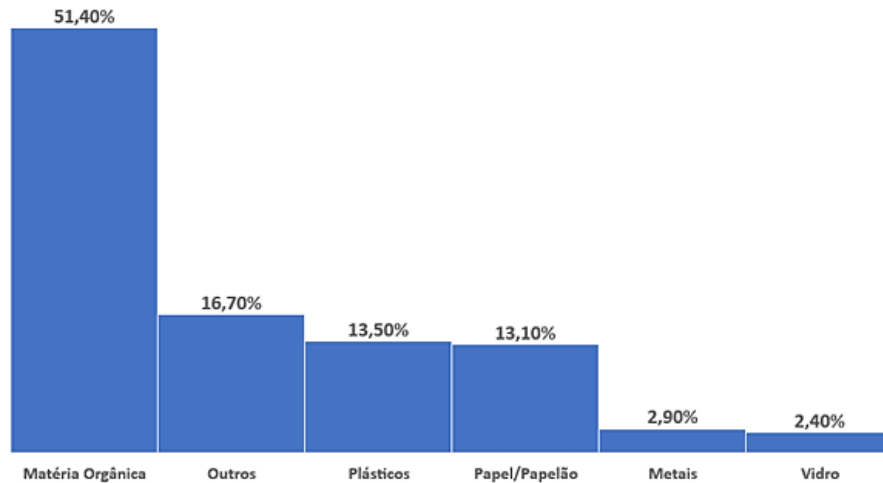
Observa-se que os RSU são gerados em larga escala e acompanham o crescimento populacional e as alterações nos padrões de consumo (Białowiec; Micuda; Koziel, 2018). Aspectos que envolvem desde a coleta até a disposição final ambientalmente adequada muitas vezes são ineficientes, fazendo com que os RSU sejam frequentemente relacionados a problemas ambientais e sociais. Nesse sentido, o gerenciamento adequado desses materiais torna-se um importante desafio para os municípios (Gałko *et al.*, 2023).

Dados de coleta dos RSU em 2023 no Brasil mostram resultados importantes: houve aumento de cerca de 0,4% do volume coletado em relação à 2022, equivalente a 75,6 milhões de toneladas (ABREMA, 2024). Ainda segundo a fonte, a coleta dos RSU foi feita de forma majoritária pelos serviços públicos (87,8%), seguida pela coleta informal (5,6%). No entanto, 5.377.768 toneladas não foram coletadas, representando problemas de gestão.

A composição do RSU é variada, como pode ser observado na Figura 8. Essa característica propicia diversas rotas para gestão e gerenciamento dos materiais presentes, respeitando a ordem de prioridade descrita na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

(Lei Nº 12.305) (2010): não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

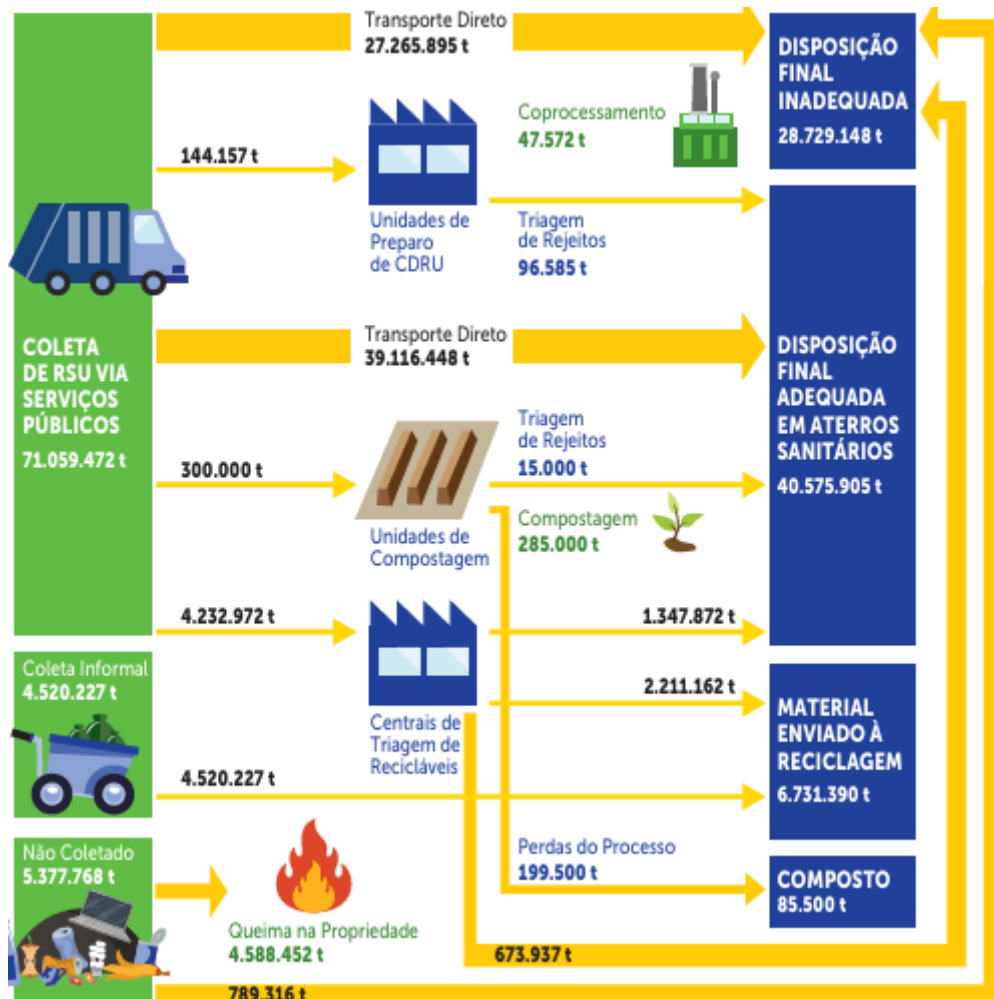
Figura 8. Composição gravimétrica média de RSU no Brasil.



Fonte: ABRELPE (2020) apud Seno Júnior (2023).

Nos últimos anos, o Brasil vem passando por uma fase de transição, almejando alcançar um modelo mais sustentável para o gerenciamento dos RSU. Nesse sentido, vem sendo incorporadas outras formas de aproveitamentos e/ou utilização desses materiais, além dos descritos na PNRS. Dentre essas, destacam-se as iniciativas para a reciclagem de resíduos orgânicos e para o aproveitamento energético, na forma de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), biogás e biometano (ABREMA, 2024). A Figura 9 apresenta um diagrama do fluxo do RSU no Brasil, com a indicação das rotas e volumes.

Figura 9. Fluxo de RSU no Brasil em 2023.



Fonte: ABREMA (2024).

Grande parte dos resíduos descritos (coletados via serviços públicos e informalmente e não coletados) ainda têm disposição final inadequada (aproximadamente 35%) e uma outra grande parte é destinada à aterros sanitários (aproximadamente 50%). O aproveitamento realizado no RSU ocorreu em apenas 8,47% do montante gerado, sob a forma de coprocessamento, reciclagem e composto.

2.2.1. Aproveitamento energético dos RSU

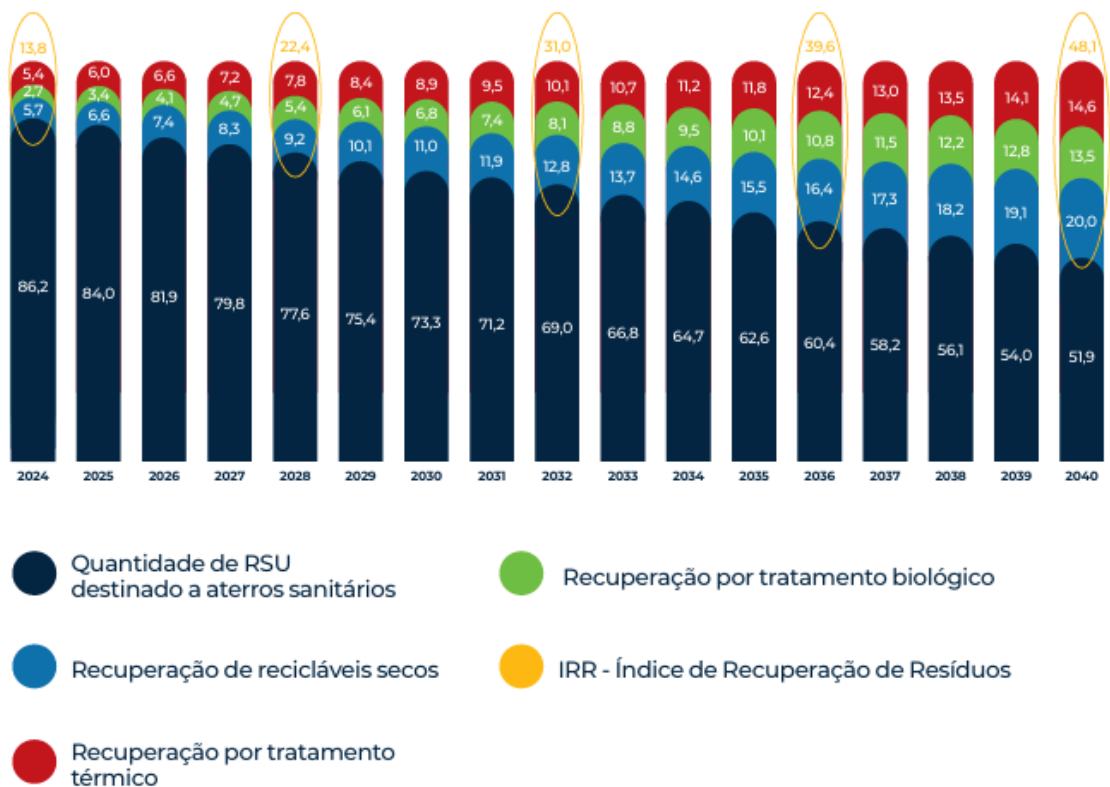
A demanda energética mundial cresce a cada ano, acompanhando o aumento populacional, e a transição energética torna-se um assunto cada vez mais recorrente (International Energy Agency, 2023). A utilização de RSU para geração de energia colabora com essa temática, no sentido de substituir combustíveis fósseis e reduzir as emissões de

gases do efeito estufa (GEE) além de ser uma opção para a gestão integrada de resíduos (Herrador; Van, 2024; Manninen *et al.*, 1996; Vounatsos *et al.*, 2015).

O uso energético do RSU é um tópico amplamente explorado em outras partes do mundo, como Europa e Ásia (Dong *et al.*, 2018; Khan; Chowdhury; Techato, 2022) tendo um papel importante na sustentabilidade dos resíduos. No Brasil, no entanto, o tema é novo, demonstrando tímidos avanços ao longo dos anos.

Como forma de modernizar o sistema de gestão dos RSU no Brasil, foi instituído em 2022 o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), instrumento descrito na PNRS. Este documento apresenta metas para destinação final dos RSU, incluindo a recuperação e aproveitamento energético por tratamento térmico, com o horizonte de 2024 até 2040 (Figura 10).

Figura 10. Metas do PLANARES por tipo de destinação final de RSU (%).



Fonte: ABRELPE (2022).

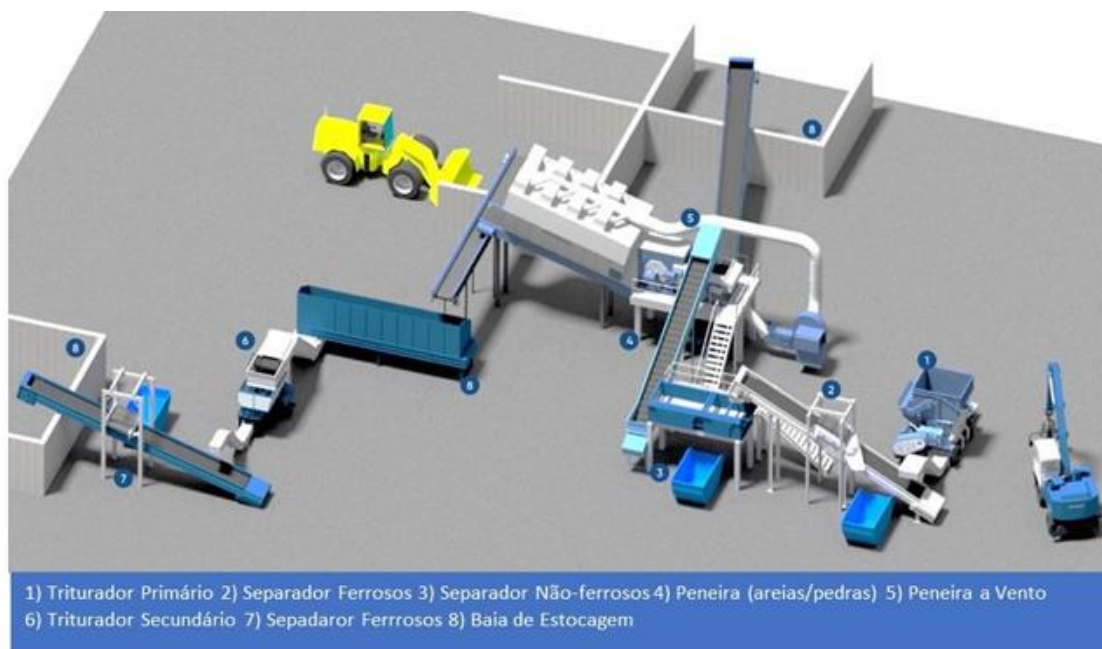
O aproveitamento energético dos resíduos sólidos em geral é possível principalmente à fração de plásticos, uma vez que são materiais que apresentam alto poder calorífico (Bluhm-Drenhaus *et al.*, 2012; Gałko *et al.*, 2023; Grammelis *et al.*, 2009). É importante ressaltar que

o uso energético dos resíduos não compete com estratégias de redução, reutilização e reciclagem, respeitando a “hierarquia dos resíduos” (Atstaja *et al.*, 2024; Sarc; Lorber, 2013).

Três tipos de processos podem ser usados para a conversão energética de resíduos: termoquímico, bioquímico e químico (Khan; Chowdhury; Techato, 2022). Dentro dos processos termoquímicos está inserido o Combustível Derivado de Resíduos (CDR). O CDR é um material proveniente do processo de reciclagem caracterizando-se como “qualquer material que tenha algum poder calorífico e tenha passado por processamento prévio” (Nasiri; Hajinezhad; Kianmehr, 2023; Sarc; Lorber, 2013; Wijaya *et al.*, 2023). Ressalta-se que outros tipos de resíduos também podem ser utilizados como CDR, não apenas o RSU. Como exemplo têm-se os Resíduos Sólidos Industriais não perigosos.

A produção do CDR consiste em um processo de triagem dos resíduos, em que são selecionados os materiais com maior poder calorífico, seguido de trituração, para que as características físicas do material se tornem adequadas para seu uso como combustível (ABREMA, 2024). Na Figura 11 é possível visualizar as etapas do processo de produção do CDR.

Figura 11. Fluxograma simplificado do processo de produção de CDR.



Fonte: Andritz (2022) apud Seno Júnior (2023).

O uso do CDR no Brasil está mais relacionado à indústria do cimento devido à sua grande demanda por combustíveis. O início da utilização do CDR no país é datado em 2018, a partir da iniciativa do grupo Votorantim em inserir o combustível em uma planta de produção

de cimento no estado de São Paulo (Votorantim Cimentos, 2019). Entende-se que, devido ao aumento das preocupações ambientais, a aderência ao uso de combustíveis alternativos vem se fortalecendo nas cimenteiras ao longo dos anos.

Dados apresentados no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABREMA, 2024), indicam que aproximadamente 47,6 mil toneladas de CDR proveniente dos RSU tenham sido produzidas no país em 2023. Ainda, considerando que cada tonelada de RSU recebida em unidades de preparo, resulta em média 330 kg de CDR, levando em consideração o índice de aproveitamento de 33%, estima-se que, em 2023, 144,2 mil toneladas de RSU tenham sido encaminhadas a unidades de preparo de CDR no Brasil, o que representa menos de 0,2% do total de RSU gerados no país.

2.3. INDÚSTRIA CIMENTEIRA

A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos e o grande passo no seu desenvolvimento deu-se em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos (Associação Brasileira de Cimento Portland, [s. d.]). Ainda segundo a fonte, em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin obtendo uma mistura que, após secar, tornou-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções e não se dissolvia em água, patenteou-a como cimento Portland, nome escolhido por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

Atualmente, o cimento é a principal matéria-prima de produtos como argamassas, concretos, artefatos de concreto, telhas de concreto ou fibrocimento, sendo produzido mundialmente em larga escala (Verdiani *et al.*, 2025). Dentre os 10 maiores produtores globais de cimento, a China aparece na primeira posição, seguido de Índia e Vietnã, e o Brasil ocupa o 7º lugar, sendo o 1º da América Latina (produção de 63 Mt em 2023) (Statista, 2024).

2.3.1. Produção do cimento

Para a produção do cimento é necessária a extração de calcário e argila, que são as duas matérias primas principais para a fabricação do clínquer (Verdiani *et al.*, 2025). Outros materiais como minério de ferro e areia também são utilizados como agentes de correção

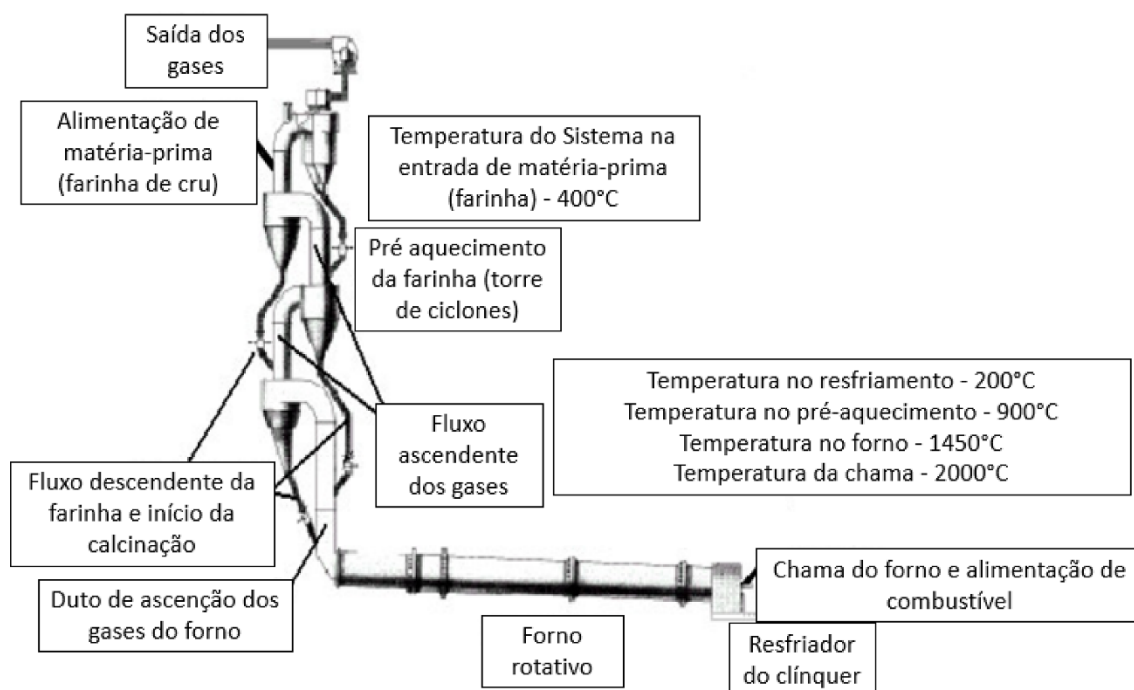
(Molin Filho, 2020; Verdiani *et al.*, 2025). Esses minérios são devidamente dosados nas proporções exatas, quando então são moídos e homogeneizados até resultar em um material fino e de concentrações homogêneas, denominado farinha (Confederação Nacional da Indústria, 2012).

Para o controle da farinha produzida e, sucessivamente, o controle da produção do clínquer, a mesma deve ser monitorada por meio do módulo de clínquer, levando em consideração o fator de saturação de cálcio (FSC), módulo de sílica (MS) e o módulo de alumina (MA) (Young; Yang, 2019). Esses módulos são cálculos que levam em consideração os teores de cálcio, silício, alumínio e ferro da mistura.

O processo de produção do clínquer e, posteriormente, do cimento ocorre a partir da queima da farinha crua, podendo ser dividido em 4 etapas: pré-aquecimento, calcinação, clinquerização e resfriamento. Após o resfriamento, o clínquer resultante é moído para a formação de um pó fino, o cimento.

De acordo com Molin Filho (2020), a farinha crua entra pela torre de ciclones trocando calor em contracorrente com os gases que sobem do forno, e vão avançando de estágios até entrarem no forno. Esta é a etapa de pré-aquecimento. Ainda segundo o autor, dentro do forno a farinha se transforma em fase líquida e posteriormente, forma os nódulos de clínquer, que devem ser resfriados rapidamente e armazenados em silos. A Figura 12 apresenta um modelo esquemático destacando cada etapa do processo de transformação da farinha crua em clínquer.

Figura 12. Modelo esquemático da etapa de transformação da farinha crua em clínquer.



Fonte: Adaptado de Mantegazza (2004) *apud* Verdiani *et al.* (2025).

De maneira geral o clínquer pode conter alguns óxidos em sua composição como, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO , SO_3 , devido ao seu processo de produção, que envolve a descarbonatação da farinha (Young; Yang, 2019). No processo de clinquerização, a farinha crua passa por transformações químicas, formando as quatro principais fases do clínquer: silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), ou Belita (C_2S), e silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), ou Alita (C_3S), em maiores quantidades (aproximadamente 80%); e aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), ou Aluminato (C_3A), e ferro-aluminato tetracálcico ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$), ou Ferrita (C_4AF), em menores quantidades (aproximadamente 20%) (Molin Filho, 2020; Verdiani *et al.*, 2025).

Em relação as características do cimento, entende-se que a função da Alita é de dar a resistência inicial do cimento, a da Belita é de produzir uma resistência mecânica mais lenta (após o período de 28 dias de utilização), a do Aluminato é de garantir a pega do cimento, hidratando-o mais facilmente, e a Ferrita é responsável pela resistência à corrosão química (Harrisson, 2019; Ma; Li; Shen, 2019).

2.3.2. Coprocessamento

O processo de produção do cimento demanda de uma grande quantidade de energia. A maior parte da energia térmica consumida está no processo de clinquerização (Verdiani *et al.*,

2025). Os tipos mais comuns de combustíveis utilizados em fornos de cimento para a produção de clínquer são óleos e carvões (Strother, 2019). No entanto, devido à preocupação com a escassez dos combustíveis fósseis e o aumento dos preços, novas alternativas de combustíveis estão sendo avaliadas, para a substituição parcial e, futuramente, completa (Molin Filho, 2020).

Visto isso, surge o “coprocessamento”: uma tecnologia de destinação sustentável, que consiste no reaproveitamento dos mais variados tipos de resíduos e origens, contribuindo para a preservação de recursos naturais, por substituir matérias-primas e combustíveis fósseis tradicionais utilizados no processo de fabricação do cimento (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023). Dentre os resíduos utilizados no coprocessamento estão as biomassas e resíduos sólidos urbanos em geral como pneus, lodo de esgoto, dentre outros (Figura 13).

Figura 13. Fontes e tipos de resíduos possíveis de serem destinados às cimenteiras.



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2023).

Os fornos de clínquer reúnem as condições adequadas para a destruição desses materiais. Nesse sentido, o coprocessamento apresenta vantagens que abrangem os três pilares da sustentabilidade. No pilar econômico é possível citar a redução de custos de energia térmica e aumento da vida útil de aterros; no pilar social tem-se a geração de empregos diretos e indiretos além da erradicação dos lixões; por fim, no pilar ambiental cita-se a diminuição no consumo de recursos não renováveis, a redução de gases do efeito estufa, a preservação de recursos naturais e o impulsionamento de outras tecnologias (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023; Molin Filho, 2020).

Ao realizar o coprocessamento, alguns aspectos relacionados às características físico-químicas dos materiais e os parâmetros do processo devem ser observados. No caso das biomassas, por exemplo, fatores como o baixo poder calorífico, umidade, transporte, manuseio e armazenamento podem ser desvantagens (Molin Filho, 2020; Nakashima, 2016).

Apesar disso, a prática de transformar resíduos em energia nas cimenteiras do Brasil vem avançando ao longo dos anos. Em 2022, 3,035 milhões de toneladas de resíduos foram coprocessados (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023). Ainda segundo a fonte, as biomassas lideram como fonte energética, seguidas pelos combustíveis alternativos que incluem os pneus, em maiores quantidades, e o CDR em menores quantidades. A utilização de resíduos na indústria cimenteira não se limita aos combustíveis. Resíduos como solos contaminados, areia de fundição, resíduos da indústria de alumínio e outros também são incorporados no processo como matéria-prima alternativa.

A utilização dos fornos de cimento para queimar resíduos tem dado à indústria cimenteira um novo e relevante papel no âmbito da promoção da sustentabilidade e do equilíbrio ambiental (Confederação Nacional da Indústria, 2012). Ainda, o coprocessamento representa, em muitos casos, a solução mais eficiente e econômica para a gestão de resíduos, sem representar risco à qualidade do cimento Portland e ao meio ambiente.

2.4. MATERIAIS COMPÓSITOS

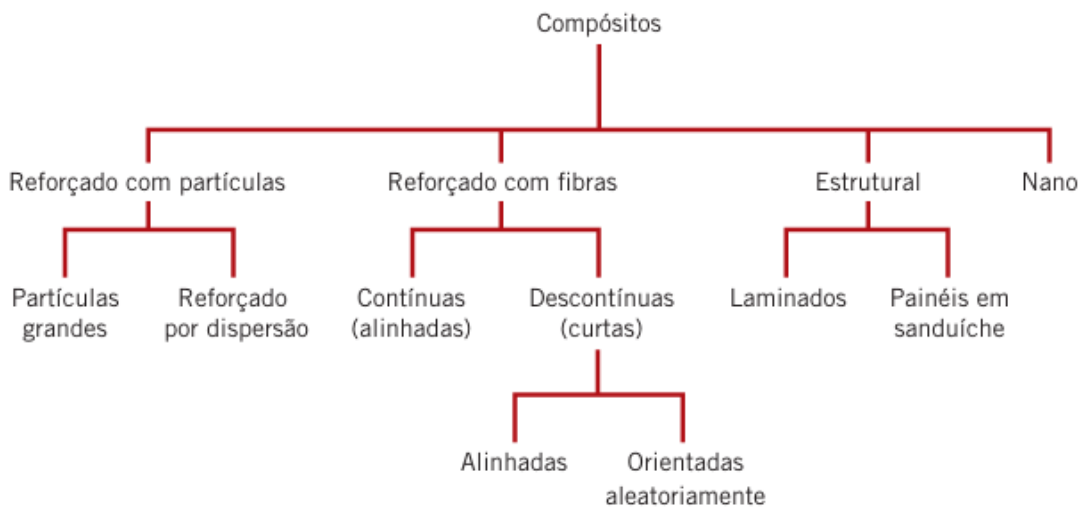
O termo *compósito* diz respeito a um material que possui duas ou mais fases distintas, sendo uma delas contínua, denominada matriz, e a outra dispersa, frequentemente chamada de reforço (Callister Junior, 2016). Embora os materiais multifásicos já estivessem presentes, tanto na natureza (ex.: madeiras) quanto os produzidos pelo homem (ex.: aço), o surgimento do termo compósito deu-se no século XX com a fabricação de materiais projetados e

engenheirados, como os polímeros reforçados com fibras de vidro (Anstey *et al.*, 2021; Saqib *et al.*, 2023).

O interesse na criação de materiais compósitos pelo homem foi cada vez mais intensificado, motivado pelo desenvolvimento industrial e pela busca por materiais versáteis e diversos. A produção de um material compósito visa unir as melhores características dos materiais para a criação de um novo material com propriedades otimizadas (Talgatti *et al.*, 2017). Este é o entendimento do princípio da ação combinada, descrita por Callister Junior (2016) em que melhores combinações de propriedades são obtidas por uma combinação adequada de dois ou mais materiais distintos.

A Figura 14 apresenta um esquema simples para classificação dos materiais compósitos. Observa-se que a fase reforço pode ocorrer em forma de fibras e partículas de diversos tamanhos.

Figura 14. Esquema de classificação para vários tipos de compósitos.



Fonte: Callister Junior (2016).

Um exemplo de compósito de partículas grandes é o concreto, consistindo em um agregado de partículas ligadas umas às outras pelo cimento. No caso do concreto de cimento Portland, o agregado consiste em areia e brita; a ligação de cimentação desenvolve-se como resultado de reações químicas entre o cimento Portland e a água (Callister Junior, 2016). Nesse caso, almejando maiores resistências mecânicas, pode-se inserir barras de aço, arames etc., no concreto fresco. Os reforços por dispersão (partículas menores) e por fibras são escolhidos, principalmente, nos casos em que se deseja maiores resistência mecânicas da matriz em que são inseridos.

As três classes de materiais são utilizadas como matriz: polímeros, metais e cerâmicas, sendo os compósitos com matriz polimérica os mais comuns. Dentre as funções da fase matriz está a união e a proteção do reforço.

Para um material ser considerado um compósito é necessário atender aos seguintes critérios: 1) os componentes devem estar presentes em proporções razoáveis, ou seja, superior a 5%; 2) as fases constituintes devem ter diferentes propriedades e, portanto, as propriedades do compósito são sensivelmente diferentes das propriedades dos constituintes; 3) o compósito é produzido por misturas e combinações dos componentes por diversos meios (Matthews e Rawlings, 1994 apud Lopes, 2017).

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 22 maio 2022.
- ANSTEY, A. *et al.* Nanofibrillated polymer systems: Design, application, and current state of the art. **Progress in Polymer Science**, [s. l.], v. 113, p. 101346, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670020301398>.
- ÂRIÑA, D. *et al.* Characterization of Refuse Derived Fuel Production from Municipal Solid Waste: The Case Studies in Latvia and Lithuania. **Environmental and Climate Technologies**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 112–118, 2020. Disponível em: <https://www.sciendo.com/article/10.2478/rtuct-2020-0090>. Acesso em: 15 set. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Panorama do Coprocessamento 2023 (Ano base 2022)**. São Paulo: [s. n.], 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uma breve história do cimento Portland**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. [S. l.: s. n.], 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>. Acesso em: 8 fev. 2025.
- ATSTAJA, D. *et al.* Waste-to-Energy in the Circular Economy Transition and Development of Resource-Efficient Business Models. **Energies**, [s. l.], v. 17, n. 16, p. 4188, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/4188>.
- BIAŁOWIEC, A.; MICUDA, M.; KOZIEL, J. Waste to Carbon: Densification of Torrefied Refuse-Derived Fuel. **Energies**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 3233, 2018. Disponível em:

<http://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3233>.

BIN, W. *et al.* Influence of Red Mud Proportion on Circular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2020, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2020/8578059/>.

BLUHM-DRENHAUS, T. *et al.* A model for the devolatilisation of large thermoplastic particles under co-firing conditions. **Fuel**, [s. l.], v. 101, p. 161–170, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236112003985>.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. New York: J. Wiley, 192 p., 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento**. Brasília: [s. n.], 2012.

DONG, J. *et al.* Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 203, p. 287–300, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618324831>.

EVANS, K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 316–331, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40831-016-0060-x>.

GALEVSKY, G. V; RUDNEVA, V. V; ALEKSANDROV, V. S. Current state of the world and domestic aluminium production and consumption. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 411, p. 012017, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/411/1/012017>.

GAŁKO, G. *et al.* Evaluation of alternative refuse-derived fuel use as a valuable resource in various valorised applications. **Energy**, [s. l.], v. 263, p. 125920, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544222028067>.

GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 60–79, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.004>.

GRAMMELIS, P. *et al.* Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of waste recovered fuels. **Fuel**, [s. l.], v. 88, n. 1, p. 195–205, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236108000471>.

HABASHI F. Alumina Production and the Textile Industry. **Journal of Textile Science & Engineering**, [s. l.], v. 07, n. 06, 2017. Disponível em: <https://www.omicsonline.org/open-access/alumina-production-and-the-textile-industry-2165-8064-1000327-97352.html>.

HARRISSON, A. M. Constitution and Specification of Portland Cement. *In*: LEA'S

CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRETE. [S. l.: s. n.], 2019. p. 87–155.

HERRADOR, M.; VAN, M. L. Circular economy strategies in the ASEAN region: A comparative study. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 908, p. 168280, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969723069073>.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: A review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 146, n. 1–3, p. 359–374, 1999.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Bauxite Residue Management: Best Practice**. [S. l.: s. n.], 2015.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Mining and refining**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://thealuminiumstory.com/mining-refining/bauxite-residue-management/>.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Primary Aluminium Production**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/?publication=primary-aluminium-production&filter=%7B%22row%22%3A85%2C%22group%22%3Anull%2C%22multiGroup%22%3A%5B%5D%2C%22dateRange%22%3A%22monthly%22%2C%22monthFrom%22%3A3%2C%22mo.>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. [S. l.: s. n.], 2023.

JAYASANKAR, K. *et al.* Production of pig iron from red mud waste fines using thermal plasma technology. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, [s. l.], v. 19, n. 8, p. 679–684, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12613-012-0613-3>.

KHAN, I.; CHOWDHURY, S.; TECHATO, K. Waste to Energy in Developing Countries—A Rapid Review: Opportunities, Challenges, and Policies in Selected Countries of Sub-Saharan Africa and South Asia towards Sustainability. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 3740, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/3740>.

KOLBEINSEN, L. The beginning and the end of the aluminium value chain. **Matériaux & Techniques**, [s. l.], v. 108, n. 5–6, p. 506, 2020. Disponível em: <https://www.mattech-journal.org/10.1051/mattech/2021008>.

LOPES, B. L. S. Materiais compósitos. In: POLÍMEROS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS: UM RESUMO SOBRE ESSES COMPÓSITOS. [S. l.: s. n.], 2017. p. 11–36.

LYU, F. *et al.* Efficient removal of Pb(II) ions from aqueous solution by modified red mud. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 406, p. 124678, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389420326686>.

MA, S.; LI, W.; SHEN, X. Study on the physical and chemical properties of Portland cement with THEED. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 213, p. 617–626, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819305914>.

MANNINEN, H. *et al.* Trace metal emissions from co-combustion of refuse derived and packaging derived fuels in a circulating fluidized bed boiler. **Chemosphere**, [s. l.], v. 32, n. 12, p. 2457–2469, 1996. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0045653596001464>.

MOLIN FILHO, R. A. D. **Viabilidade de queima de casca de eucalipto em fornos de cimento**. 2020. 80 f. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2020.

MUCSI, G. *et al.* Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolymers. **Rudarsko-geološko-naftni zbornik**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 27–36, 2019. Disponível em: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=315598.

NAKASHIMA, G. T. **Use of sugarcane trash for solid biofuel production: physicochemical characterization and influence of storage time**. 2016. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2016.

NASIRI, S.; HAJINEZHAD, A.; KIANMEHR, M. H. Increasing the efficiency of municipal solid waste energy by investigating the effect of die temperature and retention time on the produced pellets: A case study of Kahrizak, Iran. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 173, p. 131–142, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582023002094>.

ORTEGA, J. *et al.* Effects of Red Mud Addition in the Microstructure, Durability and Mechanical Performance of Cement Mortars. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 984, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/984>.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 33–45, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X11000454>.

SAQIB, M. *et al.* Graphene derivatives-based electrodes for the electrochemical determination of carbamate pesticides in food products: A review. **Analytica Chimica Acta**, [s. l.], v. 1272, p. 341449, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003267023006700>.

SARC, R.; LORBER, K. E. Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). **Waste Management**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 1825–1834, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X13002134>.

SENO JUNIOR, R. **Neutralização da alcalinidade de resíduo de bauxita por pirólise sinérgica com produtos provenientes de resíduos sólidos urbano**. 2023. 78 f. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2023.

STATISTA. **Major countries in worldwide cement production in 2024**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/#:~:text=China produces the most cement globally by a,a distant 370 million metric tons in 2022.> .

STROTHER, P. D. Manufacture of Portland Cement. *In*: LEA'S CHEMISTRY OF CEMENT

AND CONCRETE. 5. ed. [S. l.: s. n.], 2019. p. 31–56.

TALGATTI, M. *et al.* Wood-plastic composites from residues of three forest species. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 37, n. 91, p. 277, 2017.

VERDIANI, V. B. *et al.* Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no Brasil. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 25, 2025. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212025000100241&tlng=pt.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Resíduos urbanos como fonte de energia para nossas fábricas**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/residuos-urbanos-como-fonte-de-energia-para-nossas-fabricas/>. .

VOUNATSOS, P. *et al.* Refuse-derived fuel classification in a mechanical–biological treatment plant and its valorization with techno-economic criteria. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1137–1146, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13762-014-0509-z>.

WANG, L. *et al.* A Review on Comprehensive Utilization of Red Mud and Prospect Analysis. **Minerals**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 362, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/6/362>.

WANG, S. *et al.* Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. **Water Research**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 129–138, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135404004592>.

WANG, X. *et al.* The Effect of Red Mud on Sintering Processes and Minerals of Portland Cement for Roads. **Crystals**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1267, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/10/1267>.

WANG, Y. *et al.* Transformation and Characterization of Cement Clinker Prepared from New Structured Red Mud by Sintering. **JOM**, [s. l.], v. 71, n. 8, p. 2505–2512, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11837-019-03475-y>.

WIJAYA, I. M. *et al.* Refuse Derived Fuel Potential Production from Temple Waste as Energy Alternative Resource in Bali Island. **Journal of Ecological Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 288–296, 2023. Disponível em: <http://www.jeeng.net/Refuse-Derived-Fuel-Potential-Production-from-Temple-Waste-as-Energy-Alternative,161015,0,2.html>.

WU, Z. *et al.* Reaction behavior of quartz in gibbsite-boehmite bauxite in Bayer digestion and its effect on caustic consumption and alumina recovery. **Ceramics International**, [s. l.], v. 48, n. 13, p. 18676–18686, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884222009324>.

YOUNG, G.; YANG, M. Preparation and characterization of Portland cement clinker from iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 197, p. 152–156, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181832926X>.

ZHANG, N. *et al.* Early-age characteristics of red mud–coal gangue cementitious material.

Journal of Hazardous Materials, [s. l.], v. 167, n. 1–3, p. 927–932, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409001150>.

ZHANG, N. *et al.* Electron probe microanalysis for revealing occurrence mode of scandium in Bayer red mud. **Rare Metals**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 295–303, 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12598-017-0893-x>.

ZHOU, K. *et al.* Enhanced selective leaching of scandium from red mud. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 182, p. 57–63, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X18302032>.

3. CAPÍTULO 2: APLICAÇÕES E TECNOLOGIAS ASSOCIADAS AO RESÍDUO DE BAUXITA NO BRASIL E NO MUNDO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Resumo

Este trabalho de revisão teve como objetivo obter informações quantitativas e qualitativas a respeito da utilização do resíduo de bauxita no Brasil e no mundo. Foi realizada uma busca sistematizada dos trabalhos utilizando as palavras-chave (“Bauxite residue” or “Red mud”) AND (reuse OR valorization OR utilization OR cement OR concrete OR geopolymers OR adsorbent) na plataforma Wef of Science, dentro do período de 30 anos (1995 – 2024). Foram elegíveis 1.539 artigos para a análise quantitativa e 50 para a análise categórica e descritiva. No cenário mundial, os trabalhos estão distribuídos com crescimento exponencial ao longo do período, com 64,52% concentrados nos últimos cinco anos, demonstrando aumento de interesse no tema. Já no cenário nacional, não houve tendência bem definida e as publicações anuais são datadas a partir de 2010. A China é o país que mais representa o conjunto analisado (810 artigos) enquanto o Brasil posiciona-se em quinto lugar com 61 trabalhos. A categorização dos 50 artigos analisados mostrou que o resíduo de bauxita, majoritariamente, é destinado para a produção de materiais funcionais (adsorventes e catalisadores). Outros usos incluem a produção de cimento, construção civil em geral, aplicação no solo e recuperação de elementos. A grande maioria dos trabalhos está concentrada em escala laboratorial e autores ressaltam a pouca aplicabilidade desses estudos em maiores escalas. Dentre os desafios apontados está a ausência de análise de custo-benefício e inviabilidade técnica. Os dados obtidos nessa pesquisa servirão de embasamento para futuros trabalhos.

Palavras-chave: valorização de resíduos; aplicações industriais; indústria cimenteira; lama vermelha.

3.1. INTRODUÇÃO

A mineração da bauxita para produção de alumínio tem como característica a geração de uma grande quantidade de rejeito, denominado de resíduo de bauxita ou lama vermelha. Cada tonelada de alumina produzida pode gerar de uma a 1,8 toneladas de resíduo de bauxita, a depender das características da bauxita, do modo de produção e do nível de tecnologia (Wang *et al.*, 2021). Esse número se torna ainda mais considerável quando relacionado com a

produção do alumínio metálico, uma vez que são necessárias duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada do material, gerando de duas a três toneladas de resíduo de bauxita.

A produção mundial de alumínio primário alcançou o montante de 6.237 toneladas métricas em março de 2025 tendo a China como principal país produtor (International Aluminium Institute (IAI), 2025). O Brasil se enquadra na oitava posição do *ranking* dos principais produtores (Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), 2024).

Tendo em vista a magnitude dessa indústria e a grande geração de resíduos associada a essa produção, entende-se a necessidade do gerenciamento e controle adequado. Este é considerado o grande desafio para as indústrias uma vez que, além do montante considerável, têm-se as características físico-químicas do resíduo de bauxita, como pH ~ 12 , alta quantidade de partículas muito finas (tipicamente 80% menor que 10 μm) e a presença de óxidos de ferro, alumínio em quantidades significativas além de elementos terras raras (Evans, 2016; Li *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2022).

As formas de destinação para o resíduo de bauxita normalmente estão associadas com a utilização de grandes áreas, altos investimentos, altos níveis de gerenciamento e riscos ambientais e de saúde humana (Evans, 2016; IAI, [s. d.]). A indústria busca possibilidades de aproveitamento do resíduo da bauxita como matéria-prima para outras atividades, podendo-se citar a utilização na indústria de cimento e na indústria cerâmica, para a produção de tijolos e telhas (ABAL, [s. d.]).

Pesquisadores também se interessam na utilização do resíduo de bauxita como tentativa de agregar sustentabilidade ao processo de produção do alumínio. A literatura apresenta estudos sobre a utilização do resíduo desde aplicações mais genéricas como na produção de materiais (Wang *et al.*, 2021), como agente catalizador em processos (Das; Mohanty, 2019) e como adsorvente (Liu *et al.*, 2024) até mais inovadoras como seu uso como aditivo para fluidos de perfuração de petróleo e gás (AlBoraikan; Bageri; Solling, 2023). Porém, não se sabe ao certo da viabilidade dessas aplicações, principalmente em escala industrial.

A revisão da literatura é fundamental no contexto científico pois permite a validação de estudos já realizados e de novos trabalhos que cubram lacunas existentes naquele campo. Este trabalho teve como objetivo obter informações quantitativas e qualitativas relacionadas à utilização do resíduo de bauxita no Brasil e no mundo. Ainda, tentou-se responder às questões: Qual o cenário mundial e nacional de pesquisas sobre o resíduo de bauxita? Em relação a sua utilização, quais áreas têm estudado o material? Quais os desafios encontrados para a sua efetiva utilização? Quais quantidades do material são utilizadas?

3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.2.1. Fundamentação e parâmetros metodológicos

A metodologia adotada neste trabalho envolveu uma abordagem quantitativa com uma análise qualitativa de amostra. A combinação da análise quantitativa e síntese qualitativa é recomendada para revisões cujo objetivo vai além da contagem de publicações, buscando reinterpretações temáticas e mapeamento de abordagens diversas (Galvão; Ricarte, 2019; Siddaway; Wood; Hedges, 2019). Estas revisões foram utilizadas com o intuito de levantar dados sobre a produção de trabalhos sobre o resíduo de bauxita a fim de identificar as principais áreas de uso e possíveis lacunas existentes.

A pesquisa foi realizada a exemplo dos métodos e aspectos teóricos encontrados nos trabalhos de Bardin (1977), Galvão e Ricarte (2019), Siddaway, Wood e Hedges (2019), Silva e Vanalle (2022) e Squarcini, Rocha e Santos (2020). Para auxiliar no processo de escolha dos documentos que seriam objeto de estudo, foi utilizado um método apontado por Bardin (1977) que diz respeito à definição prévia de uma questão norteadora:

- O que está sendo estudado sobre o resíduo de bauxita, especialmente no que diz respeito a aplicações, usos e abordagens tecnológicas?

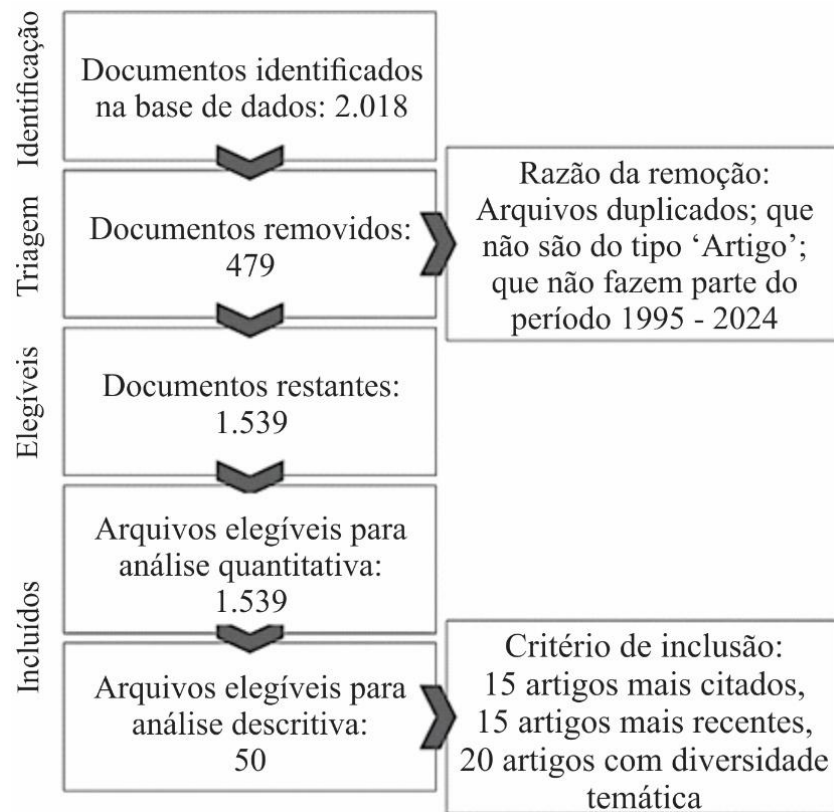
Para a escolha dos arquivos inseridos na pesquisa, foi realizada uma busca sistematizada e utilizados critérios de inclusão e exclusão baseados na Declaração PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Moher et al., 2009). Todas as informações sobre o processo de seleção dos arquivos podem ser visualizadas na Tabela 1 e na Figura 1.

Tabela 1. Critérios para busca sistematizada.

Palavras-chave	Base de dados	Filtros para busca
(“Bauxite residue” or “Red mud”) AND (reuse OR valorization OR utilization OR cement OR concrete OR geopolymer OR adsorbent)	Web of Science	Palavras-chave presentes no título ou no resumo

Fonte: Autoria própria.

Figura 1. Diagrama de fluxo para identificação das etapas da revisão.



Fonte: Autoria própria.

A escolha das palavras-chave é justificada por abrangerem as principais nomenclaturas e os principais termos relacionados ao material e à sua utilização. O período amostrado (1995-2024) foi escolhido por entender que é suficiente para identificar tendências ou padrões em uma determinada área de pesquisa.

3.2.2. Análise dos dados

Com os 1.549 artigos elegíveis para inclusão na revisão, foram obtidas informações quantitativas a respeito do estado atual de pesquisas sobre o resíduo de bauxita no mundo. Para obtenção dos dados da pesquisa nacional, foram selecionados os artigos que tinham afiliação brasileira, encontrando 61 trabalhos.

Os dados obtidos foram avaliados utilizando a ferramenta “Análise de resultados” da Web of Science e por meio da interpretação de redes e grafos gerados pelo software

VOSviewer Versão 1.6.18 (Centre for Science and Technology Studies, 2022). Foram analisadas informações a respeito:

- da concentração de publicações por ano, para verificar a relevância do tema e possíveis tendências ao longo do tempo;
- da concentração de publicações por área de conhecimento, para entender quais áreas se interessam pelo material e com qual finalidade está sendo estudado;
- dos principais periódicos que publicam sobre o resíduo de bauxita e suas respectivas relevâncias na área;
- da concentração de publicações por país e colaborações internacionais (para o cenário mundial).

Para a categorização temática e análise descritiva, foi adotada uma amostragem intencional heterogênea, composta por 50 artigos selecionados com base em critérios múltiplos:

- 15 artigos com maior número de citações (representando o impacto consolidado);
- 15 artigos mais recentes, selecionados com base na ordem cronológica de publicação (visando capturar tendências emergentes),
- 20 artigos escolhidos por diversidade temática, considerando abordagens distintas sobre o uso do resíduo de bauxita, garantindo amplitude da amostra.

A categorização dos trabalhos foi realizada seguindo a metodologia proposta por Carlomagno (2016). A definição das categorias ocorreu por meio de conhecimento prévio do tema sobre potenciais aplicações e de buscas aleatórias por temas no montante de 1.539 artigos. Essa análise foi aplicada para obter um melhor entendimento sobre as áreas em que o resíduo de bauxita está inserido.

A classificação dos trabalhos foi realizada a partir das informações obtidas por meio da leitura dos títulos e resumos dos artigos selecionados. Em casos de dúvidas na categorização com os dados preliminares, todo o artigo foi lido. A Tabela 2 apresenta as categorias aplicadas na análise, as subcategorias e os critérios utilizados para classificação.

Tabela 2. Categorias e subcategorias criadas para a classificação dos artigos.

Categoria	Subcategoria	Critério de inclusão
Produção de materiais	Cimentos e concretos	Uso do resíduo como aditivo, substituto parcial ou total no cimento ou concreto.
	Cerâmicas	Uso do resíduo na formulação de cerâmicas técnicas ou convencionais.
	Compósitos e geopolímeros	Uso do resíduo em matrizes poliméricas, geopoliméricas ou compósitos híbridos.
	Construção civil	Aplicações amplas na construção civil que não se enquadram nas outras subcategorias.
	Materiais funcionais	Materiais avançados a partir do resíduo de bauxita com funções específicas.
Ambiental	Lixiviação e contaminação	Avaliação da liberação de elementos tóxicos do resíduo de bauxita ou de materiais produzidos com ele.
	Avaliação de risco ambiental	Estudos sobre efeitos ecológicos ou toxicológicos, cenários de exposição e impacto potencial.
	Reabilitação de áreas	Uso do resíduo (ou de técnicas associadas) em processos de recuperação ambiental de áreas degradadas.
Agrícola / Solo	-	Aplicações do resíduo em solos, como corretivo, fertilizante ou condicionador de solo.
Recuperação de elementos	-	Artigos que focam na extração ou recuperação de elementos metálicos ou terras raras do resíduo.
Caracterização do resíduo	-	Estudos que investigam propriedades físico-químicas, mineralógicas ou estruturais do resíduo, sem aplicação direta.
Neutralização	-	Artigos que tratam da neutralização do resíduo de bauxita.
Revisões técnico-científicas	-	Artigos de revisão com foco em aspectos técnico-científicos do resíduo de bauxita.

Fonte: Autoria própria.

O trabalho foi dividido em duas partes. A primeira diz respeito à revisão quantitativa, no âmbito mundial e nacional. A segunda parte abrange a análise descritiva e categorização temática.

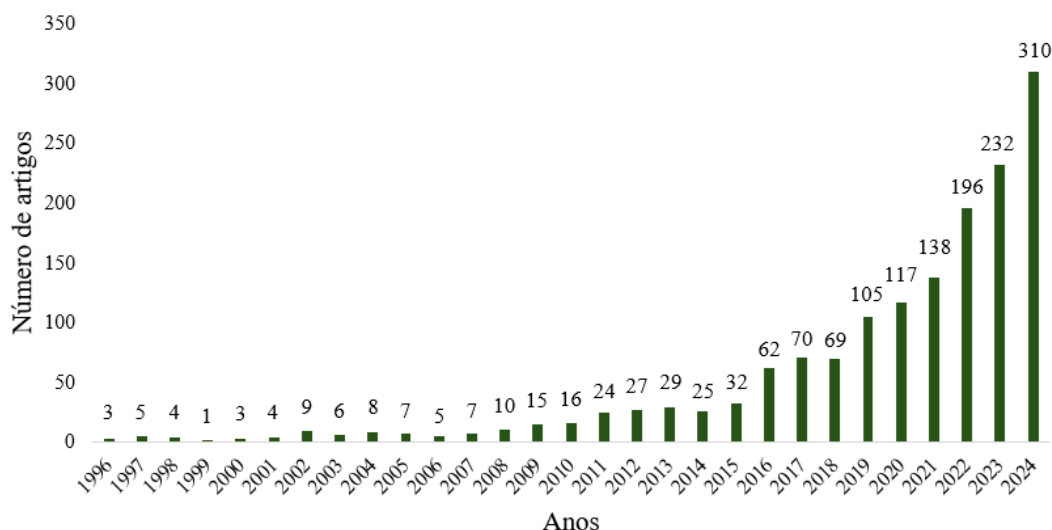
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1. Análise quantitativa

3.3.1.1. Cenário de pesquisas sobre o resíduo de bauxita no mundo

A partir dos 1.539 artigos elegíveis obtidos pela busca sistematizada, foi possível obter informações a respeito das publicações sobre o resíduo de bauxita ao longo do tempo (Figura 2).

Figura 2. Distribuição dos artigos ao longo do tempo.



Fonte: Autoria própria.

Embora a busca sistematizada tenha sido feita para o período de 1995 – 2024, não foram encontrados registros em 1995 para os filtros aplicados. Nesse sentido, a análise foi feita a partir do ano de 1996.

Os dados mostraram que 64,52% dos artigos estão concentrados nos últimos cinco anos (2024 - 2020), 21,96% têm de seis a dez anos de publicação (2019 – 2015), 10,72% foram publicados entre 2014 e 2005 e 2,79% têm mais de vinte anos de publicação (2004 – 1996). Estes resultados indicam que houve aumento de interesse nas pesquisas sobre o resíduo de bauxita no mundo, tendo em vista que a grande maioria dos artigos publicados são recentes. A tendência de crescimento é exponencial com acréscimos anuais mais significativos a partir de 2016.

Os 1.539 artigos foram classificados em 69 áreas de pesquisa da Web of Science (Tabela 3). Devido ao número elevado de categorias, estão apresentadas na tabela somente as dez principais, com maior número de publicações. Ressalta-se que essa classificação é baseada na classificação das revistas e que, como os periódicos podem ser incluídos em mais de uma categoria, os artigos também seguem essa lógica.

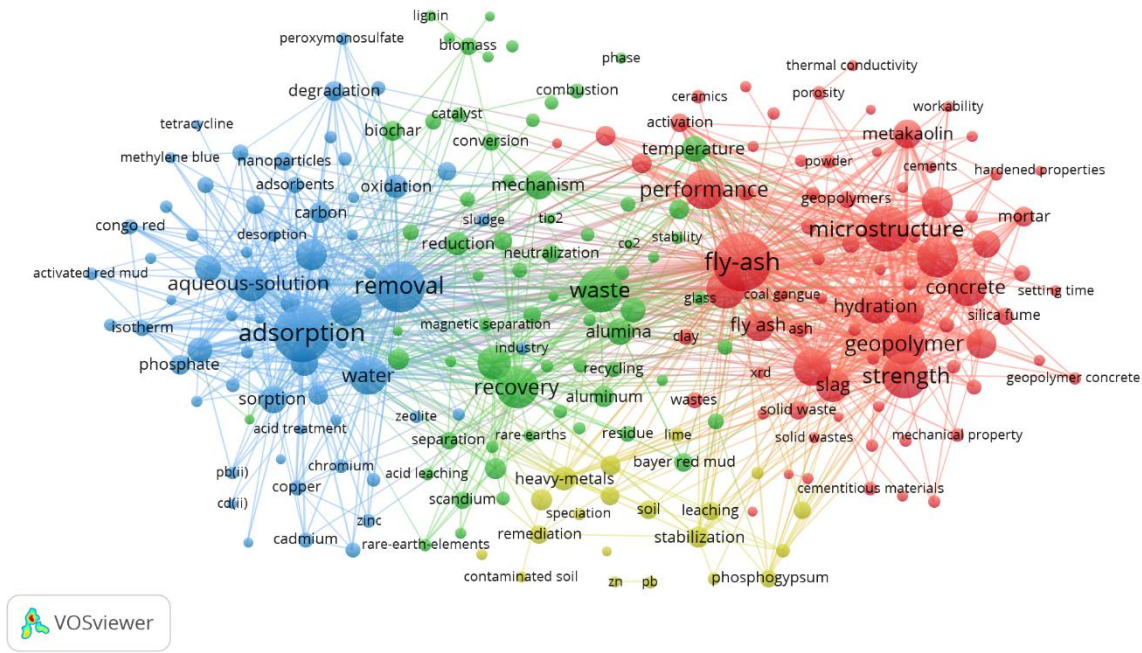
Tabela 3. Áreas científicas com maior número de publicações abordando resíduo de bauxita como tema de pesquisa.

Categorias da Web of Science	Número de artigos
Ciências Ambientais	431
Ciência dos Materiais Multidisciplinar	404
Tecnologia da Construção	302
Engenharia Ambiental	299
Engenharia Civil	290
Engenharia Química	225
Ciência e Tecnologia Sustentáveis	149
Metalurgia / Engenharia Metalúrgica	142
Química Física	102
Química Multidisciplinar	93

Fonte: Autoria própria.

Para auxiliar na classificação das áreas, utilizou-se da interpretação do grafo de coocorrência de palavras-chave. Foram selecionados os termos citados mais de dez vezes e que tinham maior relevância, de acordo com a pontuação de relevância calculada pelo Vosviewer. Ainda, foram excluídas as nomenclaturas do resíduo de bauxita. A partir desses critérios, o grafo foi criado com 229 termos, sendo possível observar a formação de quatro *clusters* (Figura 3 e Tabela 4). Os *clusters* foram relacionados com as principais categorias descritas na Tabela 3.

Figura 3. Grafo de coocorrência de palavras-chave gerado para o cenário mundial.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4. Informações obtidas sobre os *clusters* de coocorrência formados na análise mundial.

Identificação dos <i>clusters</i>	Número de termos	Principais termos	Categorias da Web of Science
Vermelho	78	Fly ash; Microstructure; Compressive strength; Performance; Geopolymer; Behavior; Cement	Ciências Ambientais; Ciência dos Materiais Multidisciplinar; Tecnologia da Construção; Engenharia Civil
Verde	66	Waste; Recovery; Iron; Mechanism; Temperature; Alumina; Extraction	Ciências Ambientais; Engenharia Química; Química Física; Química Multidisciplinar
Azul	65	Adsorption; Removal; Water; Aqueous-solution; Adsorbent; Waste-water	Ciências Ambientais; Engenharia Química; Química Física; Recursos Hídricos; Ciência e Tecnologia Sustentáveis
Amarelo	20	Heavy-metals; Metals; Stabilization; Immobilization; Soil; Leaching; Phosphogypsum	Ciências Ambientais; Engenharia Ambiental; Geociências Multidisciplinar; Geoquímica e Geofísica; Ciência do Solo

Fonte: Autoria própria.

A relação entre os *clusters* com as categorias da Web of Science foi feita levando em consideração a afinidade entre os termos e as áreas de conhecimento. Foi possível aferir que a área que mais trabalha com o resíduo de bauxita no cenário mundial é a de materiais (34,06%), com aplicação direta na produção de materiais e construção civil. A segunda maior área representa os estudos sobre recuperação de elementos presentes no resíduo como o ferro e alumínio a partir de métodos como lixiviação e extração (28,82%).

A terceira área de estudo está relacionada com a avaliação da performance do material como agente de adsorção de poluentes com aplicação no tratamento de águas residuais (28,38%). A última área encontrada concentra estudos sobre os efeitos do resíduo de bauxita no solo, incluindo a lixiviação de metais pesados e contaminações (8,73%). Em resumo, observa-se que a área de produção de materiais e de processos químicos envolvem a maioria dos trabalhos selecionados.

Em relação aos periódicos onde os artigos filtrados estão inseridos, foram contabilizados 406 itens. Estes foram organizados quanto a concentração de publicações e os dez com maior número foram listados na Tabela 5. Também podem ser visualizados dados quanto a relevância de cada periódico na sua área (Fator de impacto (FI)) e as áreas de conhecimento em que estão inseridos.

Tabela 5. Dez principais periódicos que publicam sobre o tema, no cenário mundial, e suas respectivas classificações nas áreas de conhecimento.

Periódicos (Fator de impacto 2023)	Categorias da Web of Science	Número de artigos
Construction and Building Materials – (FI 7,4)	Tecnologia da Construção / Engenharia de Edificações; Engenharia Civil; Ciência dos Materiais Multidisciplinar	166
J. of Cleaner Production – (FI 9,8)	Ciência e Tecnologia Sustentáveis; Engenharia Ambiental; Ciências Ambientais	78
J. of Hazardous Materials – (FI 12,2)	Engenharia Ambiental; Ciências Ambientais	54
Materials – (FI 3,1)	Química Física; Ciência dos Materiais Multidisciplinar; Metalurgia / Engenharia Metalúrgica; Física Aplicada; Física da Matéria Condensada	48
J. of Environmental Chemical Engineering – (FI 7,4)	Engenharia Química; Engenharia Ambiental	36
J. of Building Engineering – (FI 6,7)	Tecnologia da Construção / Engenharia de Edificações; Engenharia Civil	34
Environmental Science and Pollution Research – (FI 5,8)	Ciências Ambientais	31
Chemical Engineering J. – (FI 13,4)	Engenharia Química; Engenharia Ambiental	24
Separation and Purification Technology – (FI 8,2)	Engenharia Química	24
Case Studies in Construction Materials – (FI 6,5)	Tecnologia da Construção / Engenharia de Edificações; Engenharia Civil; Ciência dos Materiais Multidisciplinar	22

Fonte: Autoria própria.

Estes dez periódicos concentram 35,59% dos arquivos analisados. Nota-se que apenas um dos periódicos listados tem FI menor que 5 e que dois deles têm FI acima de 10,0. Com essas informações, foi possível constatar que os estudos referentes ao resíduo de bauxita estão bem-posicionados no cenário mundial. Isto é um indicativo de que o tema tem relevância e as pesquisas têm qualidade reconhecida.

Em relação à distribuição dos trabalhos no mundo, foi observado que 75 países publicaram sobre o resíduo de bauxita. A Tabela 6 apresenta os dez principais países, por ordem de quantidade de publicações.

Tabela 6. Distribuição das publicações sobre o resíduo de bauxita no mundo.

Países	Número de artigos
China	810
Índia	201
Austrália	70
EUA	66
Brasil	61
Turquia	61
Coreia do sul	45
Irã	44
Canadá	30
Inglaterra	29
Alemanha	29

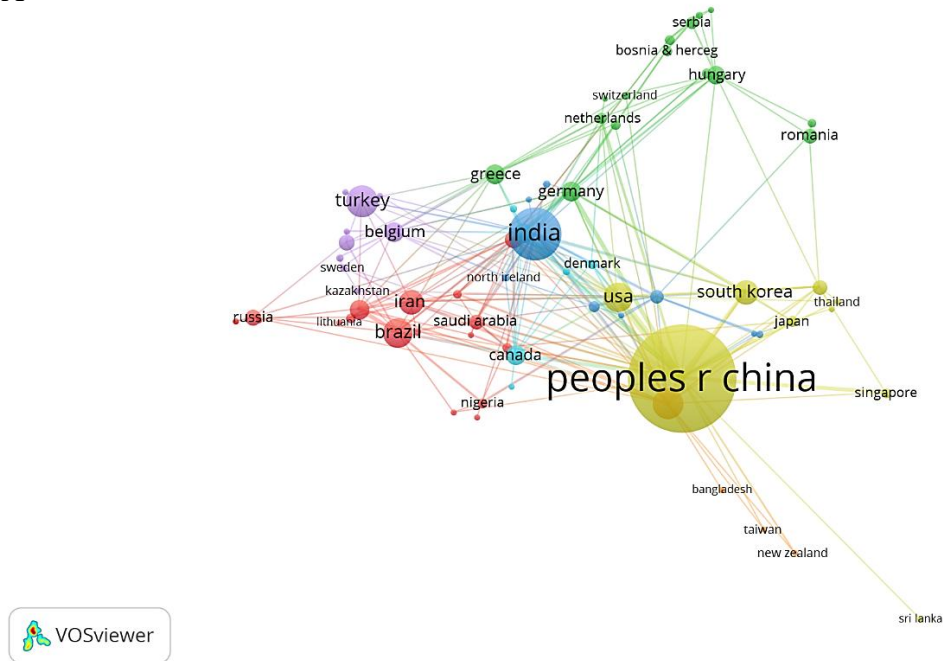
Fonte: Autoria própria.

A China é a principal produtora de alumínio primário do mundo (International Aluminium Institute, 2025), o que também a coloca como grande geradora de resíduos. O considerável número de trabalhos relacionados ao resíduo de bauxita no país mostra o interesse dos pesquisadores no tema. De modo geral, os principais países que estudaram sobre o resíduo de bauxita estão situados, majoritariamente, na região asiática seguidos pela região americana. Porém, também há representações de países da Europa e da Oceania.

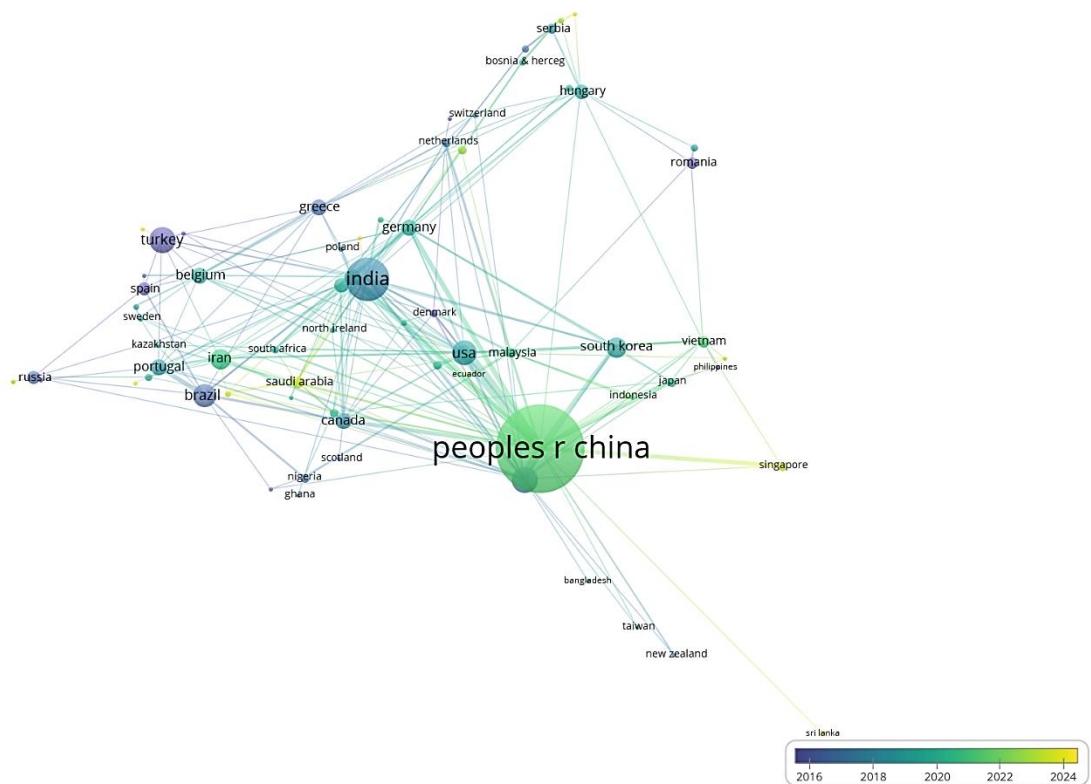
O grafo de coautoria entre países foi realizado para verificar as colaborações realizadas entre os autores dos diferentes países do mundo e o ano em que as publicações estão concentradas (Figura 4). Para confecção do grafo, todos os países foram incluídos, resultando em sete *clusters*. A Tabela 7 apresenta as principais informações dos *clusters* formados.

Figura 4. A) *Clusters* de coautoria entre países. B) Distribuição das publicações ao longo do tempo.

A



B



Fonte: Autoria própria.

Tabela 7. Informações sobre os *clusters* de coautoria entre países.

Identificação dos <i>clusters</i>	Número de países	Composição
Vermelho	18	Brasil, Camarões, Cuba, Egito, Gana, Guiné, Irã, Itália, Jordânia, Lituânia, Nigéria, Paquistão, Portugal, Rússia, Arábia Saudita, Eslováquia, África do sul, Tunísia
Verde	15	Bósnia e Hercegovina, Bulgária, Alemanha, Grécia, Hungria, Iraque, Irlanda, Montenegro, Holanda, Macedônia do Norte, Noruega, Romênia, Sérvia, Eslovênia, Suíça
Azul escuro	9	Áustria, Brunei, Equador, Etiópia, França, Índia, Indonésia, Malásia, Irlanda do Norte
Amarelo	9	China, Japão, Filipinas, Singapura, Coreia do Sul, Sri Lanka, Tailândia, EUA, Vietnã
Roxo	9	Argélia, Bélgica, Estônia, Cazaquistão, Espanha, Suécia, Turquia, Emirados Árabes Unidos, Ucrânia
Azul claro	7	Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Inglaterra, Finlândia, Polônia, Escócia
Laranja	4	Austrália, Bangladesh, Nova Zelândia, Taiwan

Fonte: Autoria própria.

A partir dos grafos gerados para o conjunto de dados analisado, observou-se que a China, além de ser a maior detentora de artigos relacionados com o resíduo de bauxita (810), é o país que apresenta as mais fortes interações, ou seja, tem grande número de publicações em conjunto. Estas interações ocorrem com os EUA, com a Austrália e com a Inglaterra, indicando sua forte parceria com esses países.

Singapura, Arábia Saudita, Paquistão, Cuba, Áustria, Lituânia, Argélia, Macedônia do Norte, Tailândia e Sri Lanka são os países que apresentaram as publicações mais recentes (2023 e 2024). Entre eles, Arábia Saudita, Singapura, Paquistão e Tailândia têm 16, 8, 4 e 2 documentos respectivamente. Os demais países apresentaram um artigo cada.

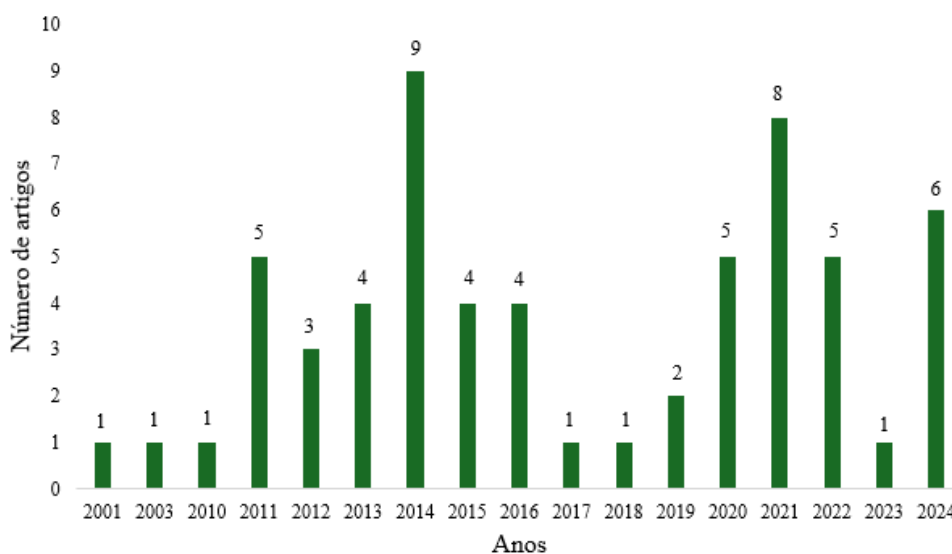
Outro aspecto interessante, possível de ser observado, é que a China e a Índia, apresentaram o maior número de interações com outros países (32 e 27, respectivamente). Ou seja, os pesquisadores desses países apresentam as maiores redes de colaboração no conjunto analisado. Já Croácia, Jamaica e Omã, com cinco, um e um documentos, respectivamente, não apresentaram colaborações com outros países.

O Brasil, situado no maior cluster, apresentou 61 publicações com considerável número de trabalhos recentes (2020 – 2024): 41%; e com média de publicações em 2016. Além disso, constatou-se que os autores brasileiros colaboraram com 10 países. O país com quem o Brasil mais colaborou foi Portugal (9 trabalhos), seguido do Canadá (4 trabalhos). Os demais países foram: Nigéria, Espanha, Inglaterra, Grécia, Itália, Rússia, Cazaquistão e Camarões.

3.3.1.2. Cenário de pesquisas sobre o resíduo de bauxita no Brasil

Dentro do conjunto de 1.539 artigos, foram encontrados 61 trabalhos brasileiros sobre o resíduo de bauxita, o que representa 3,96% do montante. A forma como estes estão distribuídos ao longo dos anos está representada na Figura 5.

Figura 5. Quantidade de artigos publicados sobre o resíduo de bauxita no Brasil.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura que o tema no país não seguiu uma tendência de crescimento, como ocorreu no cenário mundial, ficando variável ao longo dos anos. 2014 e 2021 foram os mais representativos em publicações e com uma certa discrepância dos demais. Em todo caso, pode-se dizer que, embora as publicações tenham começado em 2001, foi a partir de 2010 que o tema passou a ganhar mais relevância, tendo em vista as publicações anuais.

Os últimos cinco anos concentram 40,98% do total de publicações enquanto o período anterior, de seis a dez anos, concentra 19,67% (2015 – 2019) e 39,34% têm mais de dez anos

de publicação (2001 – 2014). Embora sem linearidade, os dados sugerem um aumento de interesse no assunto ao longo dos últimos anos, comparado com quando começaram as pesquisas no país.

Constatou-se que os artigos selecionados estão divididos em 26 áreas categorizadas pela Web of Science (Tabela 8). Assim como descrito no cenário mundial, ressalta-se que um mesmo artigo pode estar classificado em mais de uma categoria.

Tabela 8. Classificação dos artigos brasileiros sobre o resíduo de bauxita em relação às categorias da Web of Science.

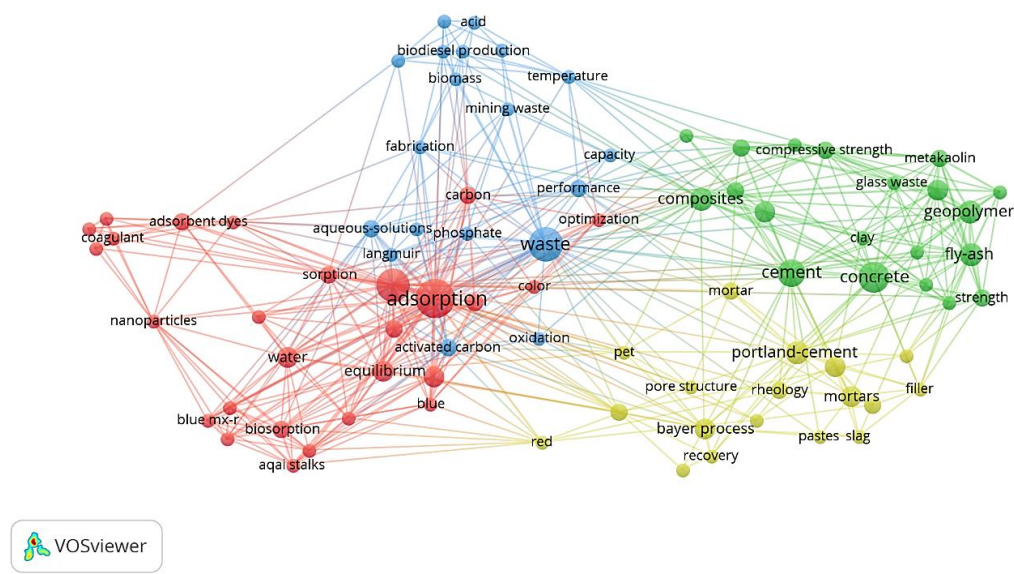
Categorias da Web of Science	Quantidade de artigos
Ciência dos Materiais, multidisciplinar	19
Tecnologia de construção e edificações	13
Engenharia Civil	12
Ciências Ambientais	12
Engenharia Química	9
Química, Física	8
Engenharia Ambiental	8
Química Multidisciplinar	5
Ciência e tecnologia verde e sustentável	5
Recursos Hídricos	5

Fonte: Autoria própria.

A área de ciência dos materiais lidera a lista, diferentemente do ocorrido no cenário mundial. As três primeiras colocadas estão mais relacionadas com a área de aplicação direta do resíduo de bauxita, deixando a grande área de ciências ambientais, que foi a primeira colocada no cenário mundial, na terceira/quarta posição.

A análise relacionada à coocorrência de palavras-chave também foi feita no cenário nacional para auxiliar na interpretação das áreas, tendo em vista que as categorias mencionadas podem ser amplas e abranger temas distintos. Foram consideradas as palavras-chave com um mínimo de duas ocorrências, o que resultou em 86 termos. Ainda, foram excluídas as nomenclaturas do material, restando 84 termos para a criação do grafo (Figura 6). Com as métricas escolhidas, houve a formação de quatro *clusters* (Tabela 9) e estes foram relacionados com as principais categorias descritas na Tabela 8.

Figura 6. Grafo de coocorrência de palavras-chave considerando os 61 artigos brasileiros.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 9. Informações sobre os *clusters* de coocorrência de palavras-chave formados para o cenário nacional.

Identificação dos <i>clusters</i>	Quantidade de termos	Principais termos	Áreas de conhecimento (Web of Science)
Vermelho	27	Adsoption; Removal; Waste-water; Water; Equilibrium; Aqueous-solution; Biosorption	Ciência dos Materiais, multidisciplinar; Química, física; Recursos Hídricos; Ciência e tec. verde e sustentável
Verde	20	Concrete; Cement; Composite; Geopolymer; Microstructure; Compressive strenght	Ciência dos Materiais, multidisciplinar; Ciência dos Materiais Compósitos; Tec. construção e edificações; Eng. Civil
Azul	18	Waste; Performance; Fabrication; Biomass; Aqueous-solution; Activated-carbon; Biodiesel production	Ciência dos Materiais, multidisciplinar; Ciências Ambientais; Eng. Química; Energia e combustíveis
Amarelo	18	Portland-cement; Hydration; Mortars; Bayer process; Rheology; Circular economy	Ciência dos Materiais, multidisciplinar; Química, física; Eng. Civil; Ciência dos Materiais Cerâmicos

Fonte: Autoria própria

De modo geral, embora tenham sido identificados os *clusters* de palavras com maior familiaridade, foi observada uma mistura entre termos maior do que no cenário mundial. As palavras *adsorption*, *waste* e *removal*, por exemplo, são mais abrangentes, tendo em vista a posição central no grafo e estão ligadas com todos os *clusters*. Nesse sentido, constatou-se semelhanças e afinidades entre os *clusters* vermelho e azul e entre verde e amarelo.

Os artigos brasileiros analisados relacionam o resíduo de bauxita mais à produção de materiais do que aos aspectos ambientais que o envolvem. Na análise realizada, não foram identificados trabalhos voltados à lixiviação de elementos ou à aplicação no solo, como observado no cenário mundial.

Foram contabilizados 42 periódicos onde os 61 artigos brasileiros estão publicados. Os dez principais, com maior número de publicações, assim como as áreas de conhecimento em que estão inseridos e os seus respectivos Fatores de impacto (FI) estão na Tabela 10. Foi possível observar também que dois desses periódicos estão entre os dez principais do mundo, descritos na Tabela 5. Para melhor assimilação, estes foram marcados com um asterisco seguido da sua colocação no ranking mundial.

Tabela 10. Dez principais periódicos onde estão localizados os 61 artigos brasileiros sobre o resíduo de bauxita e suas classificações nas categorias da Web of Science. Periódicos precedidos com um asterisco também listados no cenário mundial.

Periódicos (Fator de impacto 2023)	Categorias da Web of Science	Quantidade de artigos
* ^(1º) Construction and Building Materials – (FI 7,4)	Tec. Construção e edificações; Eng. Civil; Ciência dos Materiais, multidisciplinar	8
Materials Research-Ibero-American Journal of Materials – (FI 1,5)	Ciência dos Materiais, multidisciplinar	4
Materia – Rio de Janeiro – (FI 0,5)	Ciência dos Materiais, multidisciplinar	3
J. of Thermal Analysis and Calorimetry – (FI 3,0)	Química analítica; Química, Física; Termodinâmica	3
Engenharia Sanitária e Ambiental – (FI 0,4)	Recursos Hídricos	2
Green Chemistry – (FI 9,3)	Química, Multidisciplinar; Ciência e tecnologia verde e sustentável	2

International Journal of Applied Ceramic Technology – (FI 1,8)	Ciência dos Materiais Cerâmicos	2
International Journal of Environmental Science and Technology – (FI 3,0)	Ciências Ambientais	3
*(3º) J. of Hazardous Materials – (FI 12,2)	Eng. Ambiental; Ciências Ambientais	2
ACI Structural Journal – (FI 1,3)	Tec. Construção e edificações; Eng. Civil; Ciência dos Materiais, multidisciplinar	1

Fonte: Autoria própria.

Três dos dez periódicos listados são brasileiros e concentram 14,75% do total artigos analisados. Ressalta-se que uma considerável fração dos arquivos está situado entre os três primeiros periódicos do *ranking* mundial (16,40%). Este é um indicativo de que as pesquisas no Brasil sobre o resíduo de bauxita têm um alto nível de relevância, compatíveis com o nível internacional.

Em uma análise geral, relacionando todas as variáveis obtidas, é interessante ressaltar semelhanças encontradas nos *clusters* e *rankings*. Essas semelhanças são indicativas de que os pesquisadores brasileiros estão acompanhando o cenário mundial, no que diz respeito aos temas, relevância de trabalhos etc. As redes de cooperação entre pesquisadores de países diferentes têm grande influência neste ponto e são importantes para ampliar cada vez a mais a pesquisa nacional.

3.3.2. Categorização temática e análise descritiva

A partir da amostra de 50 artigos, escolhidos com multicritério, foi possível realizar a classificação em categorias previamente definidas. De acordo com os critérios de Carlomagno e Rocha (2016), cada artigo foi classificado em uma única categoria principal, com base em seu foco temático central. Quando o estudo abordava dois temas distintos de forma igualmente relevante, uma categoria secundária foi adicionada. Essa classificação dupla foi aplicada apenas quando ambos os temas estavam claramente desenvolvidos. A Tabela 11 resume os dados da categorização realizada.

Tabela 11. Distribuição dos artigos por categoria e subcategoria temática.

Categoria principal	Artigos por categoria principal	Artigos por categoria secundária	Subcategoria	Artigos por subcategoria principal	Artigos por subcategoria secundária
Produção de materiais	36	-	Cimentos e concretos	7	-
			Cerâmicas	-	-
			Compósitos e geopolímeros	4	-
			Construção civil	2	-
			Materiais funcionais	23	-
Ambiental	2	2	Lixiviação e contaminação	1	2
			Avaliação de risco ambiental	1	-
			Reabilitação de áreas	-	-
Solo / Agrícola	1	-	-	-	-
Recuperação de elementos	1	2	-	-	-
Caracterização do resíduo	-	-	-	-	-
Neutralização	5	-	-	-	-
Revisões técnico-científicas	5	-	-	-	-
Total	50	4	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que algumas categorias e subcategorias propostas não tiveram artigos incluídos (Produção de materiais cerâmicos, Ambiental/Reabilitação de áreas e Caracterização do resíduo). Importante ressaltar que esse resultado não significa que não existam estudos relacionados aos assuntos, mas sim que estes estudos não estiveram presentes entre os artigos mais citados, mais recentes ou representativos no conjunto priorizado, mesmo com o critério de seleção de diversidade temática.

Quatro artigos foram classificados em duas categorias, indicando dupla temática. A Tabela 12 apresenta as informações referente a esses trabalhos incluindo os motivos que os fizeram ser inseridos em duas categorias.

Tabela 12. Informações referentes aos quatro artigos duplamente classificados.

Artigo / Autores	Categorias	Motivo da dupla classificação
Effective reuse of red mud as supplementary material in cemented paste backfill: Durability and environmental impact (Wang <i>et al.</i> , 2022)	Produção de materiais – Cimentos e concretos e Ambiental – Lixiviação e contaminação	O artigo avalia a inserção do resíduo de bauxita em uma pasta cimentícia observando também os aspectos relacionados à lixiviação e segurança química no uso do material.
Strength Characteristics and Micro-Mechanism of Silty Soil Modified by Red Mud Co-Cement (Li <i>et al.</i> , 2023)	Produção de materiais – Construção civil e Ambiental – Lixiviação e contaminação	O artigo avalia o uso do resíduo de bauxita como material de engenharia civil, especificamente em obras rodoviárias, e realiza testes de radioatividade e metais pesados no material resultante.
Simultaneous dealkalization of red mud and recovery of valuable metals by a novel marine fungus tolerating high alkalinity and salinity (Gao <i>et al.</i> , 2024)	Neutralização e Recuperação de elementos	O artigo foca na modificação do resíduo de bauxita para torná-lo ambientalmente mais seguro, via dealkalinização biológica. Fazem a recuperação de metais de forma complementar ao processo de tratamento.
Properties of self-hardened CaO-added bauxite residue pellets, and their behavior in hydrogen reduction followed by leaching and	Neutralização e Recuperação de elementos	O artigo propõe um processo integrado para tratar o resíduo de bauxita e recuperar ferro metálico e alumina, envolvendo pelotização com CaO, redução

magnetic separation for iron and alumina recovery (Kar <i>et al.</i> , 2023)	com hidrogênio, lixiviação alcalina e separação magnética.
--	---

Fonte: Autoria própria.

As seções a seguir apresentam uma discussão descritiva de cada categoria temática identificada na classificação. Para cada categoria, foram destacadas as principais tendências de pesquisa e os focos de estudo, acompanhados de exemplos representativos de artigos que ilustram abordagens, tecnologias ou estudos de caso típicos abordados na literatura.

a) Produção de materiais

A categoria mais representativa na amostra analisada foi a *Produção de materiais* indicando um grande interesse no desenvolvimento de produtos diversos com o resíduo de bauxita. Dentre esses materiais estão os cimentos e concretos; compósitos e geopolímeros; materiais para a construção civil em geral; e materiais funcionais como adsorventes e catalisadores. Esses trabalhos estudaram a viabilidade de aplicar o resíduo de bauxita nos processos produtivos, levando em consideração as propriedades do resíduo, e posteriormente, avaliaram as características do produto formado.

A principal utilização do resíduo de bauxita encontrada foi na produção de adsorventes. Genç-Fuhrman; Tjell e McConchie (2004) utilizaram o resíduo de bauxita neutralizado com água do mar e ativado (Bauxsol) avaliando seu uso como adsorvente para remoção de arsênio de águas contaminadas. Irannajad e Rahimi (2025) também modificaram quimicamente o resíduo de bauxita, por lavagem com água do mar e ácido, com o objetivo de melhorar sua capacidade de adsorção de sulfato.

O resíduo de bauxita também foi aplicado como catalisador, caracterizando uma outra função como material funcional. Tang *et al.* (2025) utilizaram bagaço de cana e resíduo de bauxita para produzir um fotocatalisador do tipo Fenton. O intuito foi aplicar o produto para degradação de efluentes reais da indústria têxtil (corante Rhodamina B). Gu *et al.* (2025) apresentaram o desenvolvimento de um catalisador heterogêneo funcional a partir do resíduo de bauxita combinado com pirita de ferro (FeS₂) para ativação de peroximonossulfato (PMS) na degradação de levofloxacino (um antibiótico) em água.

As demais aplicações encontradas para o resíduo de bauxita na área de produção de materiais estão relacionadas com engenharia e construção civil. Chen *et al.* (2024) propuseram a preparação de materiais cimentícios suplementares a partir da combinação de resíduo de bauxita e rejeitos de mineração de ouro, com foco em melhoria de propriedades pozolânicas para uso em misturas com cimento. Li *et al.* (2023) utilizaram o resíduo de bauxita em combinação com cimento para melhorar um solo siltoso destinado a preenchimento de base de estrada. Zhang *et al.* (2025) produziram geopolímeros com resíduo de bauxita e rejeito de minério de ferro utilizando fibras de basalto e fibras de carbono como reforço.

b) Ambiental

As características físico-químicas do resíduo de bauxita fazem com que sejam necessários estudos sobre os potenciais impactos ambientais associados à sua geração e utilização. A categoria *Ambiental* abrange trabalhos que tem foco específico em aspectos como lixiviação de contaminantes, avaliação de risco ecológico e à saúde humana, e efeitos da disposição ou uso do resíduo em diferentes contextos.

Goronovski; Tkaczyk (2019) fizeram uma avaliação do comportamento de radionuclídeos durante diferentes processos de valorização do resíduo de bauxita, incluindo a recuperação de metais. O artigo investigou se a manipulação do resíduo de uma planta específica pode gerar risco radiológico ao ambiente ou à saúde. Ji *et al.* (2025) explanaram sobre a importância de se realizar avaliações ambientais de curto e longo prazo sobre a aplicação do resíduo de bauxita na construção de estradas. Os autores investigaram a lixiviação de metais pesados (Cr, Mn, Cu e As) em condições simuladas de chuva ácida e desenvolveram modelos cinéticos e de difusão para prever liberação de metais ao longo de 20 anos.

Esses trabalhos contribuem para a compreensão da periculosidade do material. Trata-se de um aspecto importante de ser analisado uma vez que há um aumento no interesse em utilizar o resíduo em outras aplicações.

c) Solo / Agrícola

A categoria *Solo / Agrícola* abrange estudos que exploram o uso do resíduo de bauxita como insumo para aplicações agronômicas ou de melhoria das propriedades do solo.

Exemplos de estudos nessa área incluem a potencial neutralização da alcalinidade do resíduo para viabilizar sua aplicação em solos, seu uso como corretivo ou condicionador.

Dobra *et al.* (2017) aplicaram o resíduo de bauxita como adjuvante para ajuste de pH em solos. Os autores realizaram estudo em uma estufa com o crescimento de plantas de milho em uma formulação bem balanceada de solo profundamente remodelado, contendo misturas entre solo ácido, resíduo de bauxita, composto natural contendo fertilizantes orgânicos e carbono orgânico e fertilizantes minerais contendo nitrogênio solúvel total, fósforo e potássio. Essa linha de pesquisa busca alinhar o reaproveitamento do resíduo com práticas sustentáveis de manejo agrícola.

d) Recuperação de elementos

A categoria *Recuperação de elementos* teve como propósito reunir estudos que exploram o potencial do resíduo de bauxita como fonte secundária de metais de valor comercial, como ferro, alumínio, titânio, escândio e outros elementos terras-raras. Esses trabalhos se concentram em métodos físico-químicos ou biotecnológicos para extrair seletivamente esses componentes.

Na amostra analisada, um artigo trata especificamente da extração de elementos do resíduo de bauxita. Borra *et al.* (2015) apontam que a maioria dos estudos relacionados ao tema se concentram na extração do escândio. Propuseram a lixiviação de elementos majoritários do resíduo de bauxita e a lixiviação de outros elementos terras-raras por ácidos orgânicos. Estudaram diferentes formas de realizar a lixiviação desses elementos, alterando tipo de meio (água e diferentes ácidos), tempo, temperatura, etc.

Trabalhos que visam a extração de elementos contribuem tanto para a valorização econômica do resíduo quanto para a redução de impactos ambientais associados ao seu descarte.

e) Neutralização

O alto pH do resíduo de bauxita é um dos maiores entraves para sua disposição segura e aplicação em outros processos. Diversos estudos têm se dedicado à investigação de métodos de neutralização ou estabilização química do resíduo de bauxita, com o objetivo de reduzir seu pH, imobilizar contaminantes e transformar o resíduo em um material ambientalmente mais seguro e tecnicamente viável para reutilização.

Ressalta-se que muitos trabalhos classificados na categoria *Produção de materiais funcionais* realizaram processos de neutralização e/ou tratamento no resíduo antes da aplicação. A categoria *Neutralização* abrange estudos cujo foco principal está na neutralização e/tratamento do resíduo de bauxita sem necessariamente apresentar uma aplicação prática.

Cinco artigos da amostra abordaram aspectos relacionados à neutralização do resíduo de bauxita. Dois deles aproveitaram do processo de neutralização para realizarem a recuperação de elementos valiosos (Gao *et al.*, 2024; Kar *et al.*, 2023) (Tabela 11). Dhriyan; Prasad; Verma (2025) objetivaram a bioestabilização do resíduo de bauxita por meio da precipitação de calcita induzida por microrganismos (*Bacillus sphaericus* e *Bacillus megaterium*), alcançando um aumento expressivo da resistência e neutralização da alcalinidade.

Xue *et al.* (2019) utilizaram um resíduo da indústria de fertilizantes (fosfogesso) para estabilizar quimicamente o resíduo de bauxita, alcançando uma redução de pH e da alcalinidade solúvel de até 92,2%. Nie *et al.* (2023) utilizaram água supercrítica e agentes lixiviantes para desalcalinizar o resíduo de bauxita.

Os autores dos trabalhos inseridos nessa categoria sugerem aplicações diversas para o material tratado. As aplicações estão mais relacionadas à produção de materiais para a construção civil; à captura de poluentes gasosos como SO₂, CO₂ e H₂S; e à aplicação do resíduo de bauxita no solo.

f) Revisões técnico-científicas

As revisões de literatura reúnem, organizam e discutem dados provenientes de diversas fontes e contextos, muitas vezes apontando lacunas no conhecimento atual e sugerindo caminhos para futuras pesquisas. A categoria *Revisões* contempla artigos que se dedicaram à análise consolidada do conhecimento científico sobre o resíduo de bauxita, abordando aspectos como características físico-químicas, impactos ambientais, desafios de manejo e possibilidades de aproveitamento.

Cinco trabalhos foram inseridos nessa categoria e esse volume considerável está relacionado com o número de citações. Três das revisões inseridas constituem uma série produzida por três autores e exploram aspectos distintos do resíduo de bauxita, tendo amplo reconhecimento mundial. Klauber; Gräfe; Power (2011) focaram nas dificuldades históricas, desafios e possibilidades futuras de uso do resíduo de bauxita. Os autores deram ênfase na

viabilidade de uso do material, barreiras e possíveis caminhos. Power; Gräfe; Klauber (2011) apresentaram as práticas de disposição, armazenamento e manejo do resíduo de bauxita desde o início da indústria de alumínio, dando foco na gestão operacional e ambiental do material. E Gräfe; Power; Klauber (2011) focaram na compreensão das reações químicas de neutralização do resíduo de bauxita e no planejamento de estratégias eficazes de estabilização.

As demais revisões foram relacionadas à disposição e armazenamento do resíduo de bauxita desde o século XIX, apontando tendências de uso ao longo do tempo e citando as barreiras institucionais, econômicas e regulatórias que limitam o uso do material (Evans, 2016) e ao uso de diversos resíduos industriais como adsorventes, incluindo cinzas volantes, escória de alto-forno, resíduo de bauxita, entre outros (Ahmaruzzaman, 2011). Com base no número de citações obtidas por esses trabalhos fica claro que essas revisões fornecem uma base valiosa para o avanço das investigações e o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes para a gestão e valorização do resíduo de bauxita.

3.3.3. Considerações, desafios e lacunas de pesquisa

O resíduo de bauxita vem sendo estudado em diversas áreas e para diversas finalidades. Dentre as diferentes formas exploradas para uso do resíduo de bauxita, observou-se a aplicação de metodologias diversas e isso deve ser levado em consideração. Os aspectos metodológicos para utilização do resíduo como adsorvente, por exemplo, giram em torno da sua granulometria e ativação da superfície com tratamento.

Destaca-se que utilização do resíduo de bauxita requer processos prévios, desde os mais simples como secagem, moagem e peneiramento, até mais complexos, para modificação de propriedades químicas. Alguns autores ainda relatam que a aplicação direta do resíduo de bauxita, sem tratamentos prévios, se restringe a pequenas quantidades devido aos níveis de metal pesado existentes.

Observou-se que não foram encontradas informações a respeito do volume de resíduo que seria utilizado na produção dos materiais ou nos processos sugeridos, tendo em vista uma escala industrial. Ainda, os usos em que o aproveitamento do resíduo seja momentâneo, ocasionariam uma segunda geração de resíduos para o mesmo material, necessitando ainda de técnicas de controle e destinação adequadas.

Foi possível observar um crescimento no interesse da utilização do material e uma busca pelo melhoramento de técnicas aplicadas. No entanto, a grande maioria desses trabalhos

está concentrada em escala laboratorial e relatos de autores ressaltam a pouca aplicabilidade desses estudos em maiores escalas. Dentre os motivos disso estão os seguintes pontos, compilados dos trabalhos analisados:

- Estudos em escala laboratorial que empregam recursos de alto custo não se mostram economicamente viáveis para aplicações em maior escala. Enquadram-se aqui, principalmente, os estudos sobre a neutralização e o tratamento em geral do resíduo de bauxita.
- Estudos que avaliam a composição de um resíduo de uma planta específica para uma determinada aplicação não podem ser generalizados para todas as plantas.
- Ausência de investigação sobre a durabilidade a longo prazo dos materiais produzidos com o resíduo de bauxita, assim como do monitoramento e da análise dos impactos ambientais e dos potenciais riscos à saúde associados ao seu uso a longo prazo.
- Ausência de investigação sobre custo-benefício de toda a cadeia produtiva, desde a implementação de sistemas de tratamento do resíduo até a produção e comercialização dos produtos.

De modo geral, não foram encontradas informações suficientes que garantam a viabilidade da aplicação do resíduo em escala industrial para a grande parte dos processos sugeridos. Dessa forma, entende-se que os trabalhos se baseiam mais na questão ambiental, sobre a destinação e aproveitamento do resíduo, do que na aplicação comercial viável dos produtos.

3.4. CONCLUSÕES

A revisão de literatura permitiu um aumento do conhecimento acerca do que é proposto para o resíduo de bauxita no Brasil e no mundo, possibilitando o entendimento das perspectivas que existem sobre a valorização e o potencial do material. O Brasil apresentou um número considerável de trabalhos mostrando o interesse dos pesquisadores brasileiros no desenvolvimento de materiais inovadores a partir do resíduo.

Conclui-se que a maior parte das publicações tem como foco a utilização do resíduo de bauxita para a área de materiais, incluindo metodologias e aplicações inovadoras. Entretanto, são trabalhos em escala laboratorial. Pesquisas futuras podem ser constituídas de análises de viabilidade econômica das aplicações em escala industrial, eficiência de pré-tratamentos e

custos operacionais, dentre outros. Assuntos que não foram abordados nos trabalhos avaliados.

Espera-se que esta revisão contribua para um melhor entendimento sobre as possibilidades e desafios existentes quanto ao aproveitamento do resíduo de bauxita, assim como, fomenta novas pesquisas e trabalhos inovadores.

REFERÊNCIAS

- AHMARUZZAMAN, M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. **Advances in Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 166, n. 1–2, p. 36–59, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868611000996>.
- ALBORAIKAN, R.; BAGERI, B.; SOLLING, T. I. Innovative Applications of Red Mud: Converting an Environmental Challenge to a Drilling Asset. **ACS Omega**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 614–625, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c05755>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>. Acesso em: 8 fev. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Sustentabilidade**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://abal.org.br/sustentabilidade/desempenho-socioambiental/#accordion2>.
- BORRA, C. R. *et al.* Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 76, p. 20–27, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.005>.
- CARLOMAGNO, M. C.; ROCHA, L. C. da. Como criar e classificar categorias para fazer análise de conteúdo: uma questão metodológica. **Revista Eletrônica de Ciência Política**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 16, 2016.
- CENTRE FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY STUDIES. **VOSviewer version 1.6.18**. Países Baixos: Leiden University, 2022. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>.
- CHEN, B. *et al.* Study on the synergistic preparation of supplementary cementitious materials from multiple solid wastes: Bayer red mud and gold tailings. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 112599, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343724007292>.
- DAS, B.; MOHANTY, K. A review on advances in sustainable energy production through various catalytic processes by using catalysts derived from waste red mud. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 143, p. 1791–1811, 2019.
- DHRIYAN, S. S.; PRASAD, A.; VERMA, A. K. Experimental Study on Bio-cementation of Red Mud Through Microbially Induced Calcite Precipitation. **Indian Geotechnical Journal**,

[*s. l.*], v. 55, n. 2, p. 1152–1167, 2025. Disponível em:
<https://link.springer.com/10.1007/s40098-024-00975-w>.

DOBRA, G. *et al.* Bauxite Residue Safety Disposal and Possibilities to Further Utilization. Part 1. Acid Soils Remediation. **Journal of Siberian Federal University. Chemistry**, [*s. l.*], v. 10, n. 1, p. 6–21, 2017. Disponível em: <http://journal.sfu-kras.ru/en/article/32423>.

EVANS, K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [*s. l.*], v. 2, n. 4, p. 316–331, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40831-016-0060-x>.

GAO, B. *et al.* Simultaneous dealkalization of red mud and recovery of valuable metals by a novel marine fungus tolerating high alkalinity and salinity. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s. l.*], v. 12, n. 1, p. 111775, 2024. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343723025149>.

GENÇ-FUHRMAN, H.; TJELL, J. C.; MCCONCHIE, D. Adsorption of Arsenic from Water Using Activated Neutralized Red Mud. **Environmental Science & Technology**, [*s. l.*], v. 38, n. 8, p. 2428–2434, 2004. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es035207h>.

GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. **Hydrometallurgy**, [*s. l.*], v. 108, n. 1–2, p. 60–79, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.004>.

GU, J. *et al.* Novel red mud-based FeS₂ composite used as an effective heterogeneous catalyst for the degradation of levofloxacin: Preparation, application and degradation mechanism. **Materials Research Bulletin**, [*s. l.*], v. 182, p. 113143, 2025. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025540824004732>.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Mining and refining**. [*S. l.*], [*s. d.*]. Disponível em: <https://thealuminiumstory.com/mining-refining/bauxite-residue-management/>.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Primary Aluminium Production**. [*S. l.*], 2025. Disponível em: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/?publication=primary-aluminium-production&filter=%7B%22row%22%3A85%2C%22group%22%3Anull%2C%22multiGroup%22%3A%5B%5D%2C%22dateRange%22%3A%22monthly%22%2C%22monthFrom%22%3A3%2C%22mo.>

IRANNAJAD, M.; RAHIMI, S. Density Functional Theory Study of Adsorption Mechanism of Sulfate Contaminant on Red Mud Surfaces. **Environmental Engineering Science**, [*s. l.*], v. 42, n. 1, p. 26–39, 2025. Disponível em:
<https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ees.2024.0077>.

Ji, W. *et al.* Red mud used as roadbed material: Revealing the long-term leaching characteristics of heavy metals and associated health risk. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s. l.*], v. 13, n. 1, p. 115166, 2025. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343724032986>.

KAR, M. K. *et al.* Properties of self-hardened CaO-added bauxite residue pellets, and their

behavior in hydrogen reduction followed by leaching and magnetic separation for iron and alumina recovery. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 48, n. 99, p. 38976–38990, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319923048310>.

KLAUBER, C.; GRÄFE, M.; POWER, G. Bauxite residue issues: II. options for residue utilization. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 11–32, 2011.

LI, X. *et al.* Alkali activation of blast furnace slag using Bayer red mud as an alternative activator to prepare cemented paste backfill. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 453, p. 139061, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182404203X>.

LI, X. *et al.* Strength Characteristics and Micro-Mechanism of Silty Soil Modified by Red Mud Co-Cement. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 11, p. 8762, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/11/8762>.

LIU, H. *et al.* High-Performance Fe-Al Double Hydroxide Prepared by Red Mud for Arsenic Removal. **JOM**, [s. l.], v. 76, n. 8, p. 4155–4168, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11837-023-06301-8>.

NIE, Z. *et al.* Red mud with enhanced dealcalization performance by supercritical water technology for efficient SO₂ capture. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 344, p. 118469, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479723012574>.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 33–45, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>.

TANG, J. *et al.* Bagasse modification of red mud for efficient photocatalytic degradation of real dye wastewater: An utilization attempt for massive waste. **Environmental Research**, [s. l.], v. 267, p. 120608, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001393512402512X>.

WANG, S. *et al.* Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 289, p. 125136, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620351805>.

WANG, Z. *et al.* Effective reuse of red mud as supplementary material in cemented paste backfill: Durability and environmental impact. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 328, p. 127002, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822006870>.

WANG, X. *et al.* The Effect of Red Mud on Sintering Processes and Minerals of Portland Cement for Roads. **Crystals**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1267, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/10/1267>.

WU, Z. *et al.* Reaction behavior of quartz in gibbsite-boehmite bauxite in Bayer digestion and its effect on caustic consumption and alumina recovery. **Ceramics International**, [s. l.], v.

48, n. 13, p. 18676–18686, 2022. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884222009324>.

XUE, S. *et al.* Phosphogypsum stabilization of bauxite residue: Conversion of its alkaline characteristics. **Journal of Environmental Sciences**, [s. l.], v. 77, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001074218302924>.

ZHANG, J. *et al.* Superior reinforcement efficiency of basalt fibers in geopolymers: Hydration interaction and embodied carbon advantage over carbon fibers. **Sustainable Materials and Technologies**, [s. l.], v. 43, p. e01203, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221499372400383X>.

4. CAPÍTULO 3: COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) COMO UMA ESTRATÉGIA DE WASTE-TO-ENERGY: UMA REVISÃO DA LITERATURA NO CONTEXTO MUNDIAL E BRASILEIRO

Resumo

Este trabalho teve como objetivo obter informações quantitativas e qualitativas sobre o Combustível Derivado de Resíduos (CDR) no mundo, com ênfase no cenário brasileiro. No cenário global, foram incluídos 774 artigos e destes, 250 foram selecionados para classificação temática e interpretação descritiva. No cenário brasileiro, todos os 16 trabalhos identificados foram incluídos em ambas as análises. Os dados globais revelaram um crescimento exponencial das publicações ao longo do tempo, com 40,70% dos trabalhos publicados entre 2019 e 2023. No Brasil, esse tema é relativamente recente, com publicações começando a partir de 2016. Os dados demonstraram um interesse crescente pelo CDR em ambos os contextos. As principais categoria temáticas dos trabalhos selecionados são: Ciências Ambientais e Energia e Combustíveis. A maior parte das pesquisas relacionadas com o CDR está concentrada na Ásia, Europa e América do Norte. O Brasil ocupa a 19ª posição, representando 2,1% da amostra global. A análise descritiva mostrou que o CDR está associado à gestão sustentável dos Resíduos Sólidos Urbanos e frequentemente ligado a metodologias modernas, como a Avaliação do Ciclo de Vida e as abordagens de modelagem. Diferenças foram observadas entre os estudos brasileiros e internacionais: enquanto o Waste-to-Energy (WtE) é mais desenvolvido mundialmente, no Brasil está ainda na fase inicial de elaboração de legislação e de compreensão plena do potencial desta abordagem. No contexto brasileiro, o CDR é fortemente associado com a indústria cimentícia, e existe uma clara lacuna de conhecimento e normatização que impede a ampliação do seu uso. Espera-se que os resultados desta revisão forneçam uma base para a expansão da pesquisa sobre o contexto da WtE em todo o mundo, e especialmente no Brasil.

Palavras-chave: Resíduo Sólido Urbano; Waste-to-Energy; Gestão de resíduos; Gestão brasileira de RSU

4.1. INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são materiais gerados em grande escala pela população, acompanhando o crescimento exponencial da população e as mudanças nos padrões de consumo. O Brasil gerou aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU em 2022 (381 kg per capita), e 39% dessa quantidade foi descartado de forma inadequada (aterros sanitários e aterros controlados) (Abrelpe, 2022). A ineficiência dos processos de coleta, tratamento e controle desses resíduos tornou-se um problema ambiental e de saúde pública. Neste contexto, medidas eficientes de gestão de resíduos são essenciais e devem ser tomadas para reduzir o impacto causado (Gałko *et al.*, 2023).

A reciclagem de materiais presentes nos resíduos, como os plásticos, é um conceito antigo que visa reduzir o descarte desses materiais em aterros sanitários ou de forma inadequada. O conceito de reciclagem começou a ser acompanhado por outros termos por volta de 1970, dentro do princípio dos 3Rs: Reduzir, Reutilizar e Reciclar. Este princípio surgiu como uma ferramenta para a gestão e educação ambiental. Para expandir ainda mais o foco deste princípio, em meados da década de 1990, foram incluídos dois termos adicionais: recuperar e recusar. Hoje, além dos 5Rs, existe o conceito de Economia Circular, que enfatiza um sistema em que os recursos são continuamente reutilizados em vez de descartados (Herrador; Van, 2024; Lakatos *et al.*, 2021).

Entende-se que a recuperação dos RSU ocorre através da extração de valor desse material, seja na forma de materiais ou energia. Na literatura, é possível observar que o conceito Waste-to-Energy (WtE), ou Resíduos-para-Energia em livre tradução, tem sido discutido desde a década de 1970 entre pesquisadores que buscam compreender as implicações da implementação de um sistema de geração de energia a partir dos RSU. A partir disso, a recuperação de calor dos RSU para produção de energia torna-se uma opção na gestão integrada de resíduos (Manninen *et al.*, 1996; Vounatsos *et al.*, 2015).

Três tipos de processos podem ser usados para a conversão energética de resíduos: termoquímico, bioquímico e químico (Khan; Chowdhury; Techato, 2022). Entre as matérias-primas utilizadas nestes processos, destaca-se o Combustível Derivado de Resíduos (CDR), uma categoria de combustível alternativo composto por uma mistura de materiais não perigosos encontrados nos RSU e nos Resíduos Sólidos Industriais. O CDR tem sido aplicado em processos termoquímicos, como gaseificação, pirólise e incineração, gerando calor e energia sob a forma de diferentes produtos (Khan; Chowdhury; Techato, 2022).

O interesse pelo uso de RSU na indústria e em outros setores tem aumentado. A indústria cimenteira destaca-se entre as indústrias que consomem CDR, e a aplicação deste material nos processos de produção de clínquer tem sido um tema estudado ao longo dos anos (Haas; Weber, 2010; Kara, 2012; Madadian; Crowe; Lefsrud, 2017). Além disso, novos temas de trabalho com CDR são observados, incluindo seu uso em usinas de energia como substituto de combustíveis fósseis (Dong *et al.*, 2018; Nowak, 2023). Isso impulsionou estudos sobre essa aplicação, levando à avaliação e otimização de processos.

No que diz respeito ao tema WtE, dois pontos devem ser destacados. Primeiro, atualmente é possível observar tecnologias promissoras relacionadas com a conversão de resíduos em energia sendo implementadas com sucesso em países desenvolvidos, particularmente na Europa e na Ásia (Dong *et al.*, 2018; Khan; Chowdhury; Techato, 2022). No entanto, nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, o conceito WtE permanece bastante limitado, uma vez que a gestão de resíduos em si muitas vezes não é realizada de forma adequada (Ikhlail, 2018; Khan; Chowdhury; Techato, 2022). Questões como a ausência de legislação clara, falta de campanhas regulares de conscientização pública, metodologias de cobrança inadequadas, avaliação insuficiente de aterros sanitários não controlados e a falta de avaliações ambientais e econômicas abrangentes são apontadas pelos autores como fatores que justificam a ineficiência da gestão de RSU em países em desenvolvimento (Azevedo *et al.*, 2021; Ikhlail, 2018; Khan; Chowdhury; Techato, 2022). Em segundo lugar, apesar das aplicações bem estabelecidas do CDR, a sua distribuição e utilização eficazes como combustível continuam limitadas por vários fatores críticos, incluindo a disponibilidade do material, a origem, a heterogeneidade da composição e as propriedades físicas, como a umidade e a densidade (Azam *et al.*, 2021; Białowiec *et al.*, 2017; Gałko *et al.*, 2023; Laohalidanond *et al.*, 2021; Nowak, 2023; Wolny-Koładka; Żukowski, 2019).

No Brasil, o uso de RSU para fins energéticos é uma prática relativamente nova e ainda limitada. As discussões sobre o tema começaram no início dos anos 2000, mas foi somente em 2010, com o estabelecimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305 (Brasil, 2010), que foram iniciados debates mais aprofundados sobre a recuperação energética dos resíduos como forma de eliminação final ambientalmente adequada. Posteriormente, incentivado pela possibilidade de coprocessamento na indústria cimenteira, o interesse pelo CDR cresceu, levando à criação de regulamentações específicas para o licenciamento da produção e utilização deste combustível. Exemplos notáveis incluem a Resolução SMA 038/17 (São Paulo State Department of Environment, 2017), e Resolução

SIMA 047/20 (São Paulo State Department of Environment, 2020), ambos do estado de São Paulo. Além destes regulamentos, o “Guia de Avaliação Preliminar para a Produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR)” (Brazil - Ministry of Regional Development, 2021) é um documento de ação nacional, resultante de uma cooperação técnica entre o Brasil e a Alemanha, elaborado para apoiar a prática WtE no país.

Com base no exposto, fica claro que é essencial uma visão abrangente do CDR dentro do tema da valorização energética de resíduos (WtE), considerando tanto os aspectos globais quanto os desenvolvimentos científicos no Brasil. As revisões de literatura são ferramentas valiosas para melhorar a compreensão de tópicos específicos, validar estudos anteriores e identificar caminhos para novas pesquisas que abordem lacunas existentes na área. Assim, esta revisão tem como objetivo fornecer uma visão geral, quantitativa e qualitativa, da pesquisa sobre o CDR globalmente, com ênfase especial na análise do panorama científico brasileiro, identificando áreas de pesquisa, inovações, desafios e lacunas existentes.

4.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.2.1. Coleta de dados

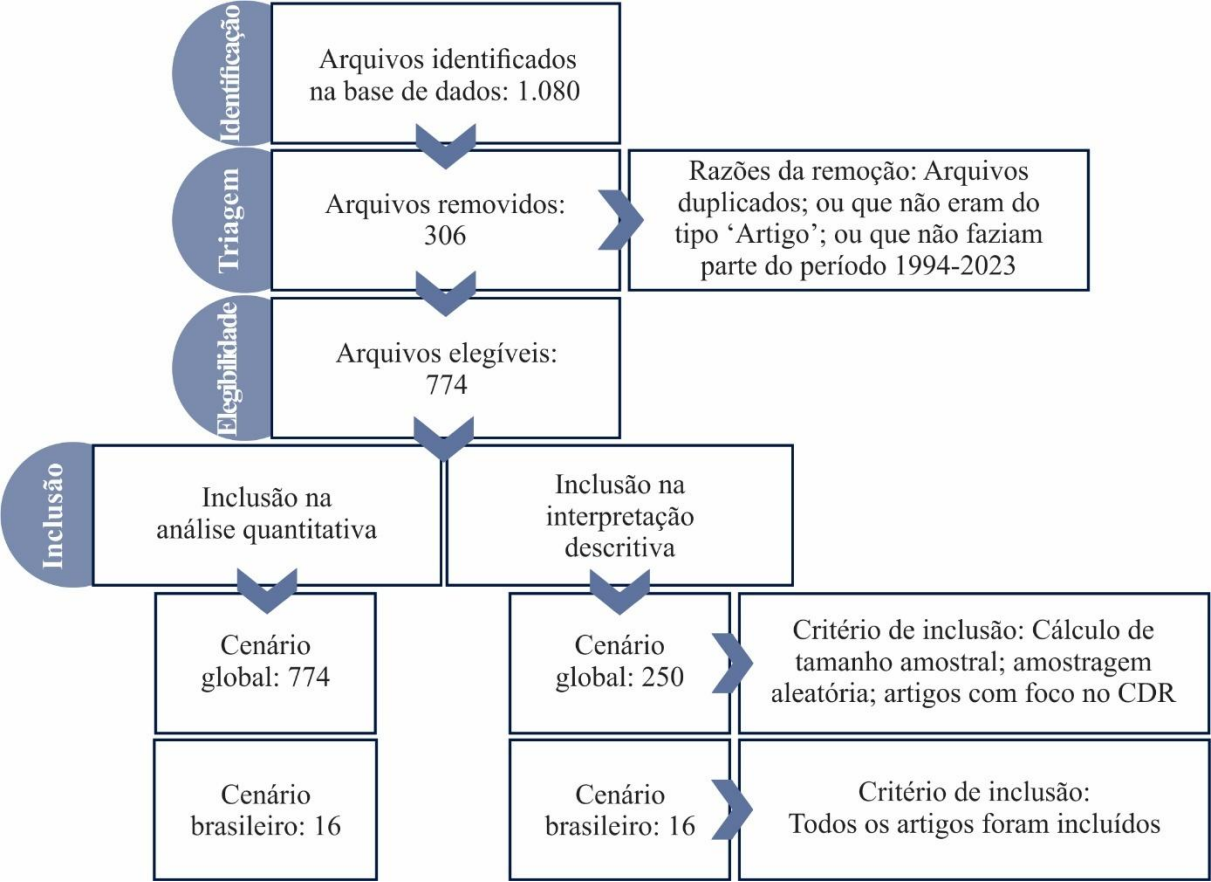
Este trabalho realizou uma revisão de literatura combinando a análise quantitativa com uma interpretação temática descritiva e qualitativa para mapear a produção científica relacionada ao CDR no contexto da valorização energética de resíduos, com ênfase especial no cenário brasileiro. O objetivo dessa abordagem mista foi coletar dados sobre a produção de trabalhos sobre CDR, identificar as principais áreas de estudo, aplicações do material e lacunas na pesquisa.

A pesquisa foi realizada seguindo os métodos e a teoria propostos por Nordhausen and Hirt (2020), Bardin (1977), Galvão and Ricarte (2019), Siddaway et al. (2019) and Squarcini et al. (2020). Para orientar a seleção e análise dos documentos, foram definidas as seguintes questões:

- Qual é o cenário global e brasileiro de pesquisas sobre o CDR?
- Como o Brasil está inserido no contexto valorização energética de resíduos (WtE)?

A pesquisa de artigos foi sistematizada seguindo as diretrizes da Declaração PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Moher *et al.*, 2009) para garantir transparência e rigor metodológico (Figura 1). A pesquisa sistematizada foi realizada na base de dados Web of Science, utilizando os seguintes critérios: Palavras-chave: “Refuse-derived fuel” OR “Refuse-derived fuels” OR “Refuse derived fuel” OR “Refuse derived fuels”; Filtros de pesquisa: Palavras-chave presentes no título ou resumo.

Figura 1. Diagrama de fluxo para identificação das etapas da revisão.



Fonte: Autoria própria.

As palavras-chave foram definidas com base em pesquisas anteriores para examinar variações na nomenclatura. O período amostrado de trinta anos (1994-2023) foi escolhido por entender é suficiente para identificar tendências ou padrões em uma determinada área de pesquisa. A busca foi realizada em meados de 2024.

Após a triagem, um total de 774 documentos foram elegíveis para inclusão na análise quantitativa. Para a classificação temática e interpretação descritiva, uma amostra representativa de artigos do contexto global foi determinada utilizando a fórmula de Cochran.

(1985) (Equação 1), resultando em 263 documentos. Esse número de artigos foi então selecionado aleatoriamente do conjunto de 774.

$$n = \frac{\frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2}}{1 + \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2} - 1 \right)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- n = Tamanho da amostra;
- Z = Valor de Z para intervalo de confiança;
- p = Estimativa de proporção de amostra;
- e = Erro de amostragem tolerável;
- N = Tamanho da população.

Para o contexto brasileiro, foram selecionados os artigos que tinham afiliações brasileiras, resultando em 16 documentos. Todos os artigos foram incluídos na classificação temática e na interpretação descritiva para garantir uma perspectiva nacional abrangente.

4.2.2. Análise de dados

A análise quantitativa foi realizada tanto para o cenário global quanto para o brasileiro. Envolveu o uso da ferramenta *Results analysis* da plataforma Web of Science, bem como a interpretação de redes e gráficos gerados com o software VOSviewer versão 1.6.1 (Centre for Science and Technology Studies, 2022). Os tópicos analisados foram os seguintes:

- Evolução anual das publicações,
- Distribuição por área do conhecimento,
- Principais periódicos,
- Distribuição geográfica das publicações,
- Redes de colaboração internacional.

Além da visão geral quantitativa, foi realizada uma discussão temática descritiva e qualitativa. Para o cenário global, embora a amostra inicial fosse composta por 263 artigos, 13 documentos foram excluídos por não terem foco no CDR, resultando num conjunto final de 250 artigos analisados. Para o cenário brasileiro, todos os 16 artigos foram incluídos e analisados.

Para apoiar a discussão, as categorias e subcategorias temáticas foram desenvolvidas indutivamente, com base no conteúdo dos artigos selecionados, e estruturadas seguindo os princípios metodológicos propostos por Carlomagno e Rocha (2016). A Tabela 1 resume as categorias aplicadas na análise, juntamente com as respectivas subcategorias e foco temático.

Tabela 1. Categorias e subcategorias desenvolvidas de forma indutiva para a classificação de artigos.

Categoria	Subcategoria	Descrição
Técnica	Combustão	Análise e estudo da combustão direta de CDR
	Pirólise	Estudos focados na decomposição térmica do CDR na ausência de oxigênio.
	Gaseificação	Estudos envolvendo a conversão térmica de CDR em gás de síntese sob atmosfera controlada.
	Co-combustão	Estudos que utilizam CDR em combinação com outro combustível.
	Carbonização	Estudos que abordam o pré-tratamento térmico de CDR.
	Tecnologias emergentes	Estudos com tecnologias não convencionais ou inovadoras.
Ambiental	Emissões atmosféricas	Foco nos poluentes liberados durante a conversão de CDR.
	Avaliação do Ciclo de Vida	Estudos comparando impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.
	Análise de risco ambiental	Estudos que identificam riscos ambientais não diretamente relacionados às emissões atmosféricas.
Viabilidade	Viabilidade Econômica	Estudos avaliando custos, retorno financeiro ou viabilidade de implementação de CDR.
	Análise de Custo Benefício	Aplicação de indicadores econômicos e comparação entre cenários.
Caracterização	Químico-físico	Determinação de propriedades físicas e químicas: umidade, cinzas, densidade etc.
	Energético	Avaliação do poder calorífico e comportamento térmico (PCI, TGA, DSC).
	Composição elementar e traços	Presença de metais pesados, cloro, enxofre ou outros elementos críticos.
	Classificação ou padrões	Classificação de CDR com base em normas técnicas.
Aplicações	Fábricas de cimento	Utilização de CDR como combustível alternativo na produção de clínquer ou cimento.
	Uso agrícola ou ambiental	Aplicações de CDR ou subprodutos como fertilizante, adsorvente ou condicionador de solo.
	Produção de materiais	Uso de CDR ou cinzas em cimento, tijolos,

		catalisadores ou outros materiais.
	Tratamento mecânico-biológico (MBT)	Estudos sobre processos de separação e secagem para produção de CDR.
	Políticas e estratégias públicas	Avaliação de quadros jurídicos, estratégias políticas ou aspetos regulatórios.
Gestão de resíduos	Mineração de aterros sanitários	Estudos que abordem a recuperação de RSU dispostos em aterros sanitários, visando a produção de CDR, o reaproveitamento de frações recicláveis.
	Comparação entre cenários de gestão	Comparação entre modelos de gestão de RSU com e sem uso de CDR.
	Incêndios / Explosões	Estudos que analisam o risco de inflamabilidade ou explosão associado ao CDR.
Segurança / Riscos	Corrosão / Incrustações	Estudos que avaliam corrosão ou depósitos de materiais em equipamentos causados pelo uso de CDR.
	Termodinâmico / Cinética	Modelagem matemática visando prever o comportamento de processos térmicos envolvendo CDR.
	Computacional	Estudos envolvendo simulações computacionais de processos que incluem CDR.
Modelos / Simulações	Regressão empírica preditiva	Estudos que utilizam modelos estatísticos preditivos para fins estratégicos, baseados exclusivamente em dados empíricos.
	Multicritério	Estudos utilizando métodos de decisão multicritério para avaliação de CDR.

Fonte: Autoria própria.

A análise interpretativa teve como objetivo destacar abordagens de investigação, tecnologias, focos regionais e contextos de aplicação representativos associados a cada grupo temático.

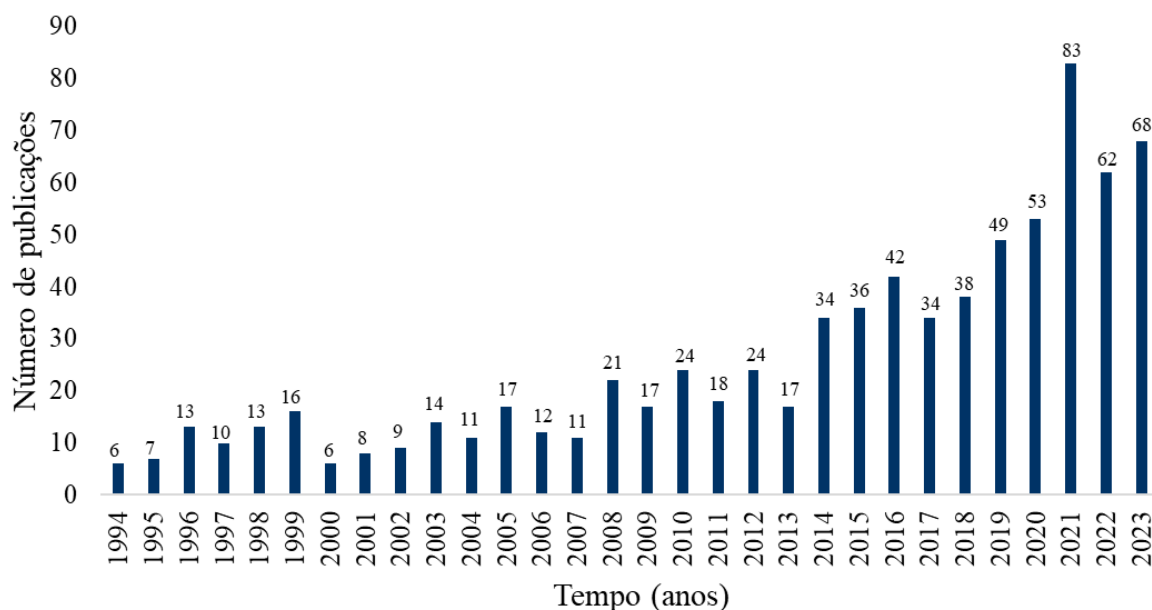
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Cenário global de pesquisa sobre o CDR

4.3.1.1. Evolução da produção científica

Com base nos dados obtidos a partir da pesquisa sistematizada, foi possível analisar como os 774 artigos se distribuem ao longo do tempo (Figura 2).

Figura 2. Artigos publicados sobre o CDR ao longo do tempo no cenário global.



Fonte: Autoria própria.

Observou-se que 40,70% dos 774 artigos foram publicados entre 2019 e 2023; 23,77% entre 2014 e 2018; 22,35% entre 2004 e 2013; e 13,18% entre 1994 e 2003. Essa distribuição indica um crescente interesse global na pesquisa sobre o CDR ao longo do tempo, com um pico notável em 2021, quando 83 artigos foram publicados. Uma possível explicação para este pico em 2021 pode ser os efeitos da pandemia de COVID-19, que levou a um aumento global da produção de artigos.

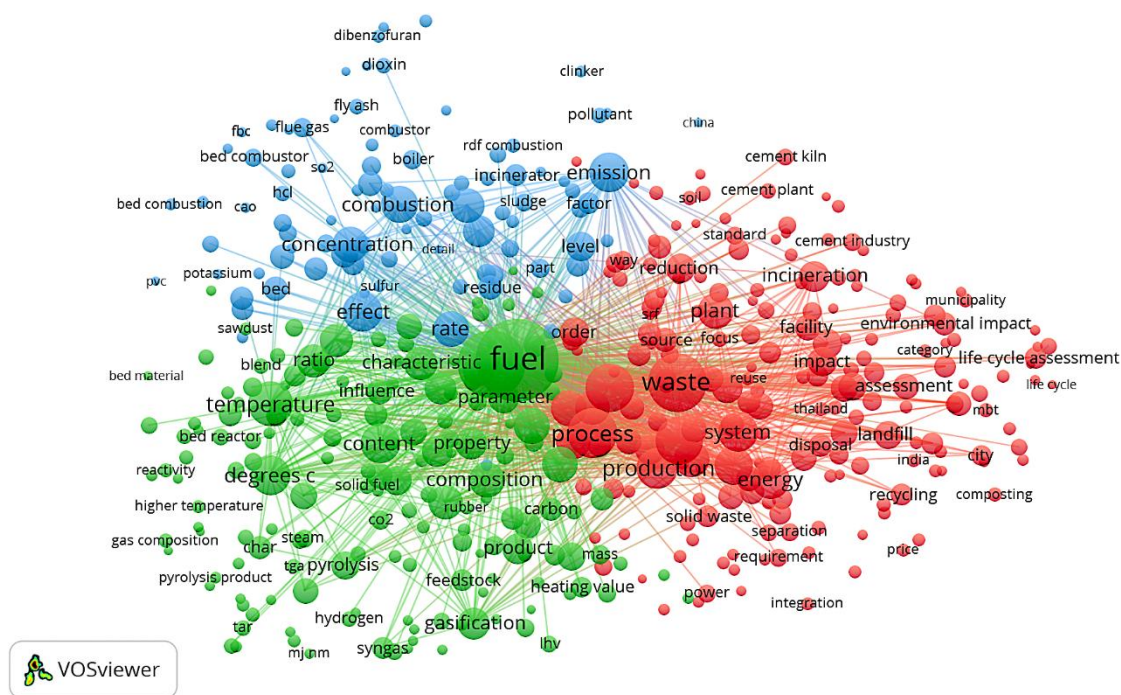
4.3.1.2. Áreas de pesquisa e principais temas

A categorização fornecida pela base de dados Web of Science identificou 58 áreas de pesquisa associadas a publicações sobre o CDR. As categorias principais foram Ciências Ambientais (334 artigos), Combustíveis e Energia (245 artigos) e Engenharia Ambiental (236 artigos).

Para melhor caracterizar as áreas e os temas de investigação, foram gerados gráficos de coocorrência utilizando termos extraídos dos resumos e títulos das publicações selecionadas. A partir do conjunto de dados global, foram identificados 16.817 termos. Aplicando um limiar de relevância de um mínimo de dez ocorrências, foram retidos 487

termos. Posteriormente, os termos genéricos (*por exemplo, artigo, estudo, investigação*) e nomenclaturas do CDR foram excluídos, resultando num conjunto final de 449 termos para a construção do grafo (Figura 3).

Figura 3. Grafo de coocorrência de palavras para o cenário global.



Fonte: Autoria própria.

A partir do grafo foi possível observar a formação de três *Clusters*, identificados por cores diferentes. Os *Clusters* agrupam os arquivos por afinidade, permitindo que sejam entendidos como áreas temáticas amplas. Além disso, a interpretação do grafo envolve a observação do tamanho dos círculos (quanto maior, mais frequente é o termo) e a largura das linhas (quanto mais largas, maior a interação entre os termos).

Observou-se que o maior agrupamento, representado pela cor vermelha, contém 196 termos. Entre eles estão: *Resíduos Sólidos Urbanos, Sistema, Incineração, Aterro sanitário; Recuperação de energia, Gestão, Avaliação do Ciclo de Vida, Estudo de caso, Indústria de cimento e Impacto ambiental*. A mesma análise pode ser aplicada aos outros: *Cluster 2* (verde), com 163 termos, incluindo *Combustível, Composição, Característica, Caracterização, Valor calorífico, Pirólise, Gaseificação e Gás de síntese*; e *Cluster 3* (azul), com 90 termos, incluindo *Combustão; Emissão; Carvão vegetal; Co-combustão; Forno; Cinzas volantes; Cloro; Processo de combustão; Caldeira e Lodo de esgoto*.

Ressalta-se que é possível relacionar os *Clusters* às categorias descritas anteriormente. No entanto, devido à existência de categorias que podem abranger vários assuntos, como *Ciências Ambientais* e *Engenharia Ambiental*, a classificação torna-se ampla, levando em consideração a afinidade entre termos e áreas de conhecimento.

No cenário global, o CDR é abordado em temas relacionados ao meio ambiente e à energia, com forte representação de estudos focados na gestão de resíduos (*Cluster 1*), bem como na caracterização de combustíveis e processos de conversão (*Clusters 2 e 3*).

O *Cluster 1* centra-se principalmente nas práticas de gestão de resíduos e nos impactos ambientais associados à eliminação de RSU, incluindo aterros sanitários e estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. O *Cluster 2* centra-se na caracterização do CDR como combustível, explorando propriedades como composição e poder calorífico no contexto de processos de conversão térmica, como pirólise e gaseificação.

No *Cluster 3*, observou-se termos relacionados com a combustão direta do CDR e a sua co-combustão com outros materiais, como o lodo de esgoto. Além disso, os termos *cloro*, *cinzas*, *emissões* e *corrosão* chamam a atenção para desafios específicos associados à combustão do CDR, incluindo emissões de partículas e gases do efeito estufa (GEE), bem como danos em fornos e equipamentos causados pela libertação de cloro e outros componentes corrosivos. Estas questões abrangem desafios que continuam a complicar, ou mesmo a impedir, uma utilização mais ampla do CDR.

Em resumo, a análise de coocorrência global revela dois eixos temáticos amplos: um centrado na gestão de resíduos e no impacto ambiental (*Cluster 1*) e outro que abrange a caracterização e a utilização energética do CDR (*Clusters 2 e 3*), incluindo processos de conversão térmica e desafios relacionados com a combustão.

4.3.1.3. Principais periódicos

No cenário global, os artigos selecionados foram publicados em 228 periódicos. O *Waste Management* liderou com 82 publicações, seguido pelo *Fuel* (48 artigos), *Energies* (32 artigos) e *Journal of Cleaner Production* (30 artigos).

A maioria dos periódicos com o maior número de artigos é bem conceituada, com uma classificação internacional elevada (Fator de Impacto (FI) > 5,00). Observou-se que 27,78% do total de artigos está publicado em periódicos conceituados nas suas áreas e bem

posicionados globalmente. Isto indica que o tema é relevante e que a maioria das pesquisas relacionadas é de qualidade superior.

Também foi possível observar uma relação entre os principais periódicos e as áreas de pesquisa identificadas nas análises anteriores. As principais áreas associadas aos principais periódicos no cenário global são *Engenharia Ambiental*, *Ciências Ambientais*, *Energia e Combustíveis* e *Engenharia Química*.

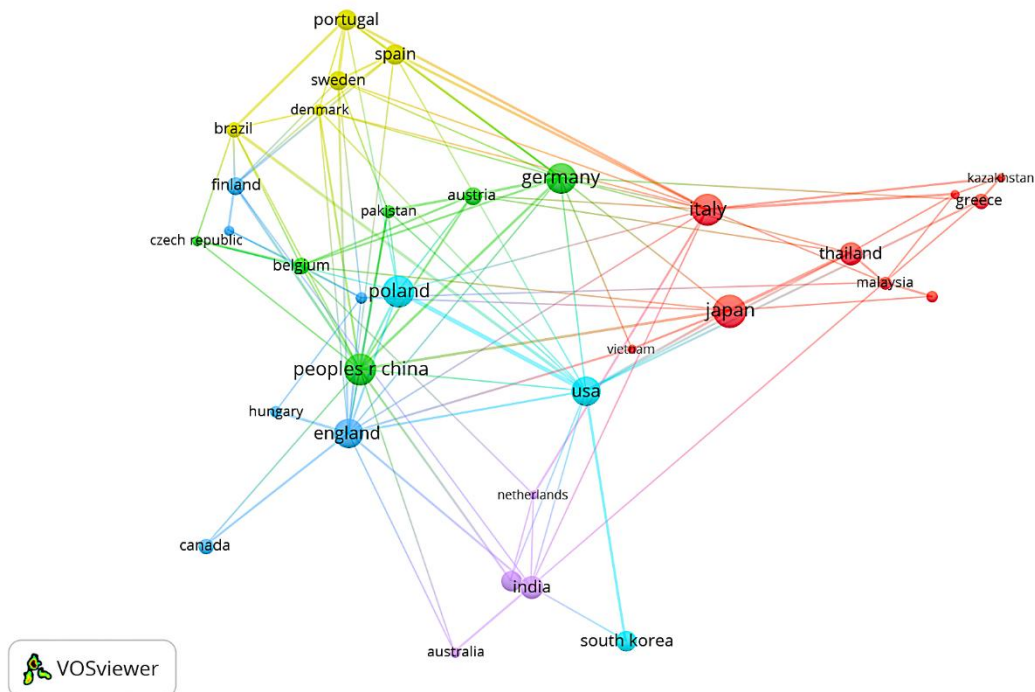
4.3.1.4. Distribuição geográfica e redes de colaboração

A partir da análise da distribuição dos trabalhos em todo o mundo, verificou-se que 65 países/regiões foram responsáveis pelas publicações. O Japão e a Itália são os dois primeiros, com 72 e 70 artigos, respectivamente, representando 18,3% do total da amostra. A China, a Polónia e os EUA empatam em terceiro lugar, com 65 artigos cada. O Brasil está posicionado em 19º lugar, com 16 publicações (2,1% do total da amostra). No geral, pode-se dizer que a maioria das pesquisas relacionadas ao CDR está concentrada na Ásia, Europa e América do Norte.

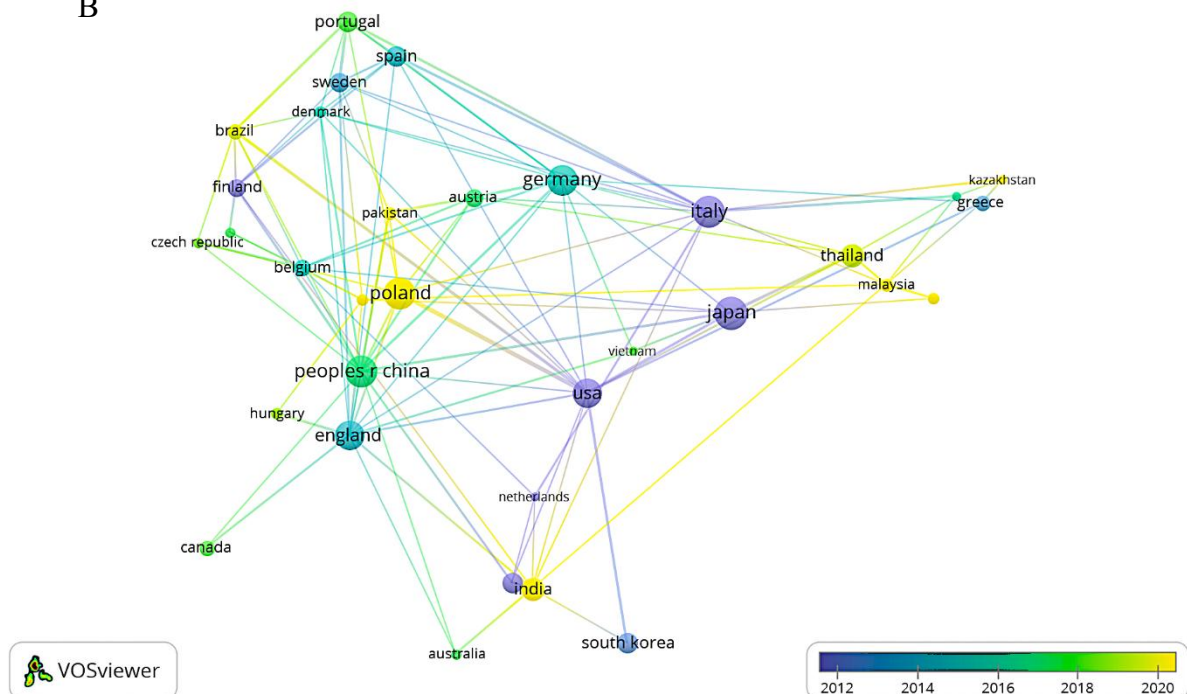
Um grafo de coautoria foi criado para identificar colaborações entre países (Figura 4A) e verificar como as publicações são distribuídas ao longo do tempo (Figura 4B). Para a criação do grafo, foram incluídos países com pelo menos cinco trabalhos em comum, resultando na seleção de 35 dos 65 países, formando seis *Clusters*. Os *Clusters* indicam a proximidade entre as linhas de pesquisa, enquanto as linhas indicam a colaboração entre os países.

Figura 4. (A) Gráfico de coautoria entre países e (B) gráfico de distribuição temporal das publicações nos países.

A



B



Fonte: Autoria própria.

Os *clusters* foram formados da seguinte forma: o *cluster* 1 (vermelho) é composto por nove países (Japão, Itália, Tailândia, Grécia, Malásia, Indonésia, Vietname, Cazaquistão e

Roménia); o *cluster* 2 (verde) é composto por seis países (China, Alemanha, Áustria, Bélgica, Paquistão e República Checa); o *cluster* 3 (azul) é composto por seis países (Inglaterra, Finlândia, Canadá, Hungria, Egito e Rússia); o *cluster* 4 (amarelo) é composto por cinco países (Portugal, Espanha, Suécia, Brasil e Dinamarca); o *cluster* 5 (roxo) é composto por quatro países (Índia, Taiwan, Austrália e Países Baixos); e o *cluster* 6 (azul claro) é composto por três países (Polónia, EUA e Coreia do Sul).

O Japão, além de ser o país com o maior número de arquivos (72) no conjunto analisado, é também um dos países que mais contribui com investigadores internacionais. Ressalta-se que o país é responsável por um grande número das publicações mais antigas deste grupo analisado (Figura 4B), com um ano médio de publicação em 2007. Em contrapartida, os principais países dos outros *Clusters* têm médias de publicação mais recentes: 2014 (Inglaterra), 2017 (China e Portugal) e 2019 (Índia e Polónia).

O Brasil tem média de publicação no ano de 2019 e colaborou principalmente com Portugal e os EUA. É importante enfatizar que as colaborações entre *clusters* indicam que os investigadores contribuem para o trabalho uns dos outros em diferentes tópicos, conforme mostrado na Figura 4A. Os intercâmbios e colaborações internacionais são altamente valiosos, pois aumentam ainda mais a disseminação do conhecimento.

4.3.1.5. Categorização temática e interpretação descritiva

Com base na análise e categorização temática dos 250 artigos incluídos nesta etapa, a produção científica sobre CDR foi classificada em oito categorias principais e subcategorias correspondentes. Esta estrutura permitiu identificar os focos de investigação predominantes e observar como diferentes áreas temáticas têm sido abordadas na literatura.

Seguindo os critérios de categorização propostos por Carlomagno and Rocha (2016), cada artigo foi classificado em uma única categoria principal que melhor representasse seu foco temático central. Essa abordagem visou manter a clareza e a exclusividade entre os grupos temáticos, evitando classificações sobrepostas. No entanto, vários estudos apresentaram dois focos distintos, mas igualmente relevantes. Nesses casos, uma categoria secundária foi atribuída para refletir a dimensão temática adicional do artigo. Essa classificação dupla foi aplicada apenas quando ambos os temas foram claramente abordados no estudo. Os dados relacionados à categorização temática estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Distribuição dos artigos por temáticas, categorias e subcategorias (cenário global).

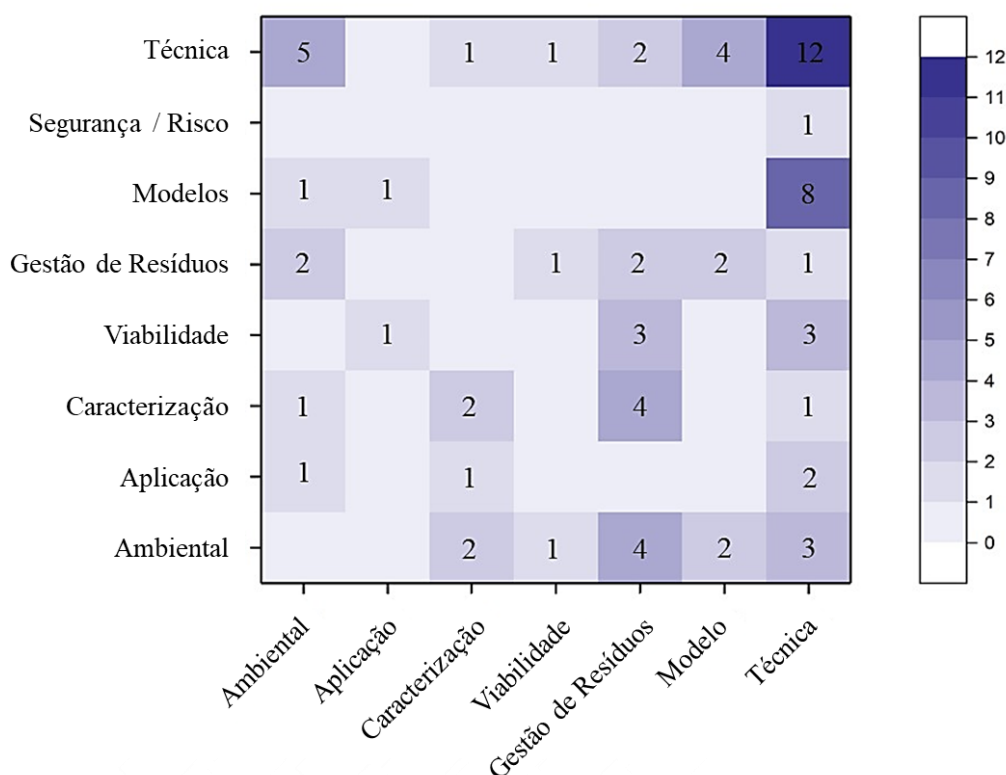
Categoria principal	Artigos categ. principal	Artigos categ. secundária	Subcategoria	Artigos subcateg. principal	Artigos por subcateg. secundária
Técnica	85	25	Combustão	14	1
			Pirólise	19	4
			Gaseificação	16	8
			Cocombustão	14	4
			Carbonização	2	2
			Tecnologias emergentes	20	6
Ambiental	46	12	Emissões atmosféricas	31	5
			Avaliação do ciclo de vida	10	6
			Análise de risco ambiental	5	1
Viabilidade	4	7	Viabilidade econômica	2	6
			Análise de custo-benefício	2	1
Caracterização	23	8	Físico-químico	11	4
			Energética	5	4
			Composição elementar e traços	4	0
			Classificação ou padrões	3	0
Aplicações	17	4	Fábricas de cimento	3	1
			Uso agrícola ou ambiental	7	0
			Produção de materiais	7	3
Gestão de resíduos	36	8	Tratamento biológico mecânico	10	1
			Políticas e estratégias públicas	4	1
			Mineração em aterros sanitários	7	1
			Comparação entre cenários de gestão	15	5
Segurança / Risco	8	1	Incêndios / Explosões	6	0
			Corrosão / Incrustação	2	1
Modelos / Simulações	31	10	Termodinâmica/Cinética	8	4
			Computacional	13	3
			Regressão preditiva empírica	4	3
			Multicritério	6	0
Total	250	75		250	75

Fonte: Autoria própria.

Setenta e cinco artigos foram classificados em duas categorias devido ao seu foco multidisciplinar. Exemplos incluem estudos que realizaram uma caracterização abrangente do CDR, incluindo aspectos físicos, químicos e energéticos; aqueles que combinaram simulações computacionais com análises experimentais subsequentes; e aqueles que avaliaram uma técnica específica, além de seus efeitos adversos, como corrosão de equipamentos, entre outros.

A Figura 5 apresenta a distribuição cruzada dos 75 artigos classificados em uma categoria principal e secundária. Uma sobreposição notável ocorre entre as categorias Técnica/Técnica, que incluem 12 artigos. Esses estudos geralmente avaliaram múltiplas técnicas, como pirólise e combustão, ou exploraram processos convencionais apoiados por tecnologias emergentes, como a gaseificação assistida por plasma.

Figura 5. Mapa de calor da coocorrência entre categorias principais (linhas) e categorias secundárias (colunas), indicando o número de artigos que abordam simultaneamente ambas as categorias.



Fonte: Autoria própria.

As seções a seguir apresentam uma discussão descritiva de cada categoria temática identificada na classificação, da mais representativa à menos representativa. Para cada categoria, são destacadas as principais tendências de pesquisa e áreas de foco, acompanhadas de exemplos representativos de artigos que ilustram abordagens, tecnologias ou estudos de caso típicos abordados na literatura.

a) Técnica

Esta foi a principal categoria identificada no conjunto de artigos classificados, refletindo o forte foco dos estudos sobre CDR em processos tecnológicos e avaliação de desempenho. Os artigos desta categoria abordam o uso do CDR em uma perspectiva experimental ou aplicada, com ênfase em processos térmicos convencionais, incluindo carbonização, gaseificação, pirólise, combustão e co-combustão. Esses estudos geralmente tiveram como objetivo avaliar o desempenho energético do CDR, suas propriedades como combustível, os produtos gerados e as condições operacionais mais adequadas. Por exemplo, Laohalidanond *et al.* (2021) descobriram que a torrefação do CDR seguida pela produção de gás de síntese produz um combustível de qualidade, representando uma solução viável para eliminar os resíduos descartados em aterros sanitários.

Esta categoria também inclui estudos que apresentam tecnologias emergentes ou não convencionais. Um número considerável de artigos utilizou plasma em combinação com gaseificação como forma de melhorar as propriedades dos produtos resultantes. Exemplos incluem os estudos de López-Sabirón *et al.* (2015) e Materazzi e Taylor (2019). Além do plasma, o uso de tecnologias emergentes também está associado a processos de pré-tratamento, como a redução do teor de umidade por meio da bio-secagem baseada em aeração (Bhatsada *et al.*, 2023; Payomthip *et al.*, 2022) e a redução de microrganismos dos RSU através da ozonização (Wolny-Koładka; Żukowski, 2019) e autoclavagem (Hung *et al.*, 2013) para produção subsequente de CDR.

A presença desses trabalhos indica que novas formas de facilitar o uso do material são cada vez mais procuradas. Os estudos exploram métodos que vão dos mais simples aos mais complexos, que exigem mais recursos. Observou-se também que alguns trabalhos examinam a viabilidade de aplicar esses métodos em aterros sanitários.

b) Ambiental

A segunda maior categoria apresenta artigos que tiveram como foco avaliar os impactos ambientais causados pela produção e utilização do CDR, assim como pelos resíduos gerados durante seu uso (cinzas). Os artigos inseridos nessa categoria são majoritariamente destinados aos estudos das emissões atmosféricas provenientes da queima do CDR. Piao *et al.* (2000), por exemplo, avaliaram o comportamento do cloro durante a combustão do CDR no processo de leito fluidizado, verificando sua interação com o potássio, sódio e cálcio. Os autores constataram as frações de cloro capturadas pelos elementos e as que foram descarregadas com o gás de combustão. Bonfanti *et al.* (1994), Ishikawa *et al.* (2007) e Kwak *et al.* (2011) investigaram o comportamento, interação e remoção dos compostos de cloro durante a queima do CDR. O notável volume de trabalhos relacionados com as emissões comprova a preocupação acerca dos problemas operacionais e ambientais ainda existentes com o uso do CDR.

Trabalhos que utilizaram da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) também se destacaram. A metodologia foi aplicada em diferentes contextos. No entanto, tiveram o objetivo central de verificar a viabilidade de uso do CDR, propiciando comparações com outros combustíveis. Marques *et al.* (2021) realizaram uma avaliação econômica e ambiental da gaseificação de CDR para geração de eletricidade a partir de diferentes cenários de gaseificação. Já Çankaya (2020) utilizou da ACV para avaliar os impactos ambientais do uso de combustíveis alternativos na produção de cimento, incluindo CDR e lodo seco termicamente.

Os trabalhos da temática ambiental também exploram os riscos associados a um resíduo comum do CDR: suas cinzas. Rocca *et al.* (2012) avaliaram a composição das cinzas de fundo provenientes da incineração e gaseificação assim como sua lixiviação e capacidade de tamponamento. Xiao *et al.* (2023) investigaram especificamente a distribuição e os riscos associados ao cromo (Cr) e zinco (Zn) nas cinzas de CDR proveniente de duas fontes, fornos a carvão pulverizado e gaseificadores. Já Cardoso *et al.* (2008) avaliaram a lixiviabilidade de minerais precipitáveis de cinzas de fundo e volantes a fim de verificar o potencial de formação de depósitos minerais em sistemas de coleta de chorume.

c) Gestão de resíduos

Os artigos inseridos nessa categoria incluíram o CDR em estratégias mais amplas de gestão de resíduos. Uma considerável parte dos trabalhos abordou o Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) de resíduos como estratégia de gestão, discutindo a viabilidade de aproveitamento de materiais de interesse (como as frações metálicas) e a produção de CDR (Nithikul; Karthikeyan; Visvanathan, 2011; Punin; Maneewan; Punlek, 2014; von Felde; Doedens, 1999).

Foram encontrados também artigos que analisaram diferentes estratégias e cenários de gestão a fim de verificar a viabilidade de inserir um sistema de produção de CDR em escala municipal. Os artigos utilizaram dados reais de diferentes cidades do mundo. Como exemplo, Dong e Lee (2009) analisaram a quantidade de RSU gerados em uma grande cidade industrial da Coreia do Sul, assim como suas propriedades e potencial energético. Os autores concluíram que se 50% ou 100% dos resíduos fossem utilizados como combustível, a cidade industrial poderia economizar aproximadamente 17,6% e 35,2%, respectivamente, dos custos totais de descarte atuais. Já Nizami *et al.* (2017) discutem sobre o desenvolvimento de uma biorrefinaria de resíduos na cidade de Meca (Arábia Saudita) como uma solução integrada para tratar os RSU por meio de tecnologias como digestão anaeróbica, transesterificação, pirólise e produção de CDR.

Por fim, foram encontrados trabalhos que analisaram e discutiram a mineração de aterros fechados como forma de aproveitar o potencial energético dos resíduos dispostos. Essa temática se mostra relativamente nova, tendo a maioria dos trabalhos datada a partir de 2019. Chiou e Chen (2021) avaliaram resíduos de aterros de diferentes idades para verificar a viabilidade de produção de CDR. Os autores encontraram diferenças nas propriedades energéticas como a redução da temperatura de ignição (259 °C, 256 °C e 245 °C para aterros com um, cinco e dez anos, respectivamente). Prihartanto *et al.* (2023) também realizaram a caracterização de resíduos minerados de aterros para uso como fonte de energia, com ênfase na fração mais grosseira. Os autores realizaram um estudo de caso em escala piloto e relatam o potencial energético considerável apesar dos desafios como alta umidade e presença de cloro e metais pesados.

d) Modelagem / Simulações

A quarta mais representativa categoria agrupa estudos datados a partir de 2002, que empregaram diferentes tipos de modelagem para descrever, prever ou otimizar o comportamento do CDR em diversos contextos. Foram incluídos trabalhos que desenvolveram modelos termodinâmicos ou cinéticos para simular os processos de conversão térmica do CDR, bem como estudos que utilizam simulações computacionais para analisar parâmetros operacionais ou fluxos de processo. A exemplo destes, Huang *et al.* (2014) propuseram um modelo que avalia o comportamento térmico de componentes do CDR em condições de decomposição, permitindo inferir desempenho energético e parâmetros críticos do processo. Os autores concluíram ser um método promissor para otimizar os parâmetros do sistema de conversão térmica.

De Filippis *et al.* (2004) apresentaram uma simulação termodinâmica para prever a qualidade do gás de síntese (syngas) gerado na gaseificação em duas etapas de diferentes resíduos, incluindo o CDR. Os indicadores de qualidade do syngas analisados incluem o poder calorífico, a soma de H_2 e CO e a razão H_2/CO . Já Costa *et al.* (2018) apresentaram uma modelagem computacional de uma planta real de incineração de CDR, com foco no acoplamento entre a conversão termoquímica do combustível sólido e a combustão gasosa do syngas gerado.

Também estão inseridos trabalhos que utilizam modelos empíricos baseados em regressões preditivas, geralmente voltados à estimativa de propriedades do CDR a partir de análises estatísticas. Como exemplo, têm-se o trabalho de Luqman *et al.* (2023) onde os autores aplicaram uma regressão polinomial para estimar o poder calorífico do CDR com base na composição de resíduos regionais da Indonésia. Esse tipo de trabalho envolve o uso de modelos preditivos, mas baseado exclusivamente em dados empíricos, sem envolvimento de cinética ou simulações físico-químicas.

Por fim, foram considerados os estudos que aplicam abordagens multicritério, como métodos fuzzy, grey, AHP ou TOPSIS, para apoiar a tomada de decisão em cenários envolvendo múltiplas variáveis técnicas, ambientais ou econômicas. Por exemplo, Yap e Nixon (2015) utilizaram a análise multicritério para avaliar e comparar tecnologias de recuperação energética de RSU em dois contextos nacionais distintos: Reino Unido e Índia. Entre as tecnologias avaliadas estão incineração, gaseificação, digestão anaeróbica e recuperação de biogás de aterro. Os autores ressaltaram que a metodologia apresentada tem

um particular valor para os tomadores de decisão sobre a conversão de resíduos em energia, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento.

e) Caracterização

Embora muitos trabalhos em diferentes categorias realizem algum tipo de caracterização do CDR, aqui estão reunidos os estudos dedicados à análise detalhada das suas propriedades, que tiveram como objetivo compreender seu potencial como combustível e seu comportamento em diferentes aplicações. Dentre estes é possível citar trabalhos que realizaram caracterizações físico-químicas, avaliando parâmetros como granulometria, umidade, teor de cinzas, composição química e gravimétrica (Âriņa *et al.*, 2020; Lupa *et al.*, 2011; Ouigmane *et al.*, 2021; Rotter *et al.*, 2011).

Além disso, também foram encontrados trabalhos que exploram análises energéticas, como poder calorífico e eficiência de combustão, e a determinação da composição elementar, incluindo traços metálicos ou contaminantes. Como exemplo, cita-se o trabalho de Schwarzböck *et al.* (2016) onde os autores focam na precisão analítica da caracterização elementar do CDR, com ênfase na determinação da fração biogênica, importante para fins regulatórios e de emissão de GEE. Na temática de análises elementares, além do CDR, suas cinzas também são investigadas (Reinmöller *et al.*, 2017).

Outra vertente relevante inclui os estudos voltados à classificação do CDR segundo normas técnicas, diretrizes ou critérios regulatórios. São três trabalhos inseridos aqui. Vounatsos *et al.* (2015) relataram que a necessidade de padronização do CDR torna-se gradualmente importante no sudeste da Europa, uma vez que o tema WtE está em desenvolvimento. Os autores fizeram análises minuciosas para determinação de cloro e de teor de metais pesados em amostras de CDR além de análises técnico-econômicas nas usinas de produção do material com a finalidade de propor uma abordagem que possa garantir a viabilidade econômica e regulatória de usinas de CDR.

Bessi *et al.* (2016) apresentam uma análise sobre as normas italianas que tratam do CDR e do *Solid Recovery Fuels* (SRF), ou Combustível Sólido Recuperado em livre tradução. Os autores relataram que apenas o fluxo seco produzido como saída pela usina de TMB se enquadrava como CDR e estava adequado para conversão energética e que a nova legislação, que regulamentava os SRF, era benéfica pois minimizaria ainda mais o volume de resíduos destinados aos aterros. Di Lonardo *et al.* (2016) também avaliaram a qualidade dos fluxos de saída de usinas de TMB para posterior classificação como CDR e SRF.

De modo geral, essa categoria é fundamental para estabelecer as bases técnicas e comparativas que sustentam outras aplicações e análises envolvendo o CDR. Foram observadas questões em comum entre os artigos, como os relatos sobre a grande heterogeneidade e dificuldade de amostragem do material. Verificou-se também que a importância de se conhecer as características do CDR vai além do entendimento do seu comportamento como combustível; ela se torna obrigatória para adequação do material nas normativas de utilização.

f) Aplicações

A categoria *Aplicações* abrange estudos que investigam o uso final do CDR em diferentes contextos práticos, destacando seu potencial como insumo energético ou material. Foram inseridas aqui, também, as aplicações para as cinzas do CDR. No contexto energético, foram contabilizados três estudos que tratam sobre a utilização do CDR como combustível nas cimenteiras.

Streier *et al.* (2023) avaliaram o CDR como combustível no forno de clínquer, em um contexto industrial com foco direto na qualidade do produto final (clínquer) e na redução de emissões por oxi-combustão. Kara (2012) realizou testes industriais em escala real avaliando a substituição do coque de petróleo por CDR em fornos de clínquer, abordando tanto os aspectos ambientais quanto os econômicos. Haas e Weber (2010) discutiram sobre o comportamento térmico do CDR em fornos de cimento, com foco na zona de sinterização, substituição de combustível e modelagem de combustão, levando em consideração suas propriedades (Poder Calorífico Inferior e tamanho das partículas).

Embora o uso do CDR seja naturalmente relacionado à aplicação energética, também foram encontrados estudos que exploram outras alternativas. Na subcategoria de aplicações agrícolas ou ambientais tem-se o trabalho de Porsnovs *et al.* (2020) onde foi realizada a carbonização do CDR para posterior aplicação do biochar como adsorvente de hidrocarbonetos em águas residuais oleosas. Akiyama *et al.* (2004) realizaram a carbonização do CDR e avaliaram sua capacidade de recuperação de nanopartículas, comparando com outros materiais carbonáceos, para limpeza de gases residuais de combustão. Os autores concluíram que, devido a sua estrutura única, o CDR carbonizado foi o mais eficaz para recuperar nanopartículas entre várias amostras e poderia ser usado para recuperar pó de ferro fino gerado em fornos elétricos. Ainda, Tagoe *et al.* (2008) exploraram efeitos agrônômicos do uso de CDR carbonizado como condicionador de solo para culturas de soja e feijão-caupi,

comparando com esterco de frango carbonizado e avaliando a interação com fertilizante potássico.

Há também a subcategoria que contempla pesquisas que empregaram o CDR na produção de materiais diversos. Destacam-se os estudos voltados à aplicação das cinzas do CDR como aditivo do cimento Portland (Berg; Neal, 1998; Chang *et al.*, 1999; Moustafa *et al.*, 2021); à produção de materiais carbonáceos funcionais a partir do CDR e seu uso como componente ativo de um catalisador (Tsyntsarski *et al.*, 2022); à incorporação do CDR como aditivo em misturas cerâmicas para a produção de tijolos (Makrygiannis *et al.*, 2023); dentre outros.

Observou-se que as alternativas inovadoras citadas, principalmente para produção de materiais, são datadas recentemente. Isso indica que os pesquisadores ainda buscam novas formas de aplicar o CDR, propiciando uma maior abertura para utilização dos resíduos. Esses estudos evidenciam as possibilidades de valorização do CDR, contribuindo para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e circulares.

g) Segurança / Risco

A categoria *Segurança / Risco* reúne estudos que abordaram os riscos associados ao uso do CDR do ponto de vista operacional. A maioria dos trabalhos incluídos aqui investigaram a ocorrência de incêndios e explosões frequentemente relacionados ao armazenamento ou manuseio inadequado do material, especialmente devido à presença de compostos voláteis ou instabilidade térmica. Januszewski e Brzezińska (2021) relataram que nos últimos 30 anos houve um crescimento relacionado ao uso do CDR como combustível alternativo e que esse crescimento está acompanhado por uma escalada de incidentes industriais relacionados a incêndios e explosões.

Fu *et al.* (2005) investigaram, de forma experimental, o risco de autocombustão do CDR na presença de água, com foco específico na prevenção de incêndios acidentais. Shimizu *et al.* (2009) buscaram entender os mecanismos de geração e acúmulo de calor em pilhas de CDR. O trabalho abordou aspectos como temperaturas de autoignição, autooxidação e calor acumulado. Observou-se com a análise dos trabalhos que o fenômeno analisado é especificamente de segurança, não de conversão energética, e os dados são usados para fundamentar ações de mitigação de riscos em armazenamento.

Além destes, compõem a categoria *Segurança / Risco* estudos que analisaram especificamente problemas como corrosão e incrustações em equipamentos durante o uso do

CDR, destacando os impactos sobre a eficiência dos sistemas e a durabilidade dos componentes. Krause *et al.* (1993) fizeram uma análise sobre a corrosão de ligas metálicas em sistemas que utilizam CDR como combustível. Já Maciejczyk *et al.* (2023) foram além de apenas investigar os efeitos corrosivos durante a queima. Os autores avaliaram a eficiência de revestimentos protetores metálicos contra os efeitos corrosivos induzidos pelo cloro presente nas cinzas. O objetivo foi mitigar danos estruturais e prolongar a vida útil de equipamentos.

A classificação de estudos nessa categoria indica que o uso do CDR deve ser regulamentado não só para minimizar os riscos ambientais associados, mas também para evitar acidentes de trabalho e prevenir danos em processos industriais. Observou-se, portanto, que a busca por melhorias na segurança operacional é um tópico de interesse entre os pesquisadores que trabalham com o CDR.

h) Viabilidade

Na oitava e última categoria estão compreendidos os estudos que avaliaram a viabilidade econômica do uso do CDR em diferentes contextos. Uma grande parte dos trabalhos classificados nessa categoria apresentaram análises integradas que combinam estimativas de custo-benefício, retorno financeiro, eficiência energética e impactos ambientais, tornando-os conectados com os temas de ambientais e de gestão de resíduos.

Estão inseridos artigos que avaliaram cenários de implantação de plantas de tratamento de resíduos com produção de CDR, levando em consideração alguns parâmetros como valor calorífico, redução de volume e margem de lucro. Por exemplo, têm-se o trabalho de Budihardjo *et al.* (2022) que avaliaram a viabilidade econômica, ambiental e técnica da implantação de uma planta de CDR a partir de resíduos de aterro; e de Sadhukhan e Martinez-Hernandez (2017) que avalia um sistema inovador de tratamento mecânico-biológico-químico (biorrefinamento de RSU).

Outros trabalhos comparam rotas tecnológicas em termos de custos operacionais e investimento inicial. Haydary *et al.* (2023) fizeram uma avaliação técnica e econômica comparativa entre duas rotas de purificação de syngas oriundo da gaseificação de CDR, utilizando o método de secagem em alta temperatura e o método de absorção em baixa temperatura. Danthurebandara *et al.* (2015) realizaram uma avaliação ambiental e econômica da gaseificação por plasma aplicada ao CDR proveniente de um aterro minerado. A comparação com a incineração convencional foi feita por meio de ACV e *Life Cycle Costing* (LCC), o que indica sua multidisciplinaridade. O estudo destaca tanto os impactos ambientais

(emissões, uso de oxigênio, destinação do resíduo) quanto os fatores econômicos (eficiência elétrica, custo de investimento, preço dos produtos).

Em comum, esses trabalhos buscam identificar se o uso do CDR representa uma alternativa economicamente competitiva e sustentável em comparação com opções tradicionais de destinação ou fornecimento energético além de analisar as tecnologias convencionais e emergentes. Esses trabalhos contribuem para entender o potencial competitivo do CDR frente a alternativas convencionais de destinação de resíduos e fornecimento energético.

4.3.1.6. Considerações, desafios, lacunas e direções futuras de pesquisa

As categorias *Técnica* e *Ambiental* são as mais representativas e aparecem consistentemente ao longo de todo o período de amostragem. A persistência destas sugere que a investigação nessas áreas acompanhou os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novas metodologias de teste e implementação.

Foi possível notar que, embora o uso principal do CDR seja para geração de energia em formas convencionais, há interesse no desenvolvimento de novas tecnologias que ampliem suas possibilidades de utilização. Além disso, observou-se que há um desejo de aprimorar as propriedades do material para tornar seu uso cada vez mais viável.

Os principais desafios encontrados nos estudos referem-se a: 1) questões de heterogeneidade e complexidade do material, especificamente suas características físicas e químicas; 2) dificuldades relacionadas à implementação de sistemas eficientes de gestão de RSU para permitir a produção de CDR; 3) análises de custo-benefício para a implementação de sistemas que utilizam CDR como fonte de energia; e 4) aspectos legais e regulatórios envolvendo os RSU e o CDR. Essas foram as principais lacunas identificadas nos estudos, que precisam ser melhor exploradas em pesquisas futuras.

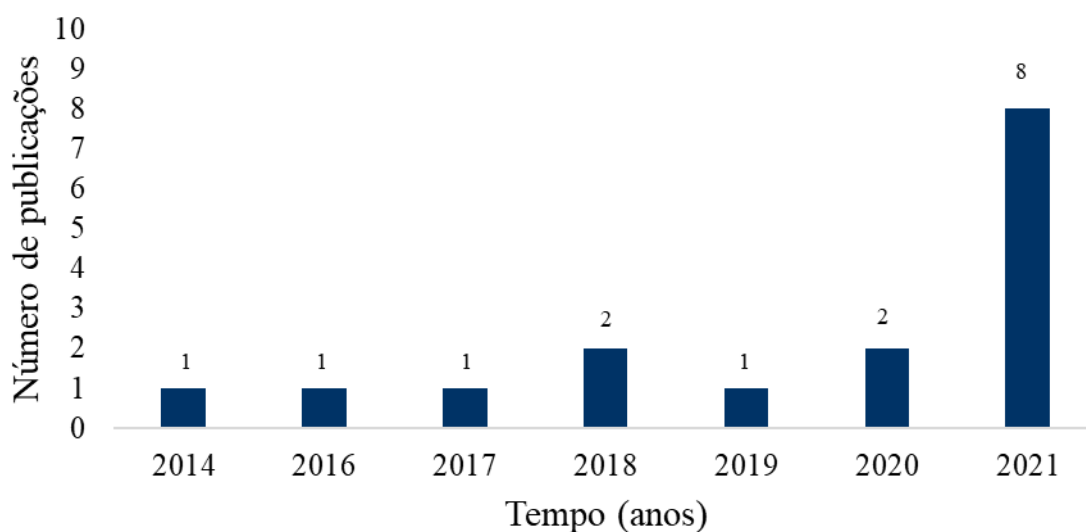
A complexidade do tema “CDR” se deve à sua heterogeneidade, diferentes fontes geradoras, presença de elementos nocivos, legislação regulatória, entre outros. Além disso, observou-se que ainda existem controvérsias quanto às definições e classificações do produto. A formação do CDR envolve inúmeras combinações de materiais e as condições em que esses materiais se encontram. Além disso, os padrões de consumo mudam ao longo do tempo e, consequentemente, a geração de resíduos também. Nesse sentido, as análises que buscam uma melhor compreensão desse tipo de material serão sempre significativas.

4.3.2. Cenário da pesquisa brasileira sobre o CDR

4.3.2.1. Tendências da produção científica no Brasil

A Figura 6 mostra como as publicações brasileiras estão distribuídas ao longo do tempo.

Figura 6. Número de artigos publicados sobre o CDR no Brasil ao longo do tempo.



Fonte: Autoria própria.

Foi possível constatar que o tema é recente, com publicações iniciadas em 2014, tendo um número baixo de publicações (16). As publicações anuais contínuas só começaram em 2016, embora essa sequência tenha sido interrompida em 2022.

Tal como no cenário global, 2021 destacou-se com o maior número de publicações (oito artigos). A maior parte da produção científica (68,75%) foi publicada entre 2019 e 2023, enquanto os restantes 31,25% correspondem ao período de 2014 a 2018.

4.3.2.2. Áreas de investigação emergentes e tópicos em destaque

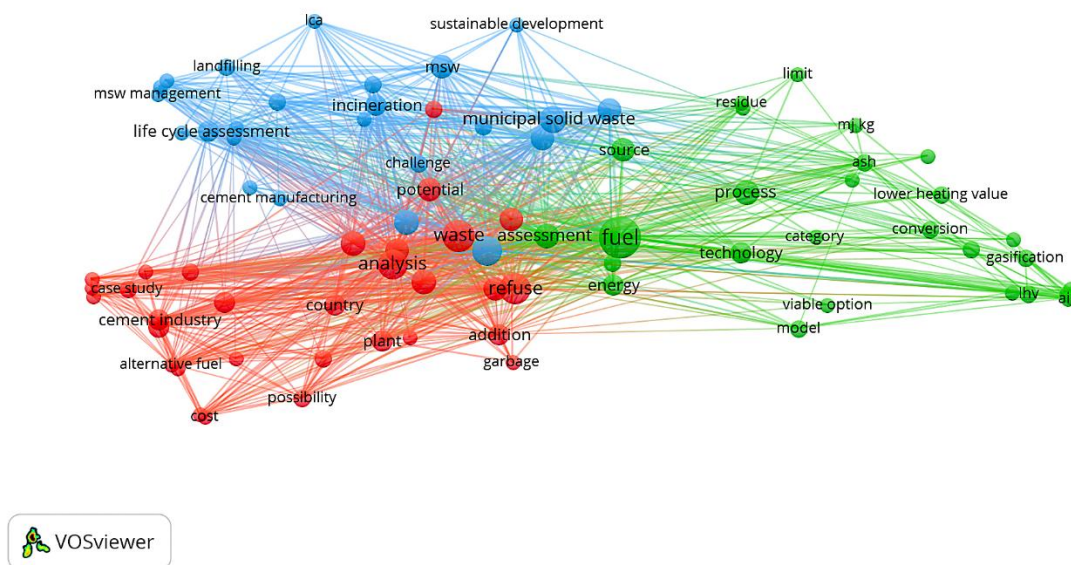
A categorização fornecida pela Web of Science identificou nove áreas de investigação associadas a publicações relacionadas com o CDR no cenário brasileiro. As principais categorias são: *Ciências Ambientais*, *Engenharia Ambiental* e *Ciência e Tecnologia Verde e*

Sustentável, com 11, 9 e 6 artigos, respectivamente. É importante notar que um único artigo pode ser classificado em mais de uma categoria.

Tanto no cenário global quanto no brasileiro, o campo das *Ciências Ambientais* liderou com o maior número de publicações. A categoria de *Energia e Combustíveis* ocupou o segundo lugar globalmente, enquanto no contexto brasileiro ocupa a quinta posição, colocando as grandes áreas relacionadas ao meio ambiente entre as três principais. Isso sugere que as publicações brasileiras sobre o CDR tendem a enfatizar as preocupações ambientais de forma mais proeminente do que as aplicações energéticas, que parecem ser o foco dominante no contexto global.

Também foi realizada uma análise de coocorrência para o cenário brasileiro, a fim de explorar os principais tópicos abordados nas publicações nacionais. A análise foi baseada em termos extraídos dos títulos e resumos dos artigos selecionados, resultando em um conjunto inicial de 695 termos. Para a criação do grafo, apenas os termos que apareceram pelo menos duas vezes foram considerados, reduzindo a lista para 98. Termos genéricos e nomenclaturas diretamente relacionados ao CDR foram excluídos, resultando em um conjunto final de 84 termos usados para traçar o grafo de coocorrência (Figura 7). A rede resultante ajudou a identificar os conceitos mais recorrentes e os focos temáticos dentro da produção científica brasileira sobre o CDR.

Figura 7. Grafo de coocorrência de palavras para o cenário brasileiro.



Fonte: Autoria própria.

O principal *cluster* (vermelho) contém 31 termos. Ele está focado na gestão de resíduos e disposição final, com termos como *Gestão de resíduos*, *Aterro sanitário*, *Indústria de cimento*, *Combustível fóssil* e *Estudo de caso*. A presença de *Indústria de cimento* e *Combustível alternativo* sugere que os estudos brasileiros exploraram aplicações práticas de CDR em contextos industriais, particularmente no coprocessamento.

O segundo *cluster* (verde) tem 29 termos e destaca o desenvolvimento tecnológico relacionado à recuperação de energia. Termos como *Tecnologia*, *Processo*, *Gaseificação*, *Gás de síntese*, *Energia elétrica*, e *Planta piloto* apontam para esforços experimentais para avaliar rotas de conversão térmica. Embora presentes, esses estudos são frequentemente contextualizados em avaliações mais amplas de viabilidade técnica e eficiência do sistema.

O terceiro *cluster* (azul) inclui 24 termos e aborda o tratamento de resíduos sólidos urbanos e a avaliação ambiental, apresentando termos como *Resíduo orgânico*, *Compostagem*, *Digestão anaeróbica*, e *Análise de Ciclo de Vida*. Vale a pena destacar a presença dos termos *Sistema de gestão atual* e *Desenvolvimento sustentável*. Isso indica que o CDR foi discutido juntamente com estratégias de tratamento de resíduos mais tradicionais ou complementares e em conexão com objetivos de sustentabilidade.

Em comparação com o cenário global, onde temas relacionados à energia tendem a aparecer em grupos mais especializados (*clusters* 2 e 3), a pesquisa brasileira reflete uma perspectiva mais integrada. Os grupos relacionados à gestão ambiental e sustentabilidade (*clusters* 1 e 3) aparecem intimamente ligados no mapa de coocorrência, sugerindo que essas dimensões são frequentemente exploradas em conjunto.

Em vez de separar as dimensões ambiental e energética em linhas de investigação distintas, muitas publicações brasileiras exploraram o CDR a partir de uma perspectiva mais ampla e integrada, incorporando aspectos regulatórios, institucionais e de sustentabilidade juntamente com a recuperação de energia. Esta interpretação reforça as conclusões da categorização por áreas, que destacou a proeminência das preocupações ambientais nos estudos nacionais, mesmo quando estão presentes aplicações energéticas.

4.3.2.3. Principais periódicos no cenário brasileiro

Verificou-se que os 16 artigos do cenário brasileiro estão distribuídos em 10 periódicos. O *Journal of Cleaner Production* destacou-se com cinco artigos, enquanto o *Journal of Environmental Management* e o *Waste Management* têm duas publicações cada.

Cinco dos 10 periódicos estão entre os dez principais no cenário global (*Waste Management*, *Fuel*, *Journal of Cleaner Production*, *Waste Management Research*, and *Sustainability*). Além disso, ressalta-se que 93,75% dos artigos brasileiros foram publicados em revistas internacionais de alta qualidade ($FI > 5$). Esses dados indicam que a pesquisa brasileira sobre o CDR, embora recente, tem relevância significativa, inclusive de uma perspectiva internacional.

Também foi possível estabelecer uma relação entre as revistas encontradas e as áreas identificadas em análises anteriores. O cenário brasileiro incluiu *Engenharia Ambiental*, *Ciências Ambientais* e *Ciência e Tecnologia Verde e Sustentável*. Isso mostrou, mais uma vez, que os artigos brasileiros tenderam a se concentrar nos aspectos ambientais relacionados ao CDR.

4.3.2.4. Categorização temática e interpretação descritiva no cenário brasileiro

A categorização dos 16 artigos brasileiros também seguiu os critérios propostos por Carlomagno and Rocha (2016). Para a classificação, foram utilizadas as mesmas categorias propostas no cenário global (Tabela 3). Observa-se que cinco trabalhos foram classificados em duas categorias devido à multidisciplinaridade presente.

Tabela 3. Principais informações sobre os artigos brasileiros e sua categoria e subcategoria temática.

Categoria principal	Artigos categ. principal	Artigos categ. secundária	Subcategoria	Artigos subcateg. principal	Artigos subcateg. secundária
Técnica	2	1	Combustão	-	-
			Pirólise	1	-
			Gaseificação	1	-
			Cocombustão	-	-
			Carbonização	-	-
			Tecnologias emergentes	-	1
Ambiental	3	1	Emissões atmosféricas	-	-
			Avaliação do ciclo de vida	3	1
			Análise de risco ambiental	-	-
Viabilidade	1	-	Viabilidade econômica	1	-
			Análise de custo-benefício	-	-
Caracterização	1	1	Físico-químico	1	-
			Energética	-	1
			Composição elementar e traços	-	-
			Classificação ou padrões	-	-
Aplicação	-	-	Fábricas de cimento	-	-
			Uso agrícola ou ambiental	-	-
			Produção de materiais	-	-
Gestão de Resíduos	5	2	Tratamento biológico mecânico	1	-
			Políticas e estratégias públicas	1	-
			Mineração em aterros sanitários	-	-
			Comparação entre cenários de gestão	3	2
Segurança / Riscos	-	-	Incêndios / Explosões	-	-
			Corrosão / Incrustação	-	-
Modelos / Simulações	4	-	Termodinâmica/Cinética	2	-
			Computacional	1	-
			Regressão preditiva empírica	-	-
			Multicritério	1	-
Total	16	5		16	5

Fonte: Autoria própria.

a) Categorias principais

As categorias com maior número de artigos foram *Gestão de resíduos* (5), *Modelos / Simulações* (4) e *Ambiental* (3), diferentemente do ocorrido no cenário global onde a categoria *Técnica* foi a mais representativa. Essa classificação valida o encontrado na análise quantitativa realizada anteriormente, uma vez que aqui foi possível analisar de forma mais aprofundada o conteúdo dos trabalhos.

Os estudos de Berardi *et al.* (2020) e Stafford *et al.* (2016), classificados nas categorias *Ambiental* e *Gestão de resíduos*, focaram em estratégias de RSU em Portugal e na Europa, mas permaneceram na amostra nacional devido à participação de investigadores brasileiros entre os autores. Embora o foco temático seja externo, o artigo contribui para o diálogo global sobre políticas de WtE e destaca o envolvimento de acadêmicos brasileiros em discussões políticas mais amplas.

A prevalência dessas três categorias indicou que a tendência dos pesquisadores brasileiros no contexto do CDR gira em torno dos aspectos municipais sobre o gerenciamento de resíduos; das discussões sobre regulamentações e políticas; e da sustentabilidade dos municípios. Chaves *et al.* (2021a) discutiram sobre as intervenções políticas e de gestão de resíduos sólidos voltadas à viabilização da produção de CDR no estado do Espírito Santo. Já de Souza *et al.* (2014) fizeram comparações entre quatro cenários de gestão a fim de avaliar o potencial técnico de geração de energia elétrica a partir de RSU em grandes cidades do Brasil: (1) geração elétrica por gás de aterro; 2) a incineração de todos os RSU; 3) Digestão anaeróbia da fração orgânica; e 4) Separação e incineração do CDR).

Observou-se ainda que os autores dessas categorias utilizaram de ferramentas robustas e atuais para apresentar e discutir seus trabalhos. Merece destaque o uso da ACV em diferentes contextos, tanto como foco do trabalho quanto como análise complementar (Liikanen *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2018; Marques *et al.*, 2021; Silva; Contreras; Bortoleto, 2021; Stafford *et al.*, 2016).

Silva *et al.* (2021) realizaram um estudo de caso em Brasília - DF com a finalidade de abordar a carência de pesquisas voltadas à ACV sobre sistemas de gestão de RSU no Brasil. Além disso, utilizam da ACV para comparar quatro cenários de gestão de RSU a fim de identificar os benefícios ambientais da produção de CDR. Os autores relataram que a ACV é uma metodologia extremamente válida para tomadas de decisões nos contextos de gestão municipal, sendo amplamente utilizada nos países desenvolvidos.

Liikanen *et al.* (2018) utilizaram a ACV para avaliar os impactos ambientais de diferentes alternativas de gestão de RSU em São Paulo - SP, considerando desde a geração dos resíduos até o seu tratamento ou disposição final. Os autores buscaram determinar um caminho para uma gestão de RSU mais sustentável ambientalmente na cidade. Analisando o relatado nos trabalhos, desde os benefícios de aplicação da metodologia até os exemplos práticos de sucesso, entendeu-se o interesse dos autores em ampliarem a aplicação da metodologia no Brasil.

O uso da modelagem também se destacou como uma ferramenta para otimização de processos; avaliação da viabilidade técnica e energética de processos; e apoiar tomadas de decisões estratégicas. No trabalho de Marques *et al.* (2021), os autores utilizaram um modelo de equilíbrio químico termodinâmico para simular processos de gaseificação de CDR para geração de eletricidade. Ainda, realizaram uma avaliação ambiental da gaseificação por meio da ACV. A pesquisa conseguiu fornecer informações dos aspectos operacionais do processo, dos riscos ambientais envolvidos e na produtividade energética.

Chaves *et al.* (2021) utilizaram um modelo multicritério para avaliar a realidade do gerenciamento de RSU do estado do Espírito Santo (ES). Foi realizada uma análise de rede de logística reversa a fim de demonstrar um plano de produção de CDR utilizando de múltiplos critérios de decisão (ambientais, sociais e econômicos) e envolvendo diversos atores e cenários temporais distintos. Analisando os trabalhos foi possível constatar que o uso das ferramentas de modelagem e simulação fornece informações importantes e essenciais para realizar ações assertivas, seja na implementação de um processo ou de um sistema de gestão municipal ou estadual visando a recuperação energética de resíduos.

b) Outras categorias

A categoria *Técnica* contou com dois artigos. Um deles é o trabalho de Ferreira *et al.* (2021) que teve como foco a avaliação técnica do processo de gaseificação de CDR em escala piloto. Os autores realizaram um detalhamento sobre eficiência térmica, balanços de massa e energia, características do gás gerado, além de dedicar um espaço para a análise de emissões. Os resultados obtidos indicaram que houve um avanço no conhecimento a respeito da gaseificação em escala piloto uma vez que se tornou viável a conversão de resíduos em energia elétrica.

No segundo trabalho, Silva *et al.* (2021) buscaram o desenvolvimento e a validação de um método cromatográfico para quantificação simultânea de gases formados no processo

de pirólise. Trata-se de um estudo instrumental que resultou em um método útil para apoiar a aplicação de processos térmicos como alternativas de tratamento de resíduos e que podem ser explorados como fonte de energia. Observa-se que ambos os trabalhos buscaram analisar e otimizar processos de transformação WtE de forma a comprovar sua viabilidade e estimular a aplicação do conceito no Brasil.

Na categoria *Viabilidade* foi inserido o trabalho de Slomski *et al.* (2020) onde os autores analisaram o potencial econômico de frações não aproveitadas do RSU na cidade de São Paulo. Trata-se de um trabalho de viabilidade financeira onde foi apresentado uma estimativa monetária detalhada, com destaque para os diversos usos possíveis do RSU, incluindo o CDR. O artigo se mostra com um diferencial entre os demais brasileiros uma vez que apresenta dados financeiros e estimativas reais do potencial econômico das rotas de valorização dos RSU.

Por fim, em *Caracterização* está o trabalho de Tiburcio *et al.* (2021). Trata-se de um trabalho clássico de caracterização, que analisou as propriedades físicas, químicas e energéticas do RSU do município de Santo André – SP a fim de verificar o potencial de produção de CDR. Foram analisados fatores como poder calorífico, composição volátil, carbono fixo, e ainda, a aderência do material à padrões técnicos para uso como combustível. Os autores ainda fazem uma estimativa do quanto de energia seria produzida a partir dos resíduos gerados.

4.3.2.5. Considerações, desafios, lacunas e futuras direções de pesquisa

Observou-se que os trabalhos brasileiros, embora poucos, têm alta qualidade e grande impacto no desenvolvimento do conceito WtE no país. Os autores buscam primeiramente o entendimento sobre as políticas vigentes de gestão de resíduos e, depois, a comprovação, por meio de tecnologias e metodologias de ponta, de que é possível transformar a gestão dos RSU e contribuir com a demanda energética do Brasil. Os trabalhos utilizam de exemplos de outros países onde a conversão energética de resíduos já é bem estabelecida e aceita para embasar ainda mais os argumentos.

Algo apontado quase que unanimemente nos trabalhos brasileiros é a necessidade de melhorar as gestões municipais de RSU, de forma a otimizar todo o sistema. Alguns autores sugerem ainda o estabelecimento de consórcios entre cidades de pequeno e médio porte. Entende-se que essa não é uma tarefa fácil pois as iniciativas dependem dos interesses dos

tomadores de decisão, da avaliação da viabilidade econômica, dentre outros fatores. Além disso, sabe-se que a mudança na forma de lidar com os RSU exige um trabalho contínuo de educação ambiental dos cidadãos e mudanças nos padrões de consumo.

É notável a diferença entre as preocupações nacionais e mundiais sobre o tema WtE e do CDR. Enquanto outros países do mundo já têm sólidas políticas de gerenciamento de RSU, sistemas de reciclagem e de conversão energética viáveis e em funcionamento, eles podem direcionar seus esforços para otimizar cada vez mais esses processos. Já o Brasil ainda engatinha no assunto e precisa, primeiro, se esforçar para divulgar a ideia WtE, buscando a aceitação e implementação na prática.

A criação de legislações e documentos oficiais nos últimos anos no país indicam avanços relacionados a essa disseminação. No entanto, são observados desafios que vão além da implementação propriamente dita do sistema WtE:

- 1) Ainda não há uma unanimidade sobre o conceito de CDR e outros produtos provenientes de resíduo. A heterogeneidade intrínseca do material dificulta o seu entendimento também. Isso se aplica desde as legislações até a operação industrial.
- 2) O CDR no Brasil está majoritariamente relacionado ao uso em cimenteiras. A ausência de critérios e legislações claras dificulta a ampliação do uso do combustível para outras indústrias.
- 3) Existe uma resistência por parte dos catadores e das cooperativas de reciclagem com o conceito WtE. Ainda há uma percepção de que a adoção de políticas voltadas ao CDR irá redirecionar materiais recicláveis para a produção de combustível, reduzindo a disponibilidade desses materiais para a triagem manual e comercialização.

Nesse sentido, ressalta-se a importância dos trabalhos científicos brasileiros mas entende-se a necessidade de aumentar o volume de pesquisas. Pesquisas futuras podem se concentrar em compreender melhor o CDR e suas propriedades, otimizar o seu uso como combustível, realizar análises de viabilidade econômica para implementar sistemas integrados de gestão de resíduos (a nível municipal) e analisar a aplicabilidade do RDF em vários segmentos industriais, entre outros.

4.4. CONCLUSÕES

A revisão permitiu um aumento do conhecimento sobre as pesquisas relacionadas ao CDR no Brasil e no mundo. Foi possível identificar as perspectivas sobre o uso e a valorização dos resíduos na forma de energia.

O CDR tornou-se uma importante ferramenta da economia circular, não competindo com os usos mais nobres dos resíduos e auxiliando no suprimento da demanda energética de grandes cidades. Observou-se um aumento notável nas discussões envolvendo o uso do conceito WtE, o que incentiva os gestores a otimizar os sistemas atuais. Considerando a realidade brasileira em relação à gestão de resíduos e seu uso para energia, entende-se que ainda são necessários esforços significativos para alcançar a eficiência.

O incentivo à novos trabalhos deve ser feito para acelerar as discussões a respeito da conversão energética. Espera-se que este trabalho sirva de apoio e base para novas pesquisas no Brasil e no mundo, corroborando com as metas da Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 22 maio 2022.

ÂRIÑA, D. *et al.* Characterization of Refuse Derived Fuel Production from Municipal Solid Waste: The Case Studies in Latvia and Lithuania. **Environmental and Climate Technologies**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 112–118, 2020. Disponível em: <https://www.sciendo.com/article/10.2478/rtuct-2020-0090>. Acesso em: 15 set. 2022.

AZAM, M. *et al.* Co-Combustion Studies of Low-Rank Coal and Refuse-Derived Fuel: Performance and Reaction Kinetics. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 13, p. 3796, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/3796>.

AZEVEDO, B. D. *et al.* Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience. **Waste Management**, [s. l.], v. 120, p. 772–783, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X20306176>.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 1977.

BERARDI, P. *et al.* Analysis of Portugal's refuse derived fuel strategy, with particular focus on the northern region. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 277, p. 123262, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620333072>.

BERG, E. R.; NEAL, J. A. Municipal Solid Waste Bottom Ash as Portland Cement Concrete Ingredient. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 168–173, 1998.

Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%281998%2910%3A3%28168%29>.

BESSI, C. *et al.* Solid recovered fuel: An experiment on classification and potential applications. **Waste Management**, [s. l.], v. 47, p. 184–194, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15300805>.

BHATSADA, A. *et al.* Modification of the Aeration-Supplied Configuration in the Biodrying Process for Refuse-Derived Fuel (RDF) Production. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 3235, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/7/3235>.

BIAŁOWIEC, A. *et al.* The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. **Waste Management**, [s. l.], v. 70, p. 91–100, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17306888>.

BONFANTI, L. *et al.* PCDD/PCDF formation and destruction during co-firing of coal and RDF in a slag forming combustor. **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 348, n. 1–2, p. 136–140, 1994. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00321616>.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

BRAZIL - MINISTRY OF REGIONAL DEVELOPMENT. **Roteiro para avaliação preliminar da produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR)**. Brasil: 2021. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/proteger/biblioteca/ProteGEer_Roteiro_CDR_24.12.21.pdf.

BUDIARDJO, M. *et al.* Study of Potential Refuse Derived Fuels as Renewable Alternative Energy from a Jatibarang Landfill. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 3013–3020, 2022. Disponível em: <http://www.pjoes.com/Study-of-Potential-Refuse-Derived-Fuels-nas-Renewable-Alternative-Energy-from-na,145614,0,2.html>.

ÇANKAYA, S. Investigating the environmental impacts of alternative fuel usage in cement production: a life cycle approach. **Environment, Development and Sustainability**, [s. l.], v. 22, n. 8, p. 7495–7514, 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10668-019-00533-y>.

CARDOSO, A. J.; LEVINE, A. D.; RHEA, L. R. Batch Test Assessment of Waste-to-Energy Combustion Residues Impacts on Precipitate Formation in Landfill Leachate Collection Systems. **Journal of the Air & Waste Management Association**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 19–26, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3155/1047-3289.58.1.19>.

CARLOMAGNO, M. C.; ROCHA, L. C. da. Como criar e classificar categorias para fazer análise de conteúdo: uma questão metodológica. **Revista Eletrônica de Ciência Política**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 16, 2016.

CENTRE FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY STUDIES. **VOSviewer version 1.6.18**. Países Baixos: Leiden University, 2022. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>.

CHANG, N.-B. *et al.* The assessment of reuse potential for municipal solid waste and refuse-derived fuel incineration ashes. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 25, n. 3–4, p. 255–270, 1999. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344998000664>.

CHAVES, G. de L. D. *et al.* Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 288, p. 112401, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721004631>.

CHAVES, G. de L. D.; SIMAN, R. R.; CHANG, N.-B. Policy analysis for sustainable refuse-derived fuel production in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 294, p. 126344, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621005643>.

CHIOU, I.-J.; CHEN, C.-H. Municipal solid waste landfill age and refuse-derived fuel. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 601–606, 2021. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X20961832>.

COCHRAN, W. **Sampling techniques**. 2. ed. Boston: John Wiley & Sons, Ltd, 1985.

COSTA, M. *et al.* RDF incineration modelling through thermo-chemical conversion and gaseous combustion coupling. **Energy**, [s. l.], v. 161, p. 974–987, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544218314397>.

DANTHUREBANDARA, M. *et al.* Environmental and economic performance of plasma gasification in Enhanced Landfill Mining. **Waste Management**, [s. l.], v. 45, p. 458–467, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15004365>.

DE FILIPPIS, P. *et al.* Prediction of syngas quality for two-stage gasification of selected waste feedstocks. **Waste Management**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 633–639, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X04000510>.

DE SOUZA, S. N. *et al.* Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 32, n. 10, p. 1015–1023, 2014. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X14552553>.

DI LONARDO, M. C. *et al.* The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome: Comparison and implications. **Waste Management**, [s. l.], v. 47, p. 195–205, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15300350>.

DONG, J. *et al.* Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 203, p. 287–300, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618324831>.

DONG, T. T. T.; LEE, B.-K. Analysis of potential RDF resources from solid waste and their energy values in the largest industrial city of Korea. **Waste Management**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 1725–1731, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X0800408X>.

FERREIRA, C. R. N. *et al.* Gasification of municipal refuse-derived fuel as an alternative to waste disposal: Process efficiency and thermochemical analysis. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 149, p. 885–893, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582021001622>.

FU, Z.-M.; LI, X.-R.; KOSEKI, H. Heat generation of refuse derived fuel with water. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 27–33, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423004000889>.

GALKO, G. *et al.* Evaluation of alternative refuse-derived fuel use as a valuable resource in various valorised applications. **Energy**, [s. l.], v. 263, p. 125920, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544222028067>.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão Sistemática Da Literatura: Conceituação, Produção E Publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 57–73, 2019.

HAAS, J.; WEBER, R. Co-firing of refuse derived fuels with coals in cement kilns: combustion conditions for stable sintering. **Journal of the Energy Institute**, [s. l.], v. 83, n. 4, p. 225–234, 2010. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/014426010X12839334040898>.

HAYDARY, J.; RAPČANOVÁ, E.; ŠKULEC, M. Purification of syngas from Refuse-Derived Fuel (RDF) gasification: Techno-economic analysis. **Thermal Science and Engineering Progress**, [s. l.], v. 44, p. 102024, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2451904923003773>.

HERRADOR, M.; VAN, M. L. Circular economy strategies in the ASEAN region: A comparative study. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 908, p. 168280, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969723069073>.

HUANG, Q. X. *et al.* Quantitative Model of Interactions in the Thermal Decomposition of Key Refuse-Derived Fuel Components. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 1213–1219, 2014. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef4020668>.

HUNG, Z.-S. *et al.* Autoclaving treatment of wasted disposable bamboo chopsticks. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [s. l.], v. 44, n. 6, p. 1010–1015, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876107013001715>.

IKHLAYEL, M. Development of management systems for sustainable municipal solid waste in developing countries: a systematic life cycle thinking approach. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 180, p. 571–586, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618300659>.

ISHIKAWA, Y. *et al.* PCB decomposition and formation in thermal treatment plant equipment. **Chemosphere**, [s. l.], v. 67, n. 7, p. 1383–1393, 2007. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653506013580>.

JANUSZEWSKI, J.; BRZEZIŃSKA, D. RDF Fire and Explosion Hazards at Power Plants. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 22, p. 12718, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/22/12718>.

KARA, M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 68, p. 21–28, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344912001097>.

KHAN, I.; CHOWDHURY, S.; TECHATO, K. Waste to Energy in Developing Countries—A Rapid Review: Opportunities, Challenges, and Policies in Selected Countries of Sub-Saharan Africa and South Asia towards Sustainability. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 3740, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/3740>.

KRAUSE, H. H.; DANIEL, P. L.; BLUE, J. D. Corrosion of Boiler Tube Alloys in Refuse Firing: Shredded versus Bulk Refuse. In: , 1993. **CORROSION 1993**. [s. l.]: NACE International, 1993. p. 1–13. Disponível em: https://content.ampp.org/nace/proceedings/CONF_MAR1993/1993/1/48193.

KWAK, Y.-H. *et al.* Absorption behavior of chlorine and sulfur by Ca(OH)₂ under simulated conditions with a fluidized bed combustor. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 314–320, 2011. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10163-011-0030-0>.

LAKATOS, E. S. *et al.* Conceptualizing Core Aspects on Circular Economy in Cities. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 14, p. 7549, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/7549>.

LAOHALIDANOND, K. *et al.* Syngas Generation From Landfills Derived Torrefied Refuse Fuel Using a Downdraft Gasifier. **Journal of Energy Resources Technology**, [s. l.], v. 143, n. 5, 2021. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/energyresources/article/143/5/052102/1087231/Syngas-Generation-From-Landfills-Derived-Torrefied>.

LIIKANEN, M. *et al.* Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management – A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 196, p. 150–162, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618316536>.

LIMA, P. D. M. *et al.* Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. **Waste Management**, [s. l.], v. 78, p. 857–870, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X1830429X>.

LÓPEZ-SABIRÓN, A. M. *et al.* Refuse derived fuel (RDF) plasma torch gasification as a feasible route to produce low environmental impact syngas for the cement industry. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 33, n. 8, p. 715–722, 2015. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X15586476>.

LUPA, C. J. *et al.* The use of commercial and industrial waste in energy recovery systems – A UK preliminary study. **Waste Management**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 1759–1764, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X11001711>.

LUQMAN, L.; MADENDA, S.; PRIHANDOKO, P. Polynomial Regression Model Utilization to Determine Potential Refuse-Derived Fuel (RDF) Calories in Indonesia. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 20, p. 7200, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/20/7200>.

MACIEJCZYK, A. *et al.* The Influence of Protective Coatings on High-Temperature Corrosion under Biomass Ash Deposits. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 21, p. 7221, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7221>.

MADADIAN, E.; CROWE, C.; LEFSRUD, M. Evaluation of composite fiber-plastics biomass clinkering under the gasification conditions. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 164, p. 137–145, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617312404>.

MAKRYGIANNIS, I. *et al.* Assessing the Effects of Refuse-Derived Fuel (RDF) Incorporation on the Extrusion and Drying Behavior of Brick Mixtures. **Ceramics**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 2367–2385, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6131/6/4/145>.

MANNINEN, H. *et al.* Trace metal emissions from co-combustion of refuse derived and packaging derived fuels in a circulating fluidized bed boiler. **Chemosphere**, [s. l.], v. 32, n. 12, p. 2457–2469, 1996. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0045653596001464>.

MARQUES, T. E. *et al.* Environmental and Energetic Evaluation of Refuse-Derived Fuel Gasification for Electricity Generation. **Processes**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 2255, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/12/2255>.

MATERAZZI, M.; TAYLOR, R. Plasma-Assisted Gasification for Waste-to-Fuels Applications. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 58, n. 35, p. 15902–15913, 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.9b01239>.

MOHER, D. *et al.* Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLoS Medicine**, [s. l.], v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.

MOUSTAFA, K. *et al.* Effect of Refuse Derived Fuel Ash on the Hydration Characteristics of Portland cement. **Egyptian Journal of Chemistry**, [s. l.], p. 0–0, 2021. Disponível em: https://ejchem.journals.ekb.eg/article_156881.html.

NITHIKUL, J.; KARTHIKEYAN, O. P.; VISVANATHAN, C. Reject management from a Mechanical Biological Treatment plant in Bangkok, Thailand. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 417–422, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344910002429>.

NIZAMI, A. S. *et al.* Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. **Applied Energy**, [s. l.], v. 186, p. 189–196, 2017.

Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191630616X>.

NORDHAUSEN, T.; HIRT, J. Rapid reviews: A critical perspective. **Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen**, [s. l.], v. 158–159, p. 22–27, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1865921720301458>.

NOWAK, M. Features of Refuse Derived Fuel in Poland – Physicochemical Properties and Availability of Refuse Derived Fuel. **Journal of Ecological Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 1–9, 2023. Disponível em: <http://www.jeeng.net/Features-of-Refuse-Derived-Fuel-in-Poland-Physicochemical-Properties-and-Availability,157159,0,2.html>.

OUGMANE, A. *et al.* Characterization of dry fractions contained in municipal solid waste in developing countries: a case study of a region in Morocco. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 1227–1238, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10163-021-01183-x>.

PAYOMTHIP, P. *et al.* Optimization of Aeration for Accelerating Municipal Solid Waste Biodrying. **International Journal of Renewable Energy Development**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 878–888, 2022. Disponível em: <https://ijred.cbiorid.org/index.php/ijred/article/view/45143>.

PIAO, G. *et al.* Behavior of Chlorine Compound with Combustion of RDF in Fluidized Bed. **KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 551–556, 2000. Disponível em: http://www.jstage.jst.go.jp/article/kakoronbunshu1975/26/4/26_4_551/_article/-char/ja/.

PORSNOVS, D. *et al.* Biochar from Waste Derived Fuels as Low-Cost Adsorbent for Waste Hydrocarbons. **Environmental and Climate Technologies**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 174–187, 2020. Disponível em: <https://www.sciendo.com/article/10.2478/rtuct-2020-0095>.

PRIHARTANTO, P. *et al.* Characterization of landfill-mined materials as a waste-to-energy source at integrated solid waste treatment facilities of Jakarta Province, Indonesia. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 3872–3884, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10163-023-01810-9>.

PUNIN, W.; MANEewan, S.; PUNLEK, C. The feasibility of converting solid waste into refuse-derived fuel 5 via mechanical biological treatment process. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 753–762, 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10163-013-0215-9>.

REINMÖLLER, M. *et al.* Formation and transformation of mineral phases in various fuels studied by different ashing methods. **Fuel**, [s. l.], v. 202, p. 641–649, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236117305434>.

ROCCA, S. *et al.* Characterisation of major component leaching and buffering capacity of RDF incineration and gasification bottom ash in relation to reuse or disposal scenarios. **Waste Management**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 759–768, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X11005447>.

ROTTER, V. S. *et al.* New techniques for the characterization of refuse-derived fuels and solid recovered fuels. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 229–236, 2011. Disponível em:

<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X10364210>.

SADHUKHAN, J.; MARTINEZ-HERNANDEZ, E. Material flow and sustainability analyses of biorefining of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 243, p. 135–146, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852417309823>.

SÃO PAULO STATE DEPARTMENT OF ENVIRONMENT. **Resolução SIMA Nº 047, de 06 de agosto de 2020**. Brasil: 2020.

SÃO PAULO STATE DEPARTMENT OF ENVIRONMENT. **Resolução SMA Nº 38, de 31 de maio de 2017**. Brasil: 2017. Disponível em:

<https://semil.sp.gov.br/legislacao/2022/07/resolucao-sma-038-17/#:~:text=Estabelecem diretrizes e condições para,Fornos de Produção de Clínquer>.

SCHWARZBÖCK, T. *et al.* Effects of sample preparation on the accuracy of biomass content determination for refuse-derived fuels. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 153, p. 101–110, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382016303022>.

SHIMIZU, Y.; WAKAKURA, M.; ARAI, M. Heat accumulations and fire accidents of waste piles. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 86–90, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423008001241>.

SIDDAWAY, A. P.; WOOD, A. M.; HEDGES, L. V. How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>, [s. l.], v. 70, p. 747–770, 2019. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-psych-010418-102803>. Acesso em: 9 nov. 2022.

SILVA, V. *et al.* A Gas Chromatography Method for Simultaneous Quantification of Inorganic Gases and Light Hydrocarbons Generated in Thermochemical Processes. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s. l.], 2021. Disponível em: http://jbcs.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=11107&nomeArquivo=2020-0486AR.pdf.

SILVA, V.; CONTRERAS, F.; BORTOLETO, A. P. Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasília, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 279, p. 123696, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620337410>.

SILVA, H. M. M.; VANALLE, R. M. QFD sustentável: uma revisão bibliométrica e sistemática da literatura. **Exacta**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 271–306, 2022. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/17436>.

SLOMSKI, V. G. *et al.* Pathways to Urban Sustainability: An Investigation of the Economic Potential of Untreated Household Solid Waste (HSW) in the City of São Paulo. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 13, p. 5249, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/13/5249>.

SQUARCINI, C. F. R.; ROCHA, S. V.; SANTOS, H. E. dos. Metassíntese E Meta-Análise: Limites E Possibilidades De Encontro. **Arquivos de Ciências da Saúde da UNIPAR**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 179–185, 2020.

STAFFORD, F. N. *et al.* Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 126, p. 159–165, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616300221>.

STREIER, R. *et al.* Analysis of the Impact of Rdf Combustion on Cement Clinker Quality in a Superstoichio-Metric Oxy-Fuel Atmosphere by Cfd Simulations. **Combustion Science and Technology**, [s. l.], v. 195, n. 14, p. 3475–3493, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00102202.2023.2239463>.

TAGOE, S. O.; HORIUCHI, T.; MATSUI, T. Preliminary evaluation of the effects of carbonized chicken manure, refuse derived fuel and K fertilizer application on the growth, nodulation, yield, N and P contents of soybean and cowpea in the greenhouse. **African Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 3, p. 759–774, 2008.

TIBURCIO, R. S. *et al.* Physicochemical and thermophysical characterization of rejected waste and evaluation of their use as refuse-derived fuel. **Fuel**, [s. l.], v. 293, p. 120359, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236121002350>.

TSYNTSARSKI, B. *et al.* Refuse-derived Fuel Based Cobalt Catalysts for Hydrogen Production. **Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences**, [s. l.], v. 75, n. 9, p. 1295–1302, 2022. Disponível em: <http://proceedings.bas.bg/index.php/cr/article/view/155>.

VON FELDE, D.; DOEDENS, H. Full-scale experiences with mechanical-biological pretreatment of municipal solid waste and landfilling. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 520–526, 1999. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X9901700618>.

VOUNATSOS, P. *et al.* Refuse-derived fuel classification in a mechanical–biological treatment plant and its valorization with techno-economic criteria. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1137–1146, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13762-014-0509-z>.

WOLNY-KOŁADKA, K.; ŻUKOWSKI, W. Mixed Municipal Solid Waste Hygienisation for Refuse-Derived Fuel Production by Ozonation in the Novel Configuration Using Fluidized Bed and Horizontal Reactor. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 575–583, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-017-0087-7>.

XIAO, H. *et al.* Distributions of and environmental risks posed by Cr and Zn when co-treating solid waste in different kilns. **Waste Management**, [s. l.], v. 165, p. 119–127, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X23003112>.

YAP, H. Y.; NIXON, J. D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**, [s. l.], v. 46, p. 265–277, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15300714>.

5. CAPÍTULO 4: COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E PROPRIEDADES DE UM COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) PROVENIENTE DO SUDESTE DO BRASIL

Resumo

O Combustível Derivado de Resíduos (CDR) vem sendo inserido no Brasil, mais especificamente nas indústrias cimenteiras, como combustível alternativo. No entanto, alguns fatores ainda se apresentam como desafios à sua utilização. Dentre estes destacam-se as características intrínsecas do CDR. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas, químicas, energéticas e estruturais de um CDR produzido no interior de São Paulo. Cinco amostras de CDR foram obtidas de uma empresa de gerenciamento de resíduos, localizada na região de Sorocaba - SP. Para a caracterização, o material foi quarteado e a fração destinada às análises laboratoriais foi triturada e novamente quarteada. Foram verificadas as propriedades físicas, químicas, estruturais e energéticas do CDR, além da composição gravimétrica. Os resultados indicaram que o CDR analisado apresenta alta heterogeneidade, sendo composto por plásticos, papeis, tecidos, borrachas, compósitos, biomassas, metais e materiais inorgânicos. Os teores de umidade apresentaram variações consideráveis (6,98% – 29,96%) e a densidade a granel foi baixa (71 – 112 kg/m³). As propriedades energéticas encontradas foram propícias para um combustível, com Poder Calorífico Superior entre 20,89 - 27,77 MJ/kg. Além disso, as cinzas encontradas não apresentaram constituintes químicos perigosos, possibilitando o aproveitamento desse resíduo em outros processos e na produção de materiais. De modo geral, foi possível constatar que o CDR tem potencial para ser utilizado em diversos segmentos industriais. As principais dificuldades para o uso do CDR em escala industrial são a alta heterogeneidade e a baixa densidade a granel.

Palavras-chave: resíduo sólido urbano; propriedades físico-químicas; waste-to-energy; heterogeneidade; avaliação energética

5.1. INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são uma classe de materiais gerados mundialmente em larga escala. Esses resíduos são provenientes, principalmente, das atividades domiciliares e comerciais urbanas. Nesse sentido, sua geração acompanha a urbanização e o crescimento

populacional (Khan; Chowdhury; Techato, 2022). Fatores como gerenciamento e destinação inadequados fazem com que este resíduo se torne uma problemática para a saúde ambiental e humana. Em muitas regiões, o sistema de coleta de RSU ainda é ineficiente e até mesmo inexistente. No Brasil, foram gerados aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU em 2022 e 39% destes tiveram disposição inadequada (lixões e aterros controlados) (Abrelpe, 2022).

A deposição em aterro é o método mais comum para a eliminação de RSU em todo o mundo, representando cerca de 70% do montante gerado (Kaza *et al.*, 2018). Ressalta-se que além dos RSU, outras classes de resíduos tem o aterro como destino final, incluindo os Resíduos Sólidos Industriais (RSI) Não Perigosos, Resíduos de Construção Civil (RCC) e Resíduos de Serviço de Saúde (RSS) Não Perigosos. Nesse sentido, mesmo em relação aos métodos considerados adequados para destinação, existem dificuldades como o grande volume de resíduos recebido, necessidade de grandes áreas, alto investimento, escassez de terra, vida útil e emissões de poluentes (Khan; Chowdhury; Techato, 2022; Laohalidanond *et al.*, 2021; Rahoatharn; Khemkhao; Kaewpengkrow, 2023).

Tendo em vista a complexidade que envolve a geração e o gerenciamento de resíduos, alternativas de uso e aproveitamento são discutidas de modo a viabilizar outros tipos de finalidades para esses materiais. A conversão de resíduos em energia (waste to energy - WtE) surge nesse contexto como uma tecnologia promissora que tem sido utilizada especialmente nos países desenvolvidos (Khan; Chowdhury; Techato, 2022). Em países como EUA e Europa, a prática WtE é antiga e vem sendo explorada em diferentes setores.

Nesse contexto está inserido o Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Na literatura é relatado que qualquer material que tenha algum poder calorífico pode ser utilizado como CDR após terem passado por processamento prévio (Nasiri; Hajinezhad; Kianmehr, 2023; Sarc; Lorber, 2013; Wijaya *et al.*, 2023). Ainda, é ressaltado que a prática WtE não compete com estratégias de redução, reutilização e reciclagem, respeitando a “hierarquia dos resíduos” (Atstaja *et al.*, 2024; Sarc; Lorber, 2013).

No Brasil, o uso do CDR iniciou-se apenas em 2018 com a iniciativa do grupo Votorantim em inserir o combustível em uma planta de produção de cimento no estado de São Paulo (Votorantim Cimentos, 2019). A indústria cimenteira demanda de grandes quantidades de matérias-primas e de energia para produção do cimento e, devido ao aumento das preocupações ambientais relacionadas a essas temáticas, a aderência ao uso de combustíveis alternativos se fortaleceu. Autores relatam que a produção de cimento é responsável por aproximadamente 5% a 8% das emissões globais de CO₂ (Kajaste; Hurme, 2016; Stafford *et al.*, 2016; Strippelle *et al.*, 2018) e que

40% do montante emitido é proveniente da queima de combustíveis fósseis como carvão, petróleo, gás e coque de petróleo do refino de petróleo (Ammenberg *et al.*, 2015; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; Verdiani *et al.*, 2025).

Embora o uso do CDR no Brasil, mesmo que de forma tímida, venha se tornando uma realidade, existem ainda fatores que limitam ou, até mesmo, inviabilizam sua aplicação. Aspectos relacionados às regulamentações sobre a produção e uso do CDR, que ainda são insuficientes, e às próprias características do combustível que, por ser heterogêneo e variável, dificultam a ampliação do seu uso para outros setores industriais. O melhor entendimento sobre o CDR servirá como base técnica para a construção de um arcabouço legal nacional coerente, para a difusão do conhecimento e ampliação das possibilidades de uso.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas, químicas, energéticas e estruturais de um CDR produzido no interior de São Paulo, a fim de contribuir para o entendimento técnico do material e subsidiar futuras aplicações e regulamentações voltadas ao seu uso energético.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1. Obtenção e preparo do Combustível Derivado de Resíduos

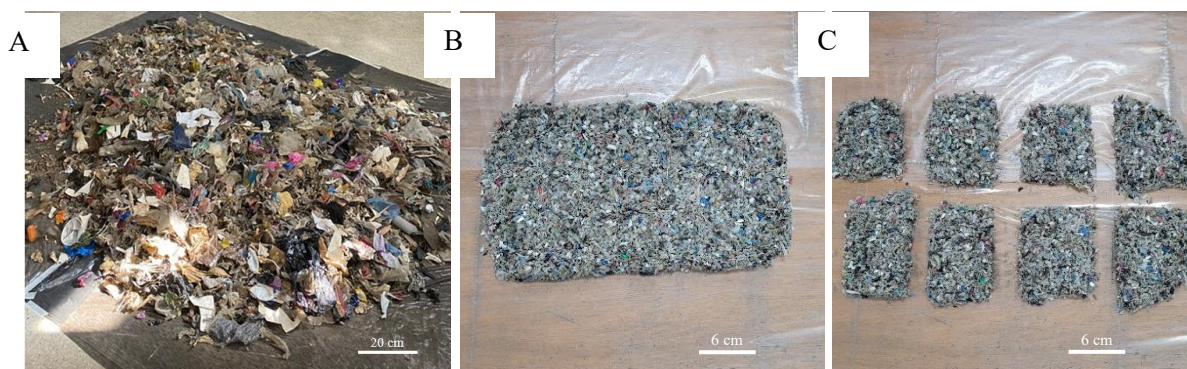
O CDR utilizado no trabalho foi obtido de uma empresa especializada em gerenciamento de resíduos, localizada em Sorocaba – SP e pertencente ao Grupo Salmeron. Com o objetivo de aumentar o espectro amostral e identificar possíveis diferenças na composição, cinco coletas foram realizadas em diferentes meses. Cada coleta apresentou volume suficiente para encher um saco plástico de 100 litros.

As amostras coletadas foram encaminhadas para o Laboratório de Biomassa e Bioenergia da Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba e submetidas à secagem em estufa ($100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) para obtenção do teor de umidade e para garantir uma melhor conservação do material durante o armazenamento. Posteriormente, foi realizado o processo de quarteamento para obtenção de duas frações da amostra (Figura 1A): a maior fração (~ 80% da amostra) foi destinada para análise da composição gravimétrica; a menor fração (~ 20% da amostra) foi destinada para realização das análises laboratoriais de caracterização.

Para realização das análises laboratoriais, as amostras de CDR foram trituradas e moídas, para redução da granulometria (Figura 1B), e passaram por processos de quarteamento repetidamente até a obtenção de amostras de aproximadamente 1 g (Figura 1C). O método de

quarteamento foi utilizado para garantir que as frações fossem o mais representativas possível em comparação à composição da amostra.

Figura 1. A) CDR *in natura* no processo de quarteamento inicial; B) Amostra de CDR após trituração e moagem; C) Amostra de CDR no processo de quarteamento para análises laboratoriais.



Fonte: Autoria própria.

5.2.2. Caracterização do Combustível Derivado de Resíduos

5.2.2.1. Propriedades físicas

A composição gravimétrica do CDR foi determinada via segregação manual e a classificação foi feita seguindo o critério de grupos pré-estabelecido: Plástico (todos os tipos); Papel (incluindo papelão); Tecido; Borracha; Compósito (qualquer material composto por dois ou mais materiais (exemplos: plástico e alumínio; e plástico e papel); Biomassa (materiais de origem lignocelulósica); Metais; e Inorgânicos (partículas de terra, areia, etc.).

O teor de umidade das cinco amostras de CDR foi obtido de acordo com o preconizado pela norma DIN EN 14774 – 1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010). A determinação foi realizada para a umidade na base úmida.

A densidade à granel foi realizada seguindo a ISO 17828 (ISO, 2015). O método relaciona a massa do material contida em um recipiente de volume conhecido. Os testes de teor de umidade e a densidade foram realizados em sextuplicata.

5.2.2.2. Propriedades químicas

A análise imediata foi realizada para obtenção do teor de materiais voláteis, de acordo com a norma ISO 18123 (International Organization for Standardization - ISO, 2023), teor de cinzas de acordo com a ISO 18122 (ISO, 2015) e de carbono fixo, por subtração dos teores de materiais voláteis e cinzas encontrados. As análises foram realizadas em sextuplicata.

A fim de conhecer a composição elementar química da fração residual do CDR, suas cinzas, foi realizada análise de Fluorescência de Raios X (FRX) e, para fins comparativos, análise de Espectroscopia por Dispersão de Elétrons acoplada à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS). Ambas as análises são semiquantitativas.

Para as análises não foram selecionados, previamente, elementos a serem investigados, sendo considerados todos aqueles detectados na amostra. No entanto, os elementos carbono e oxigênio foram excluídos da composição final, a fim de evitar interferências decorrentes da fita de carbono utilizada na preparação da amostra e da superestimação típica do detector para o oxigênio.

5.2.2.3. Propriedades energéticas

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido utilizando-se de um calorímetro IKA C200 baseando-se no descrito na normativa BS EN 14918 (European Committee for Standardization - CEN, 2009). O ensaio foi realizado em sextuplicata.

5.2.2.4. Caracterização estrutural

A análise de difração de raios X (DRX) foi realizada tanto no CDR *in natura* quanto em suas cinzas com o intuito de identificar os componentes orgânicos e inorgânicos presentes no material, bem como os resíduos pós-combustão. Para a análise do CDR *in natura*, uma amostra de cada coleta foi previamente triturada e moída. Em seguida, as cinco frações foram homogeneizadas, formando uma amostra única utilizada na análise. O mesmo procedimento foi adotado para as cinzas: as cinco amostras resultantes da análise imediata foram misturadas para a obtenção de uma única amostra destinada à análise estrutural.

Utilizou-se o equipamento Shimadzu XRD-6100, operando a uma tensão de 50,0 kV e corrente de 30,0 mA, com tubo de raios X de cobre (Cu-K α). As amostras foram analisadas no intervalo de 5° a 55° (2 θ), com velocidade de varredura de 2,0 °C·min⁻¹.

5.2.3. Análise estatística

Os dados obtidos na caracterização do CDR foram testados quanto à homogeneidade, pelo teste de Bartlett, e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. Posteriormente foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, aos que apresentaram diferença estatística significativa, foi aplicado o teste de Tukey (5% de significância). As análises estatísticas foram realizadas com auxílio dos softwares Excel, Origin 2017 versão 94E, e Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1. Propriedades físicas

O resultado obtido a partir da segregação das amostras do CDR está representado na Figura 2.

Figura 2. Amostra de CDR após separação manual indicando as classes de materiais presentes.



Fonte: Autoria própria.

O grupo mais representativo em todas as amostras analisadas foi o dos plásticos. Houve diferenças significativas entre as coletas, especialmente em relação aos materiais inorgânicos (estão inseridas aqui, majoritariamente, as partículas de solo e areia) (Tabela 1).

Tabela 1. Composição gravimétrica das cinco amostras de CDR.

Classes de materiais	CDR_1	CDR_2	CDR_3	CDR_4	CDR_5
	----- % -----				
Plásticos	73,55	51,12	68,42	43,11	40,53
Papeis	10,02	18,87	5,19	7,83	19,98
Têxteis	7,23	3,48	1,93	3,83	4,72
Compósitos	2,82	13,14	2,53	0,61	11,16
Biomassas	2,82	4,27	3,46	5,77	6,25
Inorgânicos	2,79	8,48	14,89	37,46	16,79
Borrachas	0,71	0,30	0,86	0,49	0,00
Metais	0,06	0,35	2,73	0,91	0,57

Fonte: Autoria própria.

A heterogeneidade do CDR é relatada na literatura como uma característica intrínseca já que sua origem é diversa e variável (Gałko *et al.*, 2023; Suleimenova *et al.*, 2022; Syguła *et al.*, 2020). A partir dos resultados, foi possível constatar que a heterogeneidade do material extrapola a origem, podendo ocorrer em amostras de uma mesma fonte quando obtidas em diferentes épocas.

De modo geral, foi identificado que o material analisado é majoritariamente constituído por plásticos ($56,07\% \pm 14,41$), papeis ($12,70\% \pm 7,15$) e materiais inorgânicos ($16,02\% \pm 13,20$). Em menores proporções foram encontradas frações de materiais têxteis ($4,28\% \pm 1,91$), compósitos ($6,27\% \pm 5,99$), biomassas ($4,59\% \pm 1,53$), borrachas ($0,47\% \pm 0,34$) e metais ($0,94\% \pm 1,07$). A composição observada nas amostras de CDR está de acordo com a literatura em relação aos principais componentes (plásticos e papeis) (Rahotharn; Khemkhao; Kaewpengkrow, 2023; Syguła *et al.*, 2020; Tsyntsarski *et al.*, 2022).

Os resultados referentes à densidade a granel e umidade das amostras de CDR podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores referentes à densidade a granel e umidade das cinco amostras de CDR.

Amostras	Densidade à granel (kg/m ³)	Umidade (base úmida) (%)
CDR_1	71,89 ± 8,44	14,69
CDR_2	112,87 ± 33,75	7,10
CDR_3	92,60 ± 15,64	6,80
CDR_4	93,93 ± 26,42	28,21
CDR_5	71,47 ± 16,56	29,96

Fonte: Autoria própria.

Na densidade à granel, houve variação entre as cinco amostras e, observando os altos desvios encontrados, constatou-se uma variação também entre as repetições. Esse resultado é explicado pela alta heterogeneidade do combustível, observando que seus materiais constituintes apresentam densidades distintas.

As variações na densidade podem ser vistas também na literatura e são remetidas à diversos fatores, além da composição, como conteúdo de matéria-orgânica, teor de umidade, estado físico do CDR (*in natura*, triturado, peletizado etc.) dentre outros (Itsarathorn *et al.*, 2023; Nasiri; Hajinezhad; Kianmehr, 2023; Özbay; Özbay; Akdemir, 2022). Peters *et al.* (2020) encontraram valor de 190 kg/m³ no CDR em forma de fluff. Já Infiesta *et al.* (2019) relataram 250 kg/m³ após compactação do material.

Outro fator com variação acentuada foi a umidade, com teores entre 6,80% e 29,96% alcançando um desvio de 11,18% (Tabela 2). Para um material combustível, sabe-se que a umidade é um dos principais fatores que deve ser controlado pois afeta diretamente nas propriedades energéticas (Białowiec *et al.*, 2017; Chotikhun *et al.*, 2023).

Geralmente, o teor de umidade do CDR está relacionado à fatores como composição, teor de materiais orgânicos (restos de alimentos), local de armazenamento antes e após a coleta, tempo em que está armazenado, dentre outros. Com a finalidade de verificar os fatores que contribuíam com os altos teores de umidade em um determinado CDR, Vounatsos *et al.* (2015) realizaram uma separação manual e mediram a umidade de cada material separadamente. Os autores observaram que materiais orgânicos, todos os tipos de papel e madeira contribuíram com uma porcentagem de mais de 85% para a umidade total do CDR.

O CDR utilizado no presente trabalho era proveniente de resíduos industriais não perigosos. Nesse sentido, não foi observada a presença de altos teores de materiais orgânicos característicos do

CDR que tem o RSU ou lodo de esgoto como origem (Alfè *et al.*, 2022; Özbay; Özbay; Akdemir, 2022). É aferido, então, que os altos teores de umidade encontrados em determinadas coletas estão relacionados com o local de armazenamento na unidade fabril, uma vez que o galpão de armazenamento era aberto nas laterais, permitindo a entrada de água em dias chuvosos. A água, ao entrar em contato com a pilha de CDR, permanece nela e é transferida, em nível microscópico, para os papéis e demais constituintes suscetíveis à absorção, onde permanece.

Ressalta-se a possibilidade de otimização das propriedades do CDR a partir de processos de pré-tratamento como secagem e, até mesmo, torrefação e densificação, além do uso combinado com outros combustíveis, como as biomassas. Esses processos também visam possibilitar a aplicação de maiores quantidades do material nas indústrias.

5.3.2. Propriedades químicas

Resultados referentes à análise imediata incluindo os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores referentes à análise imediata das cinco amostras do CDR.

Amostras	Carbono fixo	Materiais voláteis	Cinzas
	----- % -----		
CDR_1	5,15 ± 0,51 a	84,03 ± 3,88 bc	10,76 ± 4,18 ab
CDR_2	4,15 ± 0,27 a	87,97 ± 1,00 c	7,47 ± 1,22 a
CDR_3	7,04 ± 0,96 b	84,49 ± 3,23 c	8,46 ± 3,64 ab
CDR_4	9,77 ± 0,98 c	78,94 ± 2,34 ab	11,29 ± 2,11 ab
CDR_5	8,50 ± 0,80 c	77,64 ± 4,46 a	13,86 ± 4,91 b

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Autoria própria.

Todas as amostras apresentaram materiais voláteis de forma majoritária em sua composição, seguido de cinzas e carbono fixo. Diferenças estatisticamente significativas foram encontradas na maioria das amostras para os três constituintes. Foi possível observar algumas relações entre os constituintes como na amostra CDR_2 que apresentou o maior teor de materiais voláteis (87,97%) e o menor teor de cinzas (7,47%) e na amostra CDR_5, onde o contrário ocorreu, apresentando o menor teor de materiais voláteis (77,64%) e o maior teor de cinzas (13,86%).

Pode-se dizer que a maior fração destinada aos materiais voláteis se deve às altas porcentagens de plásticos encontradas nas amostras, uma vez que são materiais que possuem alto poder calorífico (Bluhm-Drenhaus *et al.*, 2012; Grammelis *et al.*, 2009). Já os teores de cinzas encontrados estão relacionados com dois fatores: o primeiro é a considerável fração de materiais inorgânicos presente nas amostras, majoritariamente partículas de solo; o segundo é a presença de materiais inorgânicos aderidos aos constituintes do CDR, como o papel. Os CDRs geralmente apresentam teores de cinzas significativamente mais elevados do que outros combustíveis sólidos, como biomassas ou carvão mineral (Gałko *et al.*, 2023).

Grammelis *et al.* (2009) ao realizarem análise imediata dos diferentes materiais e CDRs, constataram que materiais como papel de jornal, papel de impressão, papel reciclado, papel de revista e papelão continham teores significativos de cinzas e carbono fixo enquanto os materiais plásticos apresentavam materiais voláteis em quase sua totalidade.

De modo geral, foi possível fazer uma relação entre a constituição das amostras de CDR e a análise imediata. Observou-se que as amostras com maiores teores de materiais voláteis também obtiveram maiores teores de plásticos. A mesma análise pode ser feita para cinzas e inorgânicos e carbono fixo e biomassas. Essas relações são descritas na literatura e comprovam a influência da composição nas propriedades combustíveis do material (Białowiec *et al.*, 2017; Stępień, 2019; Wijaya *et al.*, 2023).

Em relação ao método de amostragem, fator que influencia nos resultados laboratoriais, pode-se dizer que o processo de quarteamento auxiliou na obtenção de amostras mais homogêneas. No entanto, foi possível constatar que, para um material heterogêneo como o CDR, quanto mais sua amostragem é reduzida, mais difícil é assegurar sua representatividade. Questões relacionadas à altos desvios amostrais e dificuldade na obtenção de dados consistentes quando analisadas pequenas quantidades de CDR também são relatadas por Grammelis *et al.* (2009).

A dificuldade na amostragem do CDR tem prejudicado também a utilização do material pelas cimenteiras, além de inviabilizar a ampliação do seu uso para outros setores industriais. A Resolução SIMA 047/20 (São Paulo State Department of Environment, 2020) é responsável por estabelecer diretrizes e condições para a utilização do CDR no Estado de São Paulo, como limites máximos de cloro e outros elementos no material em base seca. No entanto, a quantificação exata de constituintes específicos em amostras de CDR torna-se inviável, devido a sua heterogeneidade, levando à subestimação ou superestimação dos resultados analíticos.

Em relação à composição elementar inorgânica das cinzas do CDR, foi possível observar que a análise de MEV/EDS, considerada semiquantitativa, obteve resultados semelhantes à análise de FRX, quantitativa (Tabela 4). A análise de FRX, no entanto, detectou mais elementos (fósforo, cobre, estrôncio e molibdênio).

Tabela 4. Comparativo entre a composição elementar inorgânica das cinzas de CDR determinada por MEV/EDS e FRX.

Elemento	MEV/EDS	FRX
	Massa (%)	
Cálcio	32,25	30,1
Cloro	11,79	9,50
Silício	11,33	11,2
Titânio	10,91	6,97
Ferro	9,57	20,4
Alumínio	8,66	9,13
Sódio	7,78	2,05
Potássio	3,16	3,50
Zinco	2,10	0,71
Magnésio	1,69	2,16
Enxofre	0,76	-
Fósforo	-	0,38
Cobre	-	2,47
Estrôncio	-	0,40
Molibdênio	-	1,12

Fonte: Autoria própria.

De acordo com Ollila *et al.* (2006), partículas inorgânicas típicas observadas em CDRs incluem areia natural, sal, cal e gesso. A partir disso, foi possível verificar a relação entre os elementos detectados e os constituintes inorgânicos do CDR descritos pelos autores. Verifica-se que o destaque obtido pelo cálcio (Ca) está relacionado à sua inclusão majoritária na cal (CaO) e no gesso (CaSO₄) e em outros materiais na forma de cloreto de cálcio (CaCl₂) e aluminossilicatos de cálcio. Ressalta-se que, além dos materiais destacados, o Ca está presente como carga nos papéis e plásticos.

O cloro (Cl), como um dos principais constituinte das cinzas do CDR, pode estar relacionado aos sais cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl) e cloreto de cálcio (CaCl₂) (Ollila *et al.*, 2006; Vounatsos *et al.*, 2015). A presença de cloro, mesmo na forma inorgânica, pode indicar impactos negativamente no processo, uma vez que está relacionado com a corrosão de equipamentos, formação de depósitos e emissões de poluentes atmosféricos. Essa discussão se estende para o sódio (Na).

Os teores dos elementos silício (Si), titânio (Ti), ferro (Fe) e alumínio (Al) podem indicar a presença de aluminossilicatos, dióxido de silício, óxido de titânio, ferro metálico, óxido de ferro e alumínio metálico (Ollila *et al.*, 2006). Esses constituintes estão mais relacionados com partículas de solo e argila, elementos metálicos, pigmentos, dentre outros. De modo geral, os demais elementos encontrados são condizentes com a mistura de materiais presente no CDR, incluindo biomassa, eletrônicos, vidro, borrachas e papéis (Grammelis *et al.*, 2009; Ollila *et al.*, 2006; Vounatsos *et al.*, 2015).

5.3.3. Propriedades energéticas

O poder calorífico superior (PCS) encontrado nas amostras variou de 20,89 MJ/kg a 27,77 MJ/kg (Tabela 5). Ao realizar uma correlação com os dados observados na análise imediata (Tabela 3) foi observada uma relação diretamente proporcional entre PCS e teor de materiais voláteis, e inversamente proporcional entre PCS e teor de cinzas.

Tabela 5. Resultados referentes ao poder calorífico superior para as diferentes amostras de CDR.

Amostras	Poder calorífico superior (MJ/kg)
CDR_1	24,15 ± 1,73 b
CDR_2	27,78 ± 0,84 c
CDR_3	23,08 ± 1,49 ab
CDR_4	20,89 ± 1,54 a
CDR_5	21,41 ± 0,90 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Autoria própria.

A amostra CDR_2 obteve o maior PCS, diferenciando-se estatisticamente das demais, além do maior teor de materiais voláteis. Já nas amostras CDR_4 e CDR_5 foram

encontrados os mais baixos valores de PCS e de materiais voláteis e os mais altos valores de cinzas. Essas relações se devem, principalmente, à presença de plásticos, materiais com alto poder calorífico, e à ausência de combustibilidade dos materiais inorgânicos (Bluhm-Drenhaus *et al.*, 2012; Gałko *et al.*, 2023; Grammelis *et al.*, 2009).

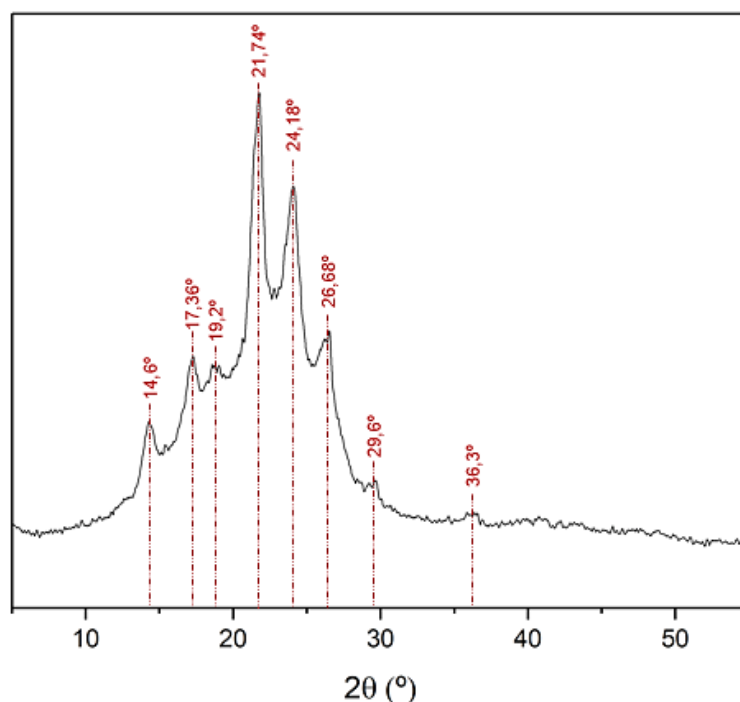
Além das cinzas, outro fator que causa efeito negativo no poder calorífico de CDRs é a umidade (Gałko *et al.*, 2023), o que reforça a importância do armazenamento adequado do material. As amostras CDR_4 e CDR_5 tiveram teor de umidade consideravelmente alto (28,21% e 29,96%) indicando um potencial influenciador nas propriedades energéticas do material. No entanto, como as amostras foram submetidas à secagem após a coleta, a umidade do CDR *in natura* não influenciou nos resultados de PCS adquiridos.

De modo geral, os valores encontrados neste trabalho são semelhantes aos relatados na literatura: 18,00 – 24,00 MJ/kg (Alfè *et al.*, 2022), 16,00 – 18,00 MJ/kg (Skrzyniarz *et al.*, 2023), 19,22 – 22,14 MJ/kg (Sever Akdağ; Atımtay; Sanin, 2016) e 18,65 MJ/kg (Karpan; Abdul Raman; Taieb Aroua, 2021).

5.3.4. Caracterização estrutural

A Figura 3 apresenta os resultados da análise de difração de raios-X do CDR *in natura*, com a indicação aproximada dos principais picos e bandas identificados. É possível identificar as regiões semicristalinas características de alguns polímeros, tendo em vista a presença de picos largos e intensos. Destaca-se os picos em 2θ 21,74° e 24,18° (planos 110 e 200, respectivamente), característicos do polietileno (PE) (Belloni *et al.*, 2022; Furtado *et al.*, 2020).

Figura 3. Difratoograma de raios X obtido a partir do CDR *in natura*.



Fonte: Autoria própria.

Bandas presentes entre 2θ 15° e 26° estão relacionados com a presença do policloreto de vinila (PVC) (Guedri *et al.*, 2020; Jadhav *et al.*, 2022; Liu; Moura *et al.*, 2023), do politereftalato de etileno (PET) e do polipropileno (PP) (Moura *et al.*, 2023).

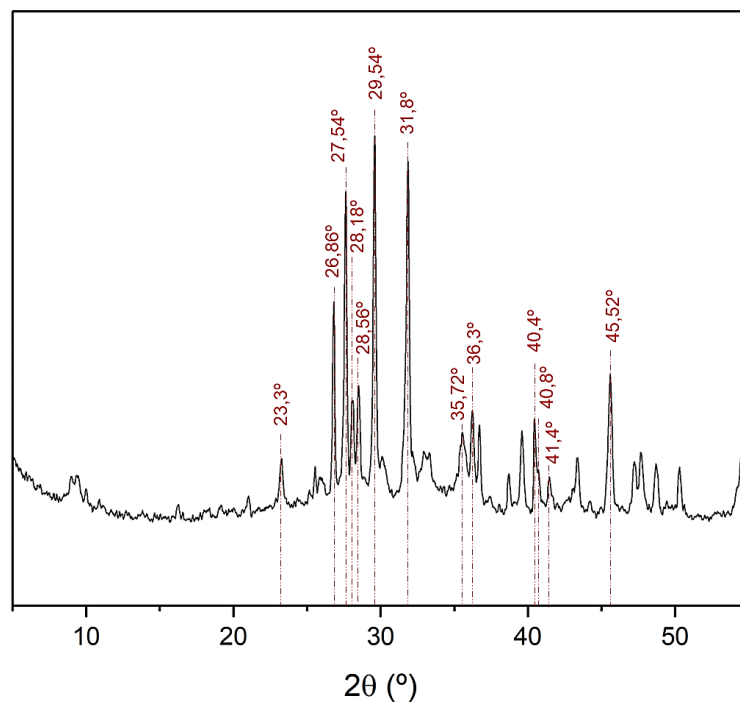
Bandas entre 2θ 15° e 22° também estão relacionados à celulose (Haykiri-Acma; Yaman, 2024), componente químico encontrado nos papéis, tecidos e biomassas. Bandas em torno de 2θ 29° e 35° estão relacionadas com o carbonato de cálcio (Amao; Al-Otaibi; Al-Ramadan, 2022), constituinte da fração inorgânica do CDR.

Como o CDR é composto por uma mistura de materiais, deve-se assumir uma sobreposição de picos e bandas, assim como de regiões cristalinas e amorfas, o que dificulta a identificação exata dos seus constituintes e torna inviável a distinção com precisão. No entanto, os picos característicos do polietileno (PE) estão bem definidos e, embora a análise não tenha caráter quantitativo, a predominância dessas bandas e a intensidade relativa dos demais sinais, cuja ordem de grandeza é próxima ao nível de ruído, indicam que o PE é o principal constituinte do CDR analisado.

A Figura 4 apresenta o DRX realizado nas cinzas do CDR com a identificação aproximada dos principais picos observados. A Tabela 6 resume as fases cristalinas sugeridas,

com base na comparação com fichas do Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD), e as principais posições de difração (2θ).

Figura 4. Difratoograma de raios X obtido a partir das cinzas do CDR.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6. Possíveis fases cristalinas para os picos de difração identificados nas cinzas do CDR. Identificação a partir de fichas ICDD.

Fase cristalina sugerida	Nº ICDD	2θ (°)
Nefelina ($\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$)	3-613	23,3 - 28,18
Quartzo (SiO_2)	78-1254	26,86
Rutilo (TiO_2)	88-1172	27,54 - 36,3 - 41,4
Hidróxido de magnésio e titânio ($\text{MgTi}(\text{OH})_5$)	37-946	28,56 - 40,4
Calcita (CaCO_3)	17-763	28,56 - 29,54 - 31,8
Magnetita (Fe_3O_4)	75-1609	35,72
Silvina (KCl)	89-3619	40,8
Halita (NaCl)	88-2300	45,52

Fonte: Autoria própria.

Entre os compostos identificados, destacam-se a calcita (CaCO_3) e o rutilo (TiO_2), que apresentaram os picos mais intensos no difratograma. A calcita é um carbonato comum e sua presença no CDR, possivelmente, está relacionada às partículas de solo e à composição inorgânica dos papeis e plásticos, uma vez que é adicionada como carga no processo de produção desses materiais. Já o rutilo pode estar associado aos pigmentos e aditivos inorgânicos presentes na fração plástica do CDR.

Compostos como o Hidróxido de magnésio e titânio (MgTi(OH)_5) podem estar relacionados à presença de aditivos em materiais diversos e também à elementos minerais do solo. Compostos como a nefelina ($\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$), o quartzo (SiO_2) e a magnetita (Fe_3O_4) estão relacionados com a fração inorgânica do CDR que permanecem após a combustão, como solo, areia, fragmentos de vidro e cerâmicas.

A presença da halita (NaCl) e da silvina (KCl) corrobora com o observado na análise elementar inorgânica (Tabela 4), na qual o cloro se destacou como um dos principais constituintes. O cloreto de sódio no CDR pode estar associado aos resíduos de embalagens de temperos e condimentos alimentícios presentes.

Além dos compostos descritos, também foram encontrados traços de peroviskita (CaTiO_3), sulfeto de carboneto de titânio (Ti_2CS), calcita manganoica ($\text{Mg}_{0,064}\text{Ca}_{0,936}\text{CO}_3$) e wustita ($\text{Fe}_{0,92}\text{O}$), reforçando a natureza heterogênea do CDR e a presença de uma variedade de fases cristalinas resultantes da combustão. Ainda, ressalta-se que a constituição das cinzas levanta considerações importantes quanto ao potencial de reaproveitamento, especialmente em aplicações na área de materiais cimentícios ou como insumo secundário em processos industriais, com os parâmetros ambientais analisados.

5.4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicaram que o CDR é um material complexo quanto a sua composição e isto dificulta o entendimento de resultados relacionados às suas propriedades. O uso de pequenas quantidades amostrais, preconizadas pelas normas, torna difícil a representatividade do material como um todo. A amostragem é um desafio para a avaliação e classificação do CDR com base nos parâmetros regulamentares.

A partir das propriedades avaliadas foi possível constatar que o CDR tem potencial para ser utilizado como combustível alternativo em diversos segmentos, auxiliando na mitigação dos problemas relacionados à geração e gestão de RSU. No entanto, esforços são necessários para a ampliação do entendimento sobre as propriedades do material, assim como

para a criação de normas e regulamentações mais apropriadas para a sua classificação e utilização.

No Brasil, o uso energético de resíduos ainda se encontra em estágio inicial, o que reforça a importância de pesquisas científicas que contribuam para o desenvolvimento de conhecimento técnico e para a disseminação de informações confiáveis sobre o potencial do CDR. Essas iniciativas são essenciais para fomentar avanços na gestão de resíduos e corroboram com as metas da Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 22 maio 2022.

ALFÈ, M. *et al.* Pyrolysis and Gasification of a Real Refuse-Derived Fuel (RDF): The Potential Use of the Products under a Circular Economy Vision. **Molecules**, [s. l.], v. 27, n. 23, p. 8114, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/23/8114>.

AMAO, A. O.; AL-OTAIBI, B.; AL-RAMADAN, K. High-resolution X-ray diffraction datasets: Carbonates. **Data in Brief**, [s. l.], v. 42, p. 108204, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352340922004085>.

AMMENBERG, J. *et al.* Improving the CO₂ performance of cement, part III: the relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 98, p. 145–155, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614001164>.

ATSTAJA, D. *et al.* Waste-to-Energy in the Circular Economy Transition and Development of Resource-Efficient Business Models. **Energies**, [s. l.], v. 17, n. 16, p. 4188, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/4188>.

BELLONI, E. da S. *et al.* Fatigue and impact load: Experimental investigation on mechanical behavior of high modulus polyethylene yarns. **Polymers and Polymer Composites**, [s. l.], v. 30, 2022. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09673911221103934>.

BIAŁOWIEC, A. *et al.* The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. **Waste Management**, [s. l.], v. 70, p. 91–100, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17306888>.

BLUHM-DRENHAUS, T. *et al.* A model for the devolatilisation of large thermoplastic particles under co-firing conditions. **Fuel**, [s. l.], v. 101, p. 161–170, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236112003985>.

CHOTIKHUN, A. *et al.* Elemental Compositions of Wood Plastic Pellets Made from Sawdust

and Refuse-Derived Fuel (RDF) Waste. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 13, n. 20, p. 11162, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/20/11162>.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14774-1: determination of moisture content: oven dry method: part 1, total moisture: reference method**. Berlin: CEN, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN 14918: Solid biofuels - Determination of calorific value**. Brussels: European Committee for Standardization, 2009.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 529, 2019. Disponível em: <http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>. Acesso em: 24 mar. 2020.

FURTADO, J. B. de M. *et al.* Polyethylene/Fiber Composite - Characterization and Degradation. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 272–285, 2020. Disponível em: http://rvq.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=1164&nomeArquivo=v12n1a21.pdf.

GALKO, G. *et al.* Evaluation of alternative refuse-derived fuel use as a valuable resource in various valorised applications. **Energy**, [s. l.], v. 263, p. 125920, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544222028067>.

GRAMMELIS, P. *et al.* Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of waste recovered fuels. **Fuel**, [s. l.], v. 88, n. 1, p. 195–205, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236108000471>.

GUEDRI, A. *et al.* Synthesis, Characterization, Structural, and Optical Properties of Polyvinyl Chloride/Zinc Oxide Nanocomposite Films for Photocatalysis Application. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, [s. l.], v. 30, n. 12, p. 4884–4894, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10904-020-01604-8>.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S. Treating lignocellulosic biomass with dilute solutions at ambient temperature: effects on cellulose crystallinity. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 14, n. 9, p. 9967–9981, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s13399-022-03085-w>.

INFIESTA, L. R. *et al.* Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 236, p. 715–719, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479719301586>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. [S. l.: s. n.], 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17828: Solid biofuels - Determination of bulk density**. [S. l.]: International Organization for Standardization, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18122: Solid biofuels — Determination of ash content**. [S. l.]: International Organization for Standardization, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18123: Solid biofuels — Determination of volatile matter**. [S. l.]: International Organization for Standardization, 2023.

ITSARATHORN, T. *et al.* The effect of aeration rate and feedstock density on biodrying performance for wet refuse-derived fuel quality improvement. **International Journal of Renewable Energy Development**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 1091–1103, 2023. Disponível em: <https://ijred.cbiorid.org/index.php/ijred/article/view/56035>.

JADHAV, P. S. *et al.* Study of the preparation and properties of polyvinyl chloride/nitrocellulose polymer blends. **Polymer International**, [s. l.], v. 71, n. 8, p. 1009–1021, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pi.6385>.

KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 4041–4052, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261500983X>.

KARPAN, B.; ABDUL RAMAN, A. A.; TAIEB AROUA, M. K. Waste-to-energy: Coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 149, p. 655–664, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582021001233>.

KAZA, S. *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington: [s. n.], 2018.

KHAN, I.; CHOWDHURY, S.; TECHATO, K. Waste to Energy in Developing Countries—A Rapid Review: Opportunities, Challenges, and Policies in Selected Countries of Sub-Saharan Africa and South Asia towards Sustainability. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 3740, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/3740>.

LAOHALIDANOND, K. *et al.* Syngas Generation From Landfills Derived Torrefied Refuse Fuel Using a Downdraft Gasifier. **Journal of Energy Resources Technology**, [s. l.], v. 143, n. 5, 2021. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/energyresources/article/143/5/052102/1087231/Syngas-Generation-From-Landfills-Derived-Torrefied>.

LIU, Y.; ZHANG, C. The influence of additives on crystallization of polyvinyl chloride. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 271–275, 2007. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11595-005-2271-z>.

MOURA, D. S. *et al.* Characterisation of microplastics is key for reliable data interpretation. **Chemosphere**, [s. l.], v. 331, p. 138691, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004565352300958X>.

NASIRI, S.; HAJINEZHAD, A.; KIANMEHR, M. H. Increasing the efficiency of municipal solid waste energy by investigating the effect of die temperature and retention time on the produced pellets: A case study of Kahrizak, Iran. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 173, p. 131–142, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582023002094>.

OLLILA, H. J. *et al.* SEM–EDS characterization of inorganic material in refuse-derived fuels. **Fuel**, [s. l.], v. 85, n. 17–18, p. 2586–2592, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236106001815>.

ÖZBAY, İ.; ÖZBAY, B.; AKDEMİR, U. Biodrying for fuel recovery from sewage sludge: An integrated evaluation by ultimate and proximate analyses. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [s. l.], v. 41, n. 1, 2022. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ep.13723>.

PETERS, J. *et al.* Flexibility of CFB Combustion: An Investigation of Co-Combustion with Biomass and RDF at Part Load in Pilot Scale. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 18, p. 20, 2020.

RAHOTHARN, U.; KHEMKHAO, M.; KAEWPENGKROW, P. R. Solid waste management by RDF production from landfilled waste to renewable fuel of Nonthaburi. **International Journal of Renewable Energy Development**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 968–976, 2023. Disponível em: <https://ijred.cbiorid.org/index.php/ijred/article/view/52956>.

SÃO PAULO STATE DEPARTMENT OF ENVIRONMENT. **Resolução SIMA Nº 047, de 06 de agosto de 2020**. Brasil: 2020.

SARC, R.; LORBER, K. E. Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). **Waste Management**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 1825–1834, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X13002134>.

SEVER AKDAĞ, A.; ATIMTAY, A.; SANIN, F. D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. **Waste Management**, [s. l.], v. 47, p. 217–224, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15301045>.

SKRZYNIARZ, M. *et al.* Possibilities of RDF Pyrolysis Products Utilization in the Face of the Energy Crisis. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 18, p. 6695, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6695>.

STAFFORD, F. N. *et al.* Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 137, p. 1293–1299, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616309386>.

STĘPIEŃ, P. Emisja lotnych związków organicznych z karbonizowanego paliwa z odpadów. **PRZEMYSŁ CHEMICZNY**, [s. l.], v. 1, n. 9, p. 103–105, 2019. Disponível em: <http://sigma-not.pl/publikacja-122271-2019-9.html>.

STRIPPLE, H. *et al.* **CO₂ Uptake in Cement-Containing Products: Background and Calculation Models for IPCC Implementation**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.ivl.se/download/18.72aeb1b0166c003cd0d64/1541160245484/B2309.pdf>.

SULEIMENOVA, B. *et al.* Co-Firing of Refuse-Derived Fuel with Ekibastuz Coal in a Bubbling Fluidized Bed Reactor: Analysis of Emissions and Ash Characteristics. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 16, p. 5785, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/5785>.

SYGUŁA, E. *et al.* The Prediction of Calorific Value of Carbonized Solid Fuel Produced from Refuse-Derived Fuel in the Low-Temperature Pyrolysis in CO₂. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 49, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/1/49>.

TSYNTSARSKI, B. *et al.* Refuse-derived Fuel Based Cobalt Catalysts for Hydrogen Production. **Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences**, [s. l.], v. 75, n. 9, p. 1295–1302, 2022. Disponível em: <http://proceedings.bas.bg/index.php/cr/article/view/155>.

VERDIANI, V. B. *et al.* Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no Brasil. *Ambiente Construído*, [s. l.], v. 25, 2025. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212025000100241&tlng=pt.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Resíduos urbanos como fonte de energia para nossas fábricas**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/residuos-urbanos-como-fonte-de-energia-para-nossas-fabricas/>. .

VOUNATSOS, P. *et al.* Refuse-derived fuel classification in a mechanical–biological treatment plant and its valorization with techno-economic criteria. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1137–1146, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13762-014-0509-z>.

WIJAYA, I. M. *et al.* Refuse Derived Fuel Potential Production from Temple Waste as Energy Alternative Resource in Bali Island. **Journal of Ecological Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 288–296, 2023. Disponível em: <http://www.jeeng.net/Refuse-Derived-Fuel-Potential-Production-from-Temple-Waste-as-Energy-Alternative,161015,0,2.html>.

6. CAPÍTULO 5: PRODUÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) E RESÍDUO DE BAUXITA PARA USO COMO FONTE ENERGÉTICA E COMPONENTE DO CLÍNQUER

Resumo

A utilização de resíduos sólidos amplamente gerados para produção de novos materiais, além de minimizar impactos ambientais, possibilita a criação de produtos com maior valor agregado. Este trabalho teve como objetivo produzir um material compósito com resíduo de bauxita (RB) e Combustível Derivado de Resíduos (CDR) a fim de possibilitar a criação de um combustível mais eficiente e que, ao mesmo tempo, atue como matéria-prima do clínquer. Os resíduos foram obtidos a partir de empresas do estado de São Paulo. Os compósitos foram produzidos em escala laboratorial, por meio de método termo-rotacional, com substituição gradual do CDR pelo RB, totalizando seis formulações distintas. Todos os materiais tiveram suas características avaliadas quanto às propriedades físicas, químicas, energéticas, elementares e mineralógicas. Em relação aos compósitos como combustível, foi visto que todos os tratamentos apresentaram poder calorífico superior acima do mínimo para aplicação em fornos de clínquer, além de aumento da densidade energética volumétrica, comparados com o CDR. Em relação ao uso das cinzas como matéria-prima, observou-se que a inclusão do RB aumentou a temperatura de fusão do material além de ter potencializado sua composição química com os principais óxidos para a formação do clínquer (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3). Dentre os tratamentos, o CDR80_RB20 se destacou pela maior integridade física e melhor adesão entre os constituintes, apresentando condições de ser inserido no pré-calcinador. Os resultados reforçam o duplo potencial dos compósitos: como combustível alternativo e como insumo mineral.

Palavras-chave: valorização de resíduos; coprocessamento; cimento; densidade energética; cinzas

6.1. INTRODUÇÃO

O alumínio é produzido em larga escala em todo o mundo e tem grande importância para a população devido às suas propriedades intrínsecas que possibilitam inúmeras aplicações em diversos setores industriais (Galevsky; Rudneva; Aleksandrov, 2018;

Kolbeinsen, 2020). O material está entre os principais metais produzidos no mundo (40% da produção de metal industrial em 2021) sendo a China a maior produtora (Bhutada, 2022).

A matéria-prima do alumínio é a bauxita, um mineral rico em alumina (Al_2O_3). Para transformar esse mineral em alumínio são necessárias várias etapas, incluindo o refino. O método mais utilizado para o refino e produção da alumina é chamado de Processo Bayer, responsável pela produção de 95% da alumina do mundo (Wang, L. *et al.*, 2019). No entanto, esta produção vem acompanhada da geração de uma grande quantidade de resíduo, conhecido como resíduo de bauxita (RB).

Para cada tonelada de alumina produzida é gerada, em média, 1,5 tonelada de resíduo de bauxita. Este resíduo apresenta características físico-químicas que impedem sua destinação ao ambiente, como o alto pH (~ 12) e a presença de óxidos de ferro, alumínio, sílica, dentre outros. Nesse sentido, além da necessidade de grandes áreas para armazenamento do RB, o seu gerenciamento deve ser muito bem controlado, o que torna o processo complexo e desafiador para as indústrias de alumínio (Evans, 2015, 2016; Gräfe; Power; Klauber, 2011).

Paralelo a isso, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) constituem um grupo de materiais gerado mundialmente em larga escala, acompanhando o exponencial crescimento populacional. O grande volume gerado, aliado ao gerenciamento inadequado, torna o RSU uma problemática para a saúde ambiental e populacional. Em muitas regiões, o sistema de coleta de RSU ainda é ineficiente e até mesmo inexistente. O Brasil gerou aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU em 2022 e o montante de 39% tiveram disposição inadequada (lixões e aterros controlados) (Abrelpe, 2022).

É urgente a criação de propostas que viabilizem a utilização destes resíduos em outros processos e setores a fim de propiciarem uma melhor destinação. Estudos testam a viabilidade de utilização do resíduo de bauxita para a recuperação de metais e demais componentes valiosos (Jayasankar *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2018), fabricação de materiais de construção (Bin *et al.*, 2020; Mucsi *et al.*, 2019; Wang, Y. *et al.*, 2019), tratamento de efluentes (Lyu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2005). A inserção do resíduo de bauxita na indústria do cimento, para produção do clínquer, é uma aplicação de destaque que vem sendo estudada e mostra-se com potencial devido aos óxidos presentes na sua composição química (Ortega *et al.*, 2019; Wang, X. *et al.*, 2021; Wang, Y. *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2009). No entanto, devido ao seu alto teor de álcalis e outros constituintes, apenas pequenas porcentagens são ditas como viáveis para utilização (Wang *et al.*, 2016).

Em relação ao RSU, observa-se um maior interesse no seu aproveitamento energético. O termo *waste-to-energy* é bastante difundido, principalmente nos países da Ásia e Europa, e

remete ao aproveitamento da fração energética dos resíduos sólidos para geração de calor ou energia (Azam *et al.*, 2021; Nowak, 2023; Porshnov; Ozols; Klavins, 2020; Sarc; Lorber, 2013). Nessa temática encontra-se o Combustível Derivado de Resíduos (CDR), uma categoria de combustível alternativo constituído por uma mistura de materiais não perigosos presentes no RSU e no resíduo sólido industrial. As indústrias de cimento são as principais consumidoras do CDR, comprovando que ele pode substituir parcialmente os combustíveis fósseis sem comprometer a qualidade do clínquer (Haas; Weber, 2010; Kara, 2012). No entanto, fatores relacionados às características físico-químicas do CDR, como sua alta heterogeneidade, baixa densidade, teor de umidade e teor de cloro por vezes inviabilizam ou limitam seu uso.

Observa-se que ambos os resíduos têm aplicação possível na indústria cimenteira, porém, ainda apresentam alguns percalços para que a utilização de maiores quantidades seja viável. A produção de um compósito com a junção destes dois materiais mostra-se uma alternativa para resolução desse problema, partindo-se do princípio de que suas características serão modificadas com a produção de um terceiro e novo material (Callister Junior; Rethwisch, 2016). Testes e análises laboratoriais são necessários e fundamentais para verificar as propriedades obtidas no material, suas características, desempenho e, por fim, verificar a viabilidade de produção.

Visto isso, este trabalho tem como objetivo produzir um material compósito à base de CDR e resíduo de bauxita a fim de possibilitar a criação de um combustível mais eficiente e que, ao mesmo tempo, atue como matéria-prima do clínquer. O aproveitamento desses resíduos para a produção de um material compósito, além de minimizar os impactos causados ao meio ambiente, possibilita a criação de um produto inovador e auxilia no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em especial o N° 7: Energia limpa e acessível, o N° 9: Indústria, inovação e infraestrutura, o N° 11: Cidades e comunidades sustentáveis e o N° 12: Consumo e produção responsáveis.

6.2. MATERIAL E MÉTODOS

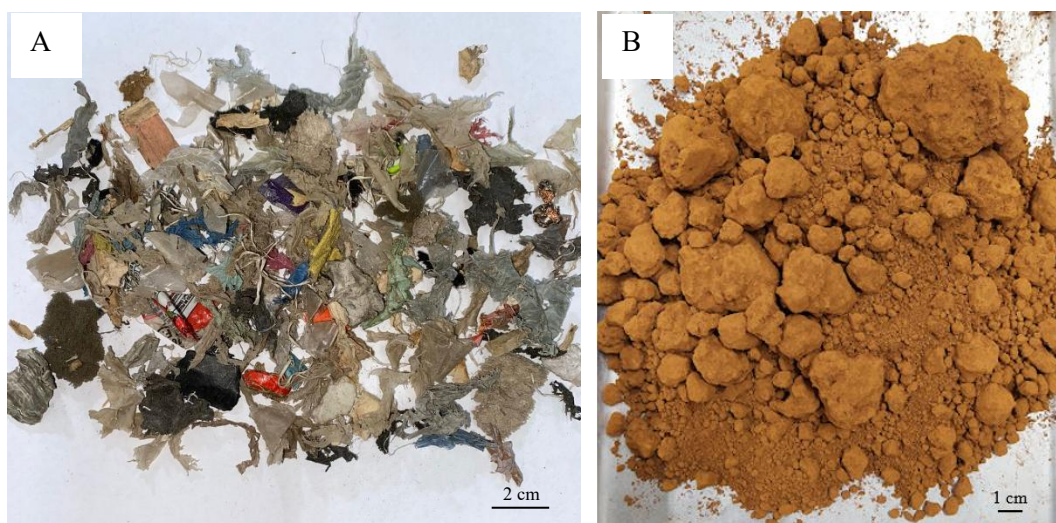
6.2.1. Obtenção e preparo das matérias-primas

O Combustível Derivado de Resíduos (CDR) utilizado no trabalho foi obtido de empresa especializada em gerenciamento de resíduos (Campinas – SP). O material já se encontrava triturado, apresentando partículas com dimensões de até aproximadamente 5 cm

(Figura 1A). O CDR era composto majoritariamente por diferentes tipos de plásticos e, em menores proporções, papeis, biomassas e elementos metálicos e inorgânicos diversos.

O resíduo de bauxita (RB) foi fornecido pela Companhia Brasileira de Alumínio – CBA (Alumínio – SP), proveniente do processo de produção de alumina pelo método Bayer. O material apresentava alto teor de sólidos devido ao pré-tratamento com filtro prensa realizado pela companhia (Figura 1B).

Figura 1. Matérias-primas *in natura*: A) CDR e B) resíduo de bauxita.



Fonte: Autoria própria

Para realização das análises laboratoriais, o CDR passou por processos trituração, moagem e quartejamento. Este último foi realizado repetidamente até a obtenção de amostras de aproximadamente 1 g a fim de garantir uma maior representatividade do material. Já o resíduo de bauxita foi macerado e peneirado redução e uniformização da granulometria.

6.2.2. Caracterização das matérias-primas

Para a determinação do teor de umidade dos materiais (base úmida) foi seguido o preconizado pela norma DIN ISO 14774 – 1 (Deutsches Institut Für Normung - DIN, 2010). Já a densidade a granel foi determinada de acordo com a ISO 17828 (International Organization for Standardization - ISO, 2015). O método relaciona a massa do material contida em um recipiente de volume conhecido.

A análise imediata foi realizada para obtenção do teor de materiais voláteis, de acordo com a norma ISO 18123 (ISO, 2023), teor de cinzas, de acordo com a ISO 18122 (ISO, 2015)

e carbono fixo, por subtração dos teores de materiais voláteis e cinzas encontrados. Todas as análises mencionadas foram realizadas em sextuplicata para o CDR e em triplicata para o RB, tendo em vista a maior homogeneidade do material.

A fim de conhecer a composição elementar inorgânica dos materiais, as cinzas de ambos foram analisadas via Espectroscopia por Energia Dispersiva acoplada à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS) (dados semiquantitativos). Para a análise, foram considerados todos os elementos identificados na amostra. Entretanto, o carbono foi desconsiderado na composição final, a fim de evitar possíveis interferências relacionadas à fita de carbono utilizada na preparação da amostra.

Análises de Difração de Raios-X (DRX) foram realizadas no CDR e no RB utilizando o equipamento Shimadzu XRD-6100, operando a uma tensão de 50,0 kV e corrente de 30,0 mA, com tubo de raios X de cobre (Cu-K α). As amostras foram analisadas no intervalo de 5° a 55° (2 θ), com velocidade de varredura de 2,0 °C·min⁻¹.

Para o CDR, foi determinado o poder calorífico superior (PCS) por meio de um calorímetro IKA C200 em sextuplicata. A análise foi realizada baseando-se na normativa BS EN 14918 (European Committee for Standardization - CEN, 2009). O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado a partir do PCS (Equação 1). A densidade energética volumétrica (DEV) do CDR foi calculada de acordo com a Equação 2. Para o RB, foram conduzidas análises granulométricas tanto do material *in natura* quanto após o processo de maceração.

$$PCI = PCS - 600 \times \left(9 \times \frac{H}{100}\right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior

PCS = Poder calorífico superior

H = Teor de hidrogênio (foi utilizado o teor de hidrogênio relatado na literatura para o polietileno (Baloch *et al.*, 2021; Banivaheb *et al.*, 2022; Mojaver; Azdast; Hasanzadeh, 2021))

$$DEV = D \times PCI \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

DEV = Densidade energética volumétrica

D = Densidade a granel

PCI = Poder calorífico superior

6.2.3. Produção dos compósitos

Os compósitos foram produzidos no laboratório de Biomassa e Bioenergia, localizado na Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba (UFSCar – So). Foram testadas diferentes composições a partir da substituição mássica do CDR pelo RB (Tabela 1) com o intuito de verificar qual mistura melhor atenderia as características físicas e energéticas exigidas para um combustível sólido. Para a produção dos compósitos as matérias-primas utilizadas nas misturas tinham granulometria de < 5 cm e < 35 mesh, para o CDR e resíduo de bauxita, respectivamente.

Tabela 1. Composição dos tratamentos (relação massa/massa).

Identificação dos tratamentos	CDR	RB
	----- % -----	
CDR100_RB0	100	0
CDR90_RB10	90	10
CDR80_RB20	80	20
CDR70_RB30	70	30
CDR60_RB40	60	40
CDR50_RB50	50	50

Fonte: Autoria própria.

Para cada tratamento foi utilizado um total de aproximadamente 500 g dos materiais. Para a produção dos compósitos, foi utilizado um método termo-rotacional que consistiu no aquecimento das matérias-primas, por meio de condução térmica direta, durante agitação mecânica.

Os parâmetros utilizados no processo foram: temperatura: 150 °C (aprox.); tempo de residência: 10 minutos; e rotação: 150 rpm, definidos por meio de testes prévios. Para garantir a formação dos grânulos dos compósitos, após cada batelada, o material resultante do processo era submetido à choque térmico com spray de água para retornar ao estado sólido.

6.2.4. Avaliação dos compósitos

Os compósitos foram avaliados de duas formas: 1) quanto ao potencial como combustível e 2) quanto ao potencial como matéria-prima do clínquer.

Para avaliação do combustível, as propriedades físicas, químicas e energéticas foram analisadas seguindo os mesmos procedimentos descritos na caracterização das matérias-primas. Todas as análises foram realizadas em sextuplicata:

- Densidade a granel – ISO 17828 (International Organization for Standardization, 2015);
- Umidade (base úmida) – DIN EN 14774 – 1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010);
- Granulometria – Utilização do método de peneiramento;
- Durabilidade mecânica – DS/EN 15210-1 (Dansk Standard- Eftertryk uden tilladelse Forbudt, 2010);
- Materiais voláteis – ISO 18123 (International Organization for Standardization, 2023);
- Cinzas – ISO 18122 (International Organization for Standardization, 2015);
- Carbono fixo – Subtração dos teores de materiais voláteis e cinzas encontrados;
- Poder calorífico superior (PCS) – BS EN 14918 (European Committee for Standardization - CEN, 2009);
- Poder calorífico inferior (PCI) – Calculado a partir do PCS (Equação 1);
- Densidade energética volumétrica (DEV) – Calculada a partir do PCI (Equação 2).

Além das análises descritas, os compósitos foram submetidos à análise de pH do extrato solubilizado com a finalidade de verificar possíveis alterações após o processo de produção. A análise foi realizada baseando-se no descrito por Lee *et al.* (2013), em duplicata. Ainda, foram realizadas análises de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) e de Difração de Raios-X (DRX) com o intuito de identificar as principais funcionalidades químicas e fases cristalinas, e avaliar como essas propriedades variam entre as diferentes proporções de CDR e RB.

Para avaliação dos compósitos quanto a utilização como matéria-prima do clínquer, suas cinzas foram analisadas. A Espectroscopia por Energia Dispersiva acoplada à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS) foi utilizada para verificação dos principais elementos constituintes (resultados semiquantitativos). A Difração de Raios-X (DRX) foi

realizada para identificação das fases cristalinas presentes, visando avaliar a compatibilidade mineralógica dos compósitos com o necessário para a produção de clínquer.

Ainda, foi realizado o teste de fusibilidade das cinzas com o objetivo de verificar se a incorporação do resíduo de bauxita alteraria as temperaturas de fusão dos compósitos. O teste foi realizado em triplicata.

6.2.5. Análise estatística

Os dados obtidos a partir da caracterização das matérias-primas e dos compósitos foram testados quanto à homogeneidade, pelo teste de Bartlett, e normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. Posteriormente foram submetidos à análise de variância (ANOVA) ou Kruskal-Wallis e, aos que apresentaram diferença estatística significativa, foi aplicado o teste de Tukey (5% de significância). As análises estatísticas foram realizadas com auxílio dos softwares Origin 2017 versão 94E, Excel e Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019).

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1. Características e propriedades das matérias-primas

6.3.1.1. Combustível Derivado de Resíduos (CDR)

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises realizadas para verificação das propriedades físicas, químicas e energéticas do CDR.

Tabela 2. Médias referentes às propriedades físicas, química e energéticas do CDR.

Propriedades	Valores médios
Densidade a granel (kg/m ³)	94,63 ± 13,45
Umidade (base úmida) (%)	5,67 ± 3,21
Carbono fixo (%)	3,17 ± 1,91
Materiais voláteis (%)	94,14 ± 1,73
Cinzas (%)	2,69 ± 1,73
Poder calorífico superior (PCS) (MJ/kg)	33,91
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	33,13
Densidade energética volumétrica (MJ/m ³)	3.134,83

Fonte: Autoria própria.

Uma vez que essas características em um combustível indicam baixa densidade energética e dificuldades operacionais, alternativas são estudadas para otimizá-las. Chotikhun *et al.* (2023) conseguiram um aumento de densidade no CDR ao misturá-lo com serragem e produzirem pellets. Gundim *et al.* (2025) produziram compósitos com CDR e biomassas por extrusão, alcançando ganhos de densidade de até 2,5 vezes em relação ao CDR *in natura* (de 86,00 kg/m³ para 213,27 kg/m³). Os autores dos trabalhos relataram que os processos auxiliam em uma maior homogeneidade quando observados grandes volumes do combustível.

Altos valores de umidade podem afetar as propriedades energéticas de um combustível (Białowiec *et al.*, 2017; Chotikhun *et al.*, 2023). O CDR analisado apresentou um teor de umidade de 5,67%, sendo considerado baixo e adequado para utilização. Essa propriedade é influenciada diretamente por diversos fatores, entre os quais se destaca a composição do material.

Plásticos em geral, como o polietileno de baixa densidade, tem baixa compatibilidade à água e soluções aquosas, sendo caracterizados como materiais hidrofóbicos (Chotikhun *et al.*, 2023; Coutinho; Mello; de Santa Maria, 2003). Nesse sentido, a umidade do CDR está mais relacionada aos constituintes orgânicos, como as biomassas e os papéis, uma vez que são hidrofílicos (Vounatsos *et al.*, 2015). Outros fatores que podem influenciar na umidade do CDR é a forma como ele foi armazenado e se foram realizados processos de pré-tratamento com secagem (Alfê *et al.*, 2022).

Os resultados referentes à análise imediata mostraram que o CDR analisado era composto majoritariamente por materiais voláteis (94,14%). Este resultado era esperado uma vez que essa propriedade está diretamente relacionada com os plásticos (Bluhm-Drenhaus *et al.*, 2012; Grammelis *et al.*, 2009; Vounatsos *et al.*, 2015). O alto teor de materiais voláteis em um combustível indica sua facilidade de ignição.

O carbono fixo é o constituinte mais resistente à degradação, permanecendo após a volatilização dos demais compostos (Gundim *et al.*, 2025). O CDR analisado apresentou teor de 3,17% e essa pequena fração está relacionada às biomassas e papéis presentes no material. As cinzas constituem a fração restante após finalizado o processo de combustão. O teor de 2,69% observado para o CDR está relacionado aos constituintes inorgânicos do material que não participam da queima. Frações de areia e argila são comumente relatadas para os CDRs (Âriņa *et al.*, 2020; Rahoarn; Khemkhao; Kaewpengkrow, 2023).

Os teores dos constituintes químicos do CDR são variáveis de acordo com sua origem, composição, métodos de armazenamento e possíveis pré-tratamentos. Na literatura é possível encontrar amplas faixas para esses constituintes. Gundim *et al.* (2025) encontraram teores de 84,28%, 10,07% e 5,65% para materiais voláteis, carbono fixo e cinzas em um CDR *in natura*. Já Alfè *et al.* (2022) relataram valores de 77 – 84% para materiais voláteis e 47 – 56% para carbono fixo para CDRs previamente processados via Tratamento Biológico Mecânico (MBT) ou Processo de Secagem Biológica.

O PCS encontrado para o CDR foi de 33,91 MJ/kg sendo consideravelmente alto quando comparado com outros combustíveis alternativos como as biomassas (Brandić *et al.*, 2024). Como descrito anteriormente, uma das propriedades que mais afeta o PCS é a umidade. No entanto, os teores de materiais voláteis e de cinzas também têm influência direta sobre essa propriedade. Os valores de PCS relatados na literatura para CDRs diversos também sofrem grandes variações: 25,64 MJ/kg (Gundim *et al.*, 2025), 13,00 – 20,00 MJ/kg (Chotikhun *et al.*, 2023), 18,00 – 24,00 MJ/kg (Alfè *et al.*, 2022).

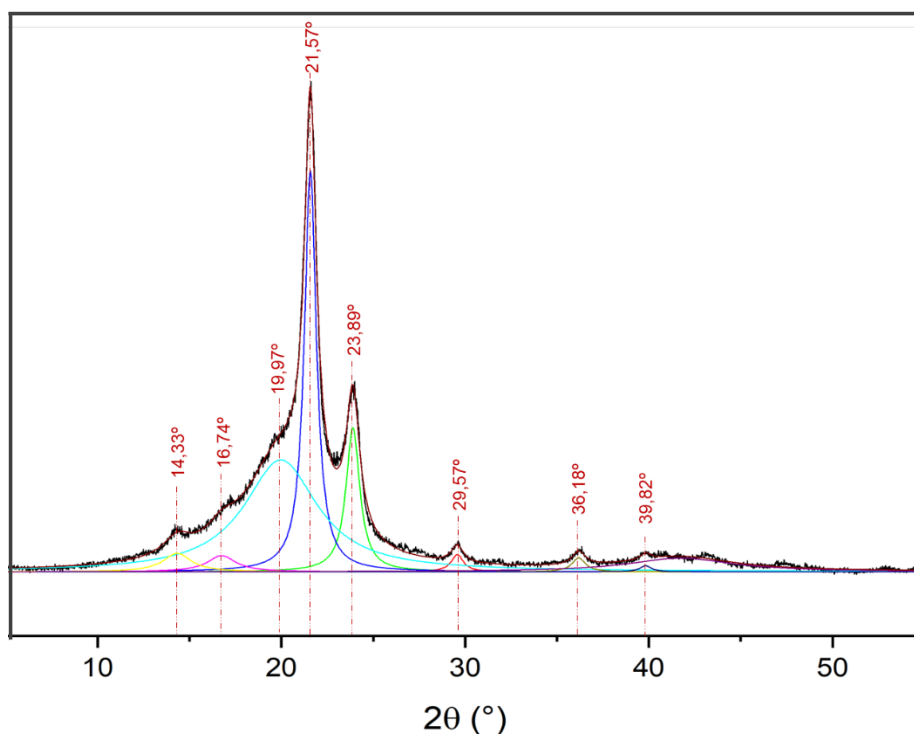
Consequentemente, o CDR apresentou PCI considerado elevado (33,13 MJ/kg) e compatível com os requisitos energéticos para o uso em processos industriais. No entanto, devido à sua baixa densidade (94,63 kg/m³), a densidade energética volumétrica (DEV) calculada foi de 3.134,83 MJ/m³. Esse valor reflete a natureza leve do CDR, composta majoritariamente por frações plásticas e outros materiais de baixa densidade. A DEV representa a quantidade de energia disponível por unidade de volume do material.

Nesse sentido, embora o combustível apresente bom desempenho energético por unidade de massa, a energia disponível por unidade de volume é relativamente baixa. Essa

característica pode impactar aspectos logísticos e operacionais, como o transporte, o armazenamento e a alimentação contínua do combustível nos sistemas térmicos. Esse indicador é especialmente relevante em sistemas onde a alimentação do combustível ocorre de forma volumétrica, como nos fornos de clínquer (Molin Filho, 2020).

A Figura 2 apresenta o difratograma de DRX obtido para o CDR *in natura* e a deconvolução dos picos encontrados. A deconvolução permite uma análise mais detalhada das bandas responsáveis por cada sinal e, juntamente com o ajuste do parâmetro x_c da função, que corresponde à posição central de cada pico ou banda, possibilita a comparação com dados de referência disponíveis na literatura, permitindo a identificação das fases cristalinas presentes no material. A Tabela 3 apresenta a identificação dos possíveis picos de difração relacionados aos materiais plásticos, conforme descrito na literatura.

Figura 2. Deconvolução do difratograma de raios X obtido a partir do CDR *in natura*.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3. Possíveis fases cristalinas para os picos de difração relacionados aos materiais plásticos.

2 θ (°)	Possível fase cristalina	Referência
14,33	Polipropileno (PP)	(Moura <i>et al.</i> , 2023)
16,74	Polipropileno (PP)	(Moura <i>et al.</i> , 2023)
19,97	Polipropileno (PP) ou Polietileno refelitalato (PET)	(Moura <i>et al.</i> , 2023)
21,57	Polietileno (PE)	(Belloni <i>et al.</i> , 2022; Furtado <i>et al.</i> , 2020)
23,89	Polietileno (PE)	(Belloni <i>et al.</i> , 2022; Furtado <i>et al.</i> , 2020)
29,57	Policloreto de vinila (PVC)	(Bhavsar; Tripathi, 2018; Jadhav <i>et al.</i> , 2022)
39,82	Policloreto de vinila (PVC)	(Bhavsar; Tripathi, 2018; Jadhav <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se que além dos plásticos, os picos e bandas encontradas podem estar relacionadas à outros compostos como a celulose (bandas entre 2 θ 15° e 22° (Haykiri-Acma; Yaman, 2024)) e materiais inorgânicos como o carbonato de cálcio (bandas entre 2 θ 29° e 35° (Amao; Al-Otaibi; Al-Ramadan, 2022)).

Os picos característicos do polietileno (PE) estão bem definidos. Embora a análise não tenha caráter quantitativo, a predominância dessas bandas e a intensidade relativa dos demais sinais, cuja ordem de grandeza é próxima ao nível de ruído, indicam que há uma predominância do PE no CDR analisado, sendo as demais atribuições apenas suposições sobre sua possível composição.

Os resultados das análises por MEV/EDS das cinzas do CDR serão apresentados juntamente com os dados obtidos para as cinzas dos compósitos, de modo a permitir uma comparação direta do comportamento mineral e elementar após o tratamento térmico.

6.3.1.2. Resíduo de bauxita (RB)

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise granulométrica realizada no RB antes e após o processo de maceração. A análise foi realizada em ambos estados físicos para efeitos de comparação entre o material *in natura* e o utilizado no processo.

Tabela 4. Resultados da análise granulométrica do RB *in natura* e após processo de maceração.

Abertura da peneira (mesh)	<i>In natura</i> (%)	Macerada (%)
1/4	25,06 ± 2,47	-
5	10,62 ± 0,27	-
9	14,16 ± 0,29	-
35	25,17 ± 0,04	24,44
60	5,80 ± 0,21	25,08
100	4,19 ± 0,27	11,29
150	2,70 ± 0,11	10,65
200	2,15 ± 0,03	8,63
Fundo	9,54 ± 1,66	19,18

Fonte: Autoria própria.

A granulometria do RB apresentou diferenças significativas antes e após o processo de maceração. Observou-se o aumento da porcentagem de partículas muito finas quando a maceração foi realizada (< 200 mesh). Partículas ultra finas são relatadas na literatura como característica intrínseca do RB, sendo esse um dos principais motivos do interesse em sua aplicação como agente adsorvente (Liu; Li; Zhou, 2018; Tang *et al.*, 2025).

Os resultados indicam que o material obtido da indústria apresenta formação de aglomerados rígidos, provavelmente em decorrência dos processos de secagem e estocagem. Essa análise comprova que a maceração do resíduo é recomendada como etapa preparatória, uma vez que a redução do tamanho das partículas aumenta a área superficial disponível, favorecendo sua adesão a outros materiais.

Na Tabela 5 estão descritos os valores médios referentes às propriedades físicas e composição química do RB.

Tabela 5. Valores médios referentes à densidade, umidade e análise imediata do RB.

Propriedades	Valores médios
Densidade a granel (kg/m ³)	1.262,51 ± 21,09
Umidade (base úmida) (%)	13,25 ± 0,93
Materiais voláteis (%)	14,60 ± 0,10
Carbono fixo (%)	0
Cinzas (%)	85,40 ± 0,10

Fonte: Autoria própria.

A densidade a granel obtida para o RB *in natura* foi consideravelmente superior à observada para o CDR e apresentou variação em relação ao encontrado na literatura. Como discutido anteriormente, a densidade a granel de um material está relacionada, principalmente, com a granulometria das partículas. Wang e Liu (2012) encontraram densidade de 2.700 kg/m³ para o RB com granulometria entre 0,8 µm e 50 µm, tamanhos consideravelmente menores do que os encontrados para o RB *in natura*. Além disso, os autores destacaram que a origem do RB também pode provocar variação entre propriedades.

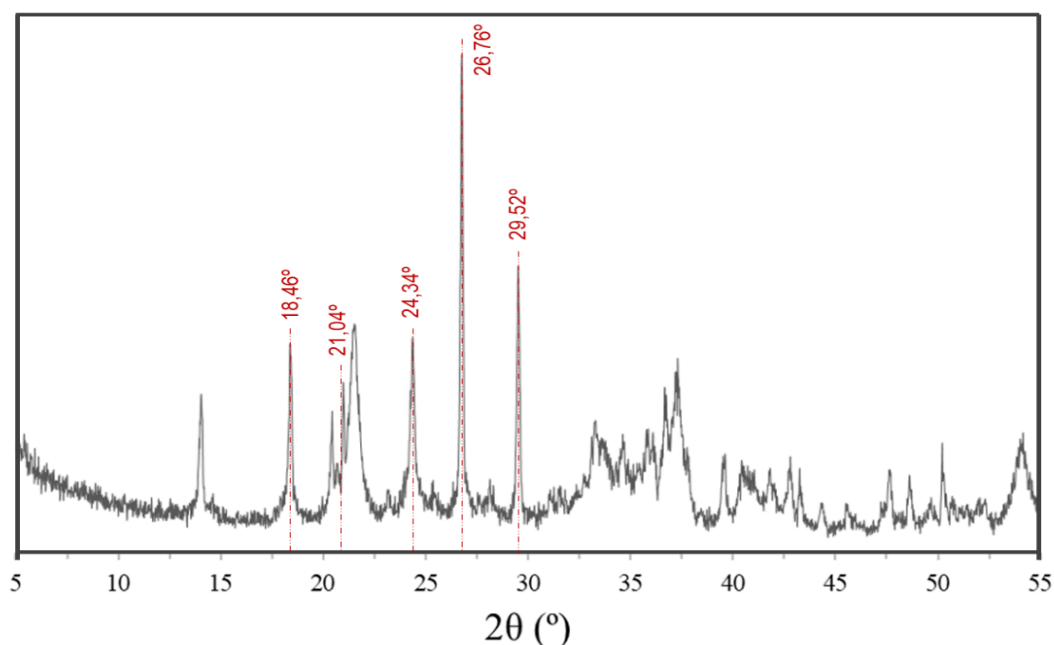
A umidade apresentada pelo RB é considerada baixa, tendo em vista que uma das características desse resíduo é sua geração com altos teores de líquidos (International Aluminium Institute - AIA, 2022). A utilização do filtro prensa, no processo industrial, é responsável pela redução da umidade do RB, fazendo com que o material atinja um teor de sólidos na faixa de 75% a 80% (AIA, 2022; Moreno; Seno, 2015). A conversão das tecnologias de disposição de resíduos, de sistemas úmidos para secos, tem ganhado cada vez mais adesão em função das regulamentações ambientais voltadas ao impacto no solo e nas águas subterrâneas, especialmente devido à lixiviabilidade dos resíduos (Dentoni; Grosso; Pinna, 2021).

Em relação à análise imediata, observou-se que o RB era majoritariamente composto por materiais inorgânicos, representados pelas cinzas (85,40%), seguido dos materiais voláteis (14,60%) sendo constatada ausência de carbono fixo. Ressalta-se que o baixo desvio padrão encontrado para as análises demonstra a homogeneidade do material.

Os resultados da análise imediata eram esperados tendo em vista que o RB é composto principalmente por partículas minerais, havendo ausência de componentes orgânicos. Essas características são corroboradas pela composição típica do RB relatada na literatura: óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de sódio (Na_2O), dióxido de silício (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO) (Wang; Liu, 2012; Zhang *et al.*, 2021).

A Figura 3 apresenta o difratograma de DRX realizado para o RB com a identificação dos principais picos observados. Já a Tabela 6 apresenta as possíveis fases cristalinas identificadas por comparação com fichas do banco de dados ICDD, e as principais posições de difração (2θ).

Figura 3. Difratograma de DRX do resíduo de bauxita.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6. Possíveis fases cristalinas (ICDD), para os picos de difração identificado no resíduo de bauxita.

Fase cristalina sugerida	Nº ICDD	2θ (°)
Hematita (Fe ₂ O ₃)	89-8103	24,34 - 28,18
Gibbsita (Al(OH) ₃)	1-264	18,46
Quartzo (SiO ₂)	82-511	21,04 – 26,76
Calcita (CaCO ₃)	2-629	29,52
Sodalita (sódio-alumínio-silicato)	11-221	21,04
Sodalita (silicato de sódio-alumínio-titânio)	46-866	24,34

Fonte: Autoria própria.

A identificação realizada pelas fichas ICDD está de acordo com as principais fases mineralógicas do resíduo de bauxita descritas na literatura (Gräfe; Power; Klauber, 2011; Lyu *et al.*, 2021). Os minerais de ferro (hematita, goethita) e quartzo são provenientes da bauxita e não reagem significativamente no processo Bayer pois são inertes em relação à soda cáustica. A presença de calcita está relacionada ao uso de cal e demais aditivos no processo que, posteriormente, irá reagir com o carbonato de sódio (Na₂CO₃) (Gräfe; Power; Klauber, 2011; Seno Júnior *et al.*, 2024).

A sodalita é formada pela reação da caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) com NaOH e ânions como Cl⁻ ou SO₄²⁻, formando fases sodalíticas típicas do processo Bayer (Lyu *et al.*, 2021). A Gibbsita é proveniente da bauxita e pode permanecer como fase residual, não reagindo completamente durante a digestão alcalina. Devido à similaridade geral entre os compostos presentes no RB, ressalta-se que, além das fases mineralógicas mencionadas, outras fases aluminosilicáticas e de titânio podem estar presentes em menores proporções, como anatase e rutilo (TiO₂), cancrinita (Na₆Ca₂[(CO₃)₂Al₆Si₆O₂₄]·2H₂O) e nefelina ((Na,K)(AlSiO₄)) (Wang, Y. *et al.*, 2021; Lyu *et al.*, 2021).

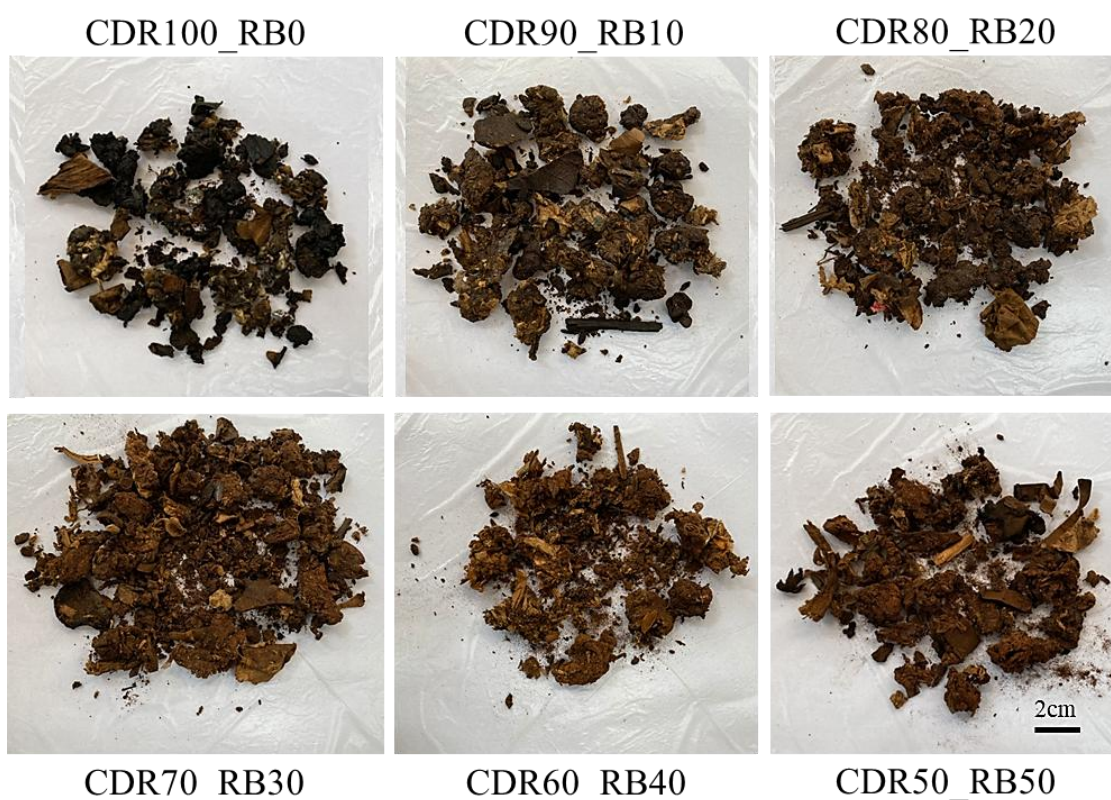
Os resultados das análises por MEV/EDS das cinzas do RB serão apresentados juntamente com os dados obtidos para as cinzas dos compósitos.

6.3.2. Características e propriedades dos compósitos produzidos

6.3.2.1. Propriedades físicas

Todos os seis tratamentos processados pelo método termo-rotacional resultaram na formação de material aglomerado com formatos diversos (Figura 4). O material apresentou aspecto torrificado, principalmente em algumas biomassas presentes (fragmentos de madeira). A partir dos resultados obtidos pela análise granulométrica foi possível observar que a grande maioria dos aglomerados (> 50%) obtiveram tamanho maior que 12,7 mm (peneira com abertura de 1/2 mesh) (Tabela 7).

Figura 4. Compósitos produzidos com CDR e RB.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 7. Análise granulométrica dos compósitos.

Abertura da peneira (mesh)	CDR100_ RB0	CDR90_ RB10	CDR80_ RB20	CDR70_ RB30	CDR60_ RB40	CDR50_ RB50
1	5,6	0	0	11,0	8,3	2,5
3/4	17,6	26,7	30	19,2	28,6	24,9
1/2	45,4	44,4	46,1	30,8	28,9	29,3
1/4	24,4	19,0	14,5	15,8	14,0	16,4
9	5,8	8,5	7,2	15,0	8,9	10,8
60	1,0	1,3	1,7	5,7	5,3	7,1
200	0,1	0,2	0,4	2,0	4,8	6,8
Fundo	0	0	0,1	0,3	1,2	2,2

Fonte: Autoria própria.

Observou-se que a adição do resíduo de bauxita resultou no aumento da quantidade de partículas finas (< 60 mesh), sendo esse aumento gradativo conforme maiores proporções do resíduo eram incorporadas. As partículas eram, majoritariamente, provenientes do RB e esse resultado está relacionado à dificuldade de adesão dessas partículas à matriz polimérica quando a quantidade adicionada ultrapassa a capacidade de incorporação da matriz.

A granulometria do combustível para utilização em fornos de cimento deve ser levada em consideração pois trata-se de uma das principais propriedades que afetam os locais onde os combustíveis podem ser queimados, seja no pré-calcinador ou no forno (Abu-Elyazeed *et al.*, 2021). Entende-se que quanto menor o tamanho da partícula, maior será sua área superficial, o que em muitos casos é um ponto vantajoso na queima (Harrisson, 2019). Nesse sentido, em comparação com a utilização do CDR *in natura*, entende-se que os compósitos obtiveram uma maior homogeneidade granulométrica, facilitando a alimentação.

A partir do teste de tamboramento realizado nos compósitos foi possível observar uma redução gradativa do Índice de Durabilidade Mecânica (IDM) à medida em que era aumentado o teor de RB, tendo em vista o aumento da porcentagem de finos após o teste (Tabela 8).

Tabela 8. Propriedades físicas dos compósitos à base de CDR e RB.

Tratamentos	Densidade (kg/m ³)	Umidade	IDM
		----- % -----	
CDR100_RB0	223,63 ± 18,39 a	0,002 ± 0,001	95,29
CDR90_RB10	222,88 ± 18,50 a	0,002 ± 0,00	92,04
CDR80_RB20	213,27 ± 18,23 a	0,002 ± 0,00	91,76
CDR70_RB30	211,39 ± 49,49 a	0,002 ± 0,00	81,99
CDR60_RB40	185,35 ± 25,05 ab	0,002 ± 0,00	81,12
CDR50_RB50	162,25 ± 21,48 b	0,002 ± 0,01	74,54

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Autoria própria.

Esse resultado sugere que a incorporação excessiva do resíduo de bauxita pode ter dificultado a fusão das frações plásticas do CDR, reduzindo sua fluidez durante o processamento térmico e comprometendo a coesão da matriz com os demais constituintes do compósito, tornando-o mais suscetível à fragmentação. Esse mesmo raciocínio pode ser aplicado aos resultados de densidade.

As densidades dos compósitos foram semelhantes estatisticamente até a inclusão de 30% de resíduo de bauxita (média de 217,79 kg/m³). Reduções significativas foram observadas para os tratamentos com maiores porcentagens, alcançando 185,35 kg/m³ no CDR60_RB40 e 162,25 kg/m³ no CDR50_RB50.

Esses resultados são contrários ao esperado, uma vez que o resíduo de bauxita possui densidade consideravelmente superior à do CDR. Dessa forma, esse comportamento pode ser atribuído à dificuldade de aglomeração da matriz polimérica quando altas quantidades do resíduo são incorporadas, comprometendo a compactação do material.

Baixas densidades em combustíveis em geral significam dificuldades nos processos de transporte e estocagem além da baixa densidade energética e necessidade de grandes volumes (da Silva *et al.*, 2020; Özbay; Özbay; Akdemir, 2022; Rivaldi *et al.*, 2024). Especificamente nos combustíveis para produção de clínquer, a baixa densidade pode ser um problema quando grandes volumes precisam ser transportados para alimentação do sistema, por correias e esteiras (Molin Filho, 2020). Ao realizar uma comparação com a densidade do CDR *in natura* (94,63 kg/m³) e de outros combustíveis utilizados no coprocessamento em cimenteiras, como

misturas com biomassas diversas (150 kg/m³ (Abu-Elyazeed *et al.*, 2021)), todos os compósitos produzidos obtiveram melhorias nessa propriedade.

A umidade dos compósitos permaneceu estável, com teor de 0,0% em todos os tratamentos, sendo consideravelmente menor do que os teores apresentados pelas matérias-primas (5,67 e 13,25% para o CDR e o RB, respectivamente). A significativa redução de umidade é explicada pelo processo de produção dos compósitos uma vez que os materiais foram submetidos às temperaturas em torno de 150 °C para formação dos aglomerados.

A umidade de um combustível afeta diretamente a sua ignição e capacidade calorífica. Devido à isso, as indústrias de cimento tem preferência por combustíveis secos (Molin Filho, 2020). A utilização de combustíveis alternativos como o CDR e biomassas lignocelulósicas em geral, geralmente são relacionadas com pré-tratamentos, incluindo a secagem, a fim de otimizar suas propriedades (Bhatsada *et al.*, 2023; da Silva *et al.*, 2020; Rivaldi *et al.*, 2024). Esses processos tornam a utilização do material mais oneroso e comprometem a viabilidade econômica do seu uso em largas escalas. O processo de produção dos compósitos contribuiu para a homogeneização da umidade, aspecto de difícil controle no CDR *in natura*, reduzindo eventuais custos com secagem.

De modo geral, entende-se que o método termo-rotacional utilizado, além de alcançar o principal objetivo que era promover a mistura dos materiais, propiciou melhorias nas propriedades físicas do combustível. Essa comparação foi realizada com o CDR *in natura*, já utilizado em coprocessamento nos fornos de clínquer.

6.3.2.2. Propriedades químicas e estruturais

Os resultados obtidos a partir da análise imediata e da análise de pH dos compósitos estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados da análise imediata e de pH dos compósitos à base de CDR e RB.

Tratamentos	Carbono fixo	Materiais voláteis	Cinzas	pH
	----- % -----			
CDR100_RB0	3,80 ± 0,66 a	92,22 ± 1,22 a	3,98 ± 1,00 a	7,26 ± 0,06
CDR90_RB10	2,62 ± 0,68 ab	86,40 ± 1,70 ab	10,98 ± 1,12 a	7,39 ± 0,05
CDR80_RB20	2,18 ± 1,07 bc	79,00 ± 3,08 bc	18,82 ± 3,42 b	7,60 ± 0,01
CDR70_RB30	1,08 ± 0,73 cd	77,08 ± 4,80 c	21,84 ± 4,73 b	7,52 ± 0,04
CDR60_RB40	0,56 ± 0,45 d	74,72 ± 4,37 c	24,72 ± 4,76 b	7,70 ± 0,05
CDR50_RB50	1,29 ± 0,26 cd	76,96 ± 7,67 c	21,78 ± 7,63 b	7,63 ± 0,14

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Autoria própria.

Houve diminuição dos teores de carbono fixo e de materiais voláteis à medida em que eram acrescidas as quantidades de RB. Já para os teores de cinzas, foram observados aumentos. Esses resultados eram esperados e estão de acordo com as composições químicas das matérias-primas. O RB, por ter sua composição predominantemente composta por elementos inorgânicos, além de não contribuir com os aspectos energéticos do compósito, aumenta significativamente a porcentagem de cinzas.

Geralmente, os altos teores de cinzas de combustíveis alternativos, como o CDR, são associados à problemas como desgaste de equipamentos e incrustações, elevando os custos de manutenção (Maciejczyk *et al.*, 2023). No entanto, para a indústria cimenteira, as cinzas não são um problema já que permanecem no processo, sendo incorporadas como matéria-prima do clínquer.

O processo de clínquerização (formação do clínquer no forno) requer a presença de minerais como o Fe, Si, Mn dentre outros (Molin Filho, 2020). Nesse sentido, a inclusão do RB junto ao CDR objetivou o enriquecimento das cinzas do combustível com esses minerais. Embora essa inserção tenha provocado reduções nas demais propriedades químicas, os teores obtidos são considerados aceitáveis em todos os tratamentos. A soma dos teores de materiais voláteis e carbono fixo próximos ou superiores a 80% sugere uma boa combustibilidade, por se aproximar dos valores típicos de carvões vegetais, que no passado apresentaram bom desempenho nos fornos (Molin Filho, 2020).

Uma das principais características do RB é sua alta alcalinidade, fator que o torna um resíduo de manejo complexo (Gräfe; Power; Klauber, 2011). Nesse sentido, a análise de pH teve como intuito verificar possíveis alterações dessa propriedade nos compósitos em relação ao pH do RB. O pH do extrato solubilizado do RB também foi analisado, apresentando valor de 10,40.

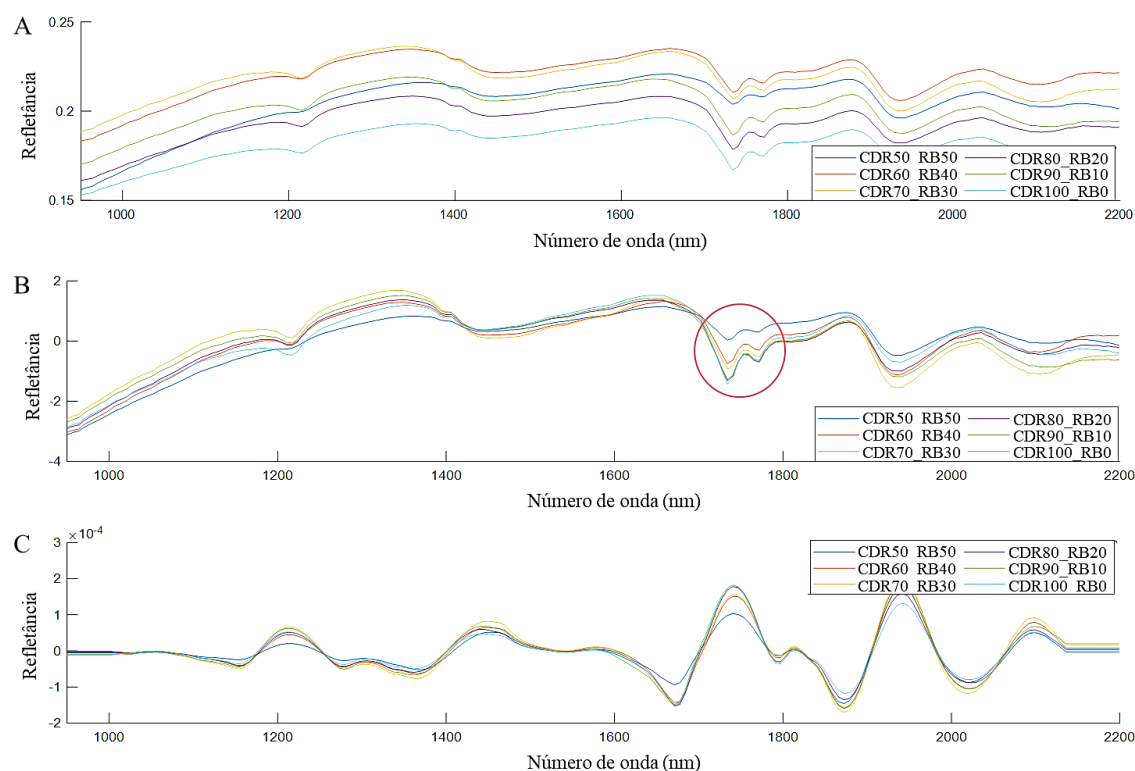
Os resultados de pH obtidos para os compósitos revelaram valores inferiores ao apresentado pelo RB, sendo mais próximos do valor encontrado para o compósito constituído apenas por CDR (7,26). Não foi possível constatar tendência de acréscimos de valores com o aumento do teor de RB, como era esperado, e isso, provavelmente, se deve à amostragem. No entanto, foi possível constatar que a mistura do RB com o CDR propiciou consideráveis reduções no pH do material final pela própria diluição do material na matriz de CDR.

Seno Júnior *et al.* (2024), ao submeterem misturas de RB e CDR à pirólise em diferentes temperaturas (200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C), observaram alterações significativas no pH dos materiais. Os autores destacaram que, já a 200 °C, o processo térmico foi capaz de provocar mudanças na alcalinidade das amostras.

No presente trabalho, embora não tenha sido realizada uma pirólise clássica, as amostras foram submetidas a um aquecimento térmico em sistema fechado, podendo-se supor que as temperaturas dentro do sistema atingiram cerca de 200 °C. Ainda, foi observada liberação de fumaça e alteração visual dos materiais, o que indica que ocorreram transformações térmicas relevantes. Assim, além da diluição do RB na matriz de CDR, é possível supor que o processo térmico tenha contribuído para modificações na composição química superficial do resíduo, afetando seu pH, semelhantemente ao relatado por Seno Júnior *et al.* (2024).

A Figura 5 apresenta os espectros obtidos da análise de NIR. Os espectros médios originais dos dados hiperespectrais (A) foram significativamente afetados por deslocamentos na linha de base. Para melhor caracterizar as propriedades de absorção de luz dos componentes químicos, foram aplicadas transformações SNV (*Standard Normal Variate* ou variável normal padrão) (B) e segunda derivada (C).

Figura 5. A) Espectros NIR obtidos para os compósitos produzidos; B) Espectros com pré-tratamento SNV; e C) Segunda derivada dos espectros com pré-tratamento SNV.



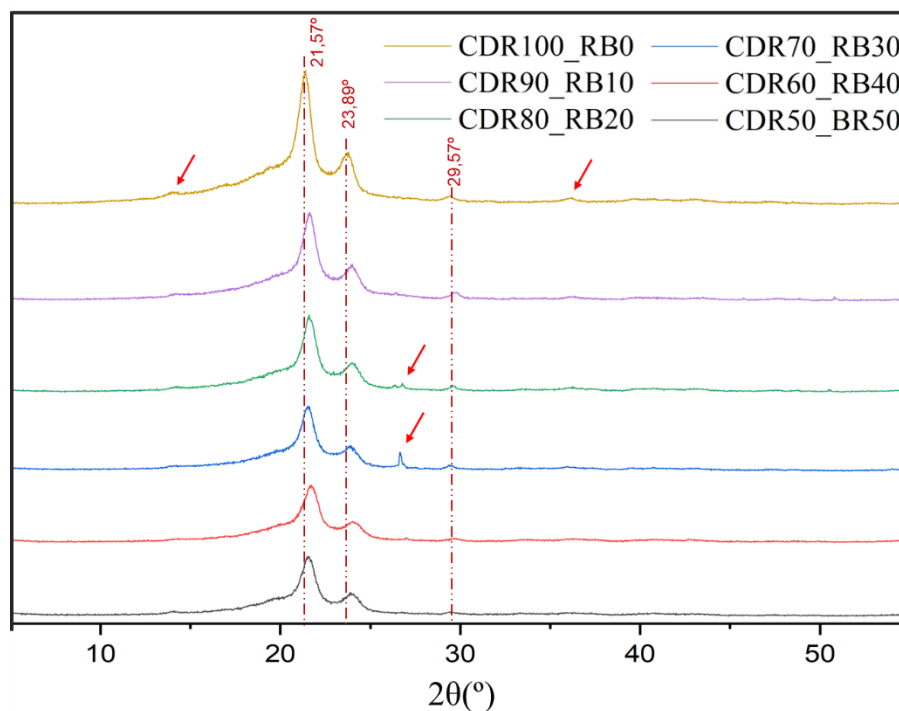
Fonte: Autoria própria.

Todos os compósitos apresentaram comportamentos de refletância semelhantes. No entanto, como mostrado na Figura 5B, a depressão observada na faixa de 1700–1800 nm, mais acentuada nas amostras com maior teor de CDR, indica um aumento da absorção nessa região espectral. Essa faixa é comumente associada à presença de ligações C–H e S–H, características de componentes orgânicos como plásticos e borrachas.

O resultado encontrado indica que houve uma diluição dos componentes orgânicos com a inclusão do resíduo de bauxita. Ainda, servem como validação composicional dos compósitos produzidos, indicando que houve uma mistura adequada entre os materiais.

A Figura 6 apresenta os difratogramas obtidos para os compósitos com indicações dos principais picos observados.

Figura 6. Difratomogramas de raios X obtidos para os compósitos produzidos.



Fonte: Autoria própria.

Observou-se que os padrões de difração são semelhantes entre as amostras, com a maioria dos picos e bandas compartilhando posições e intensidades semelhantes em todos os tratamentos. Verificou-se que a inserção do RB ocasionou deslocamento dos principais picos, indicando alterações na estrutura cristalina e semicristalina do compósito. Ainda, as amostras CDR80_RB20 e CDR70_RB30 apresentaram um pico adicional em torno de $26,6^\circ$ (2θ), o qual não é observado nas demais composições. Já a amostra CDR100_RB0 apresenta algumas bandas que foram suavizadas nos demais tratamentos.

Os picos mais evidentes ($21,57^\circ$ e $23,98^\circ$), também observados no CDR *in natura*, correspondem ao polietileno (PE) (Belloni *et al.*, 2022; Furtado *et al.*, 2020). O pico observado em $26,6^\circ$ pode indicar a presença da poliamida (PA) ou policloreto de vinila (PVC) (Moura *et al.*, 2023). Já o pico em $29,57^\circ$ pode estar relacionado tanto ao PVC (Bhavsar; Tripathi, 2018; Jadhav *et al.*, 2022) quanto ao carbonato de cálcio (Amao; Al-Otaibi; Al-Ramadan, 2022).

Assim como verificado no CDR *in natura*, os picos atribuídos ao PE predominaram, indicando que este permaneceu como o principal constituinte dos compósitos. Ainda, deve-se considerar a sobreposição de picos e isso está relacionado com a heterogeneidade do CDR, já que a variabilidade entre as partículas pode influenciar diretamente os padrões de difração.

6.3.2.3. Propriedades energéticas

A Tabela 10 apresenta os resultados das propriedades energéticas avaliadas nos compósitos. Os dados relacionados ao PCI e à densidade energética volumétrica (DEV) foram calculados para cada tratamento.

Tabela 10. Propriedades energéticas dos compósitos produzidos.

Tratamentos	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	DEV (MJ/m ³)
CDR100_RB0	34,94 ± 2,41 a	34,16	7639,52
CDR90_RB10	32,71 ± 0,68 ab	32,01	7133,73
CDR80_RB20	29,55 ± 2,90 bc	28,92	6167,82
CDR70_RB30	29,44 ± 1,42 bc	28,89	6107,02
CDR60_RB40	28,26 ± 1,17 c	27,79	5151,57
CDR50_RB50	23,51 ± 3,73 d	23,12	3751,50

Fonte: Autoria própria.

O PCS dos compósitos foi reduzido gradativamente com a inclusão do RB e isso está, mais uma vez, relacionado ao aumento do teor de cinzas. Ainda assim, todos os tratamentos apresentaram valores acima do mínimo recomendado de 14,64 MJ/kg para aplicação nos fornos de clínquer, mantendo a estabilidade do processo (Molin Filho, 2020). O autor destaca que o principal combustível dos fornos de clínquer (coque verde de petróleo) tem um PCS de 35,15 MJ/kg e que sua substituição por combustíveis alternativos deve levar em consideração a compensação de energia, realizada com altas vazões, ou seja, com a injeção de maiores quantidades de combustível no forno.

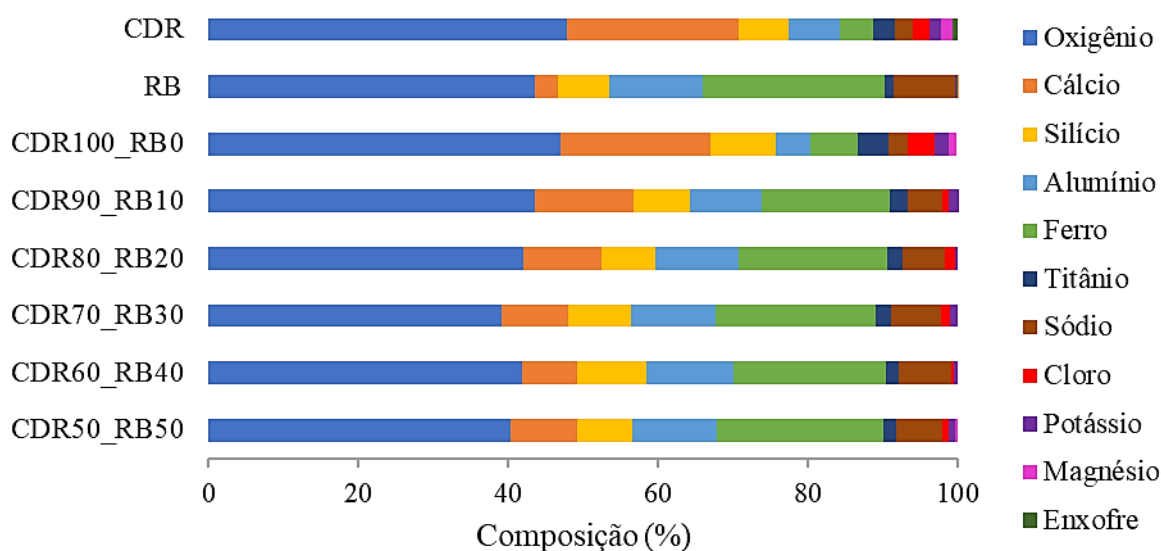
Os compósitos avaliados atenderam ao critério de PCS e, também, apresentaram um aumento expressivo na densidade energética volumétrica, comparado com a DEV do CDR *in natura* (3.134,83 MJ/m³). Este resultado está diretamente relacionado ao ganho de densidade a granel promovido pelo processo de produção. Essa característica é particularmente vantajosa do ponto de vista operacional já que combustíveis com maior DEV ocupam menos espaço no armazenamento e exigem menor volume de transporte. Além disso, permitem a

manutenção da eficiência térmica do processo com menor volume de combustível, otimizando o a alimentação nos sistemas de queima.

6.3.2.4. Caracterização das cinzas dos compósitos

A Figura 7 apresenta a composição química elementar obtida por MEV/EDS a partir das cinzas dos compósitos e das matérias-primas (CDR e RB).

Figura 7. Composição química elementar dos compósitos e das matérias-primas.



Fonte: Autoria própria.

A análise elementar das cinzas obtidas por EDS evidenciou as diferenças entre o CDR e o RB, especialmente quanto à distribuição dos elementos majoritários. O CDR se mostrou mais diverso quimicamente com elevadas concentrações de cálcio (22,97%) e oxigênio (47,81%), compatíveis com a presença de cargas minerais presentes nos papéis e plásticos. Já o RB destacou-se pelos altos teores de ferro (24,28%), alumínio (12,39%) e sódio (8,09%), refletindo sua origem industrial e a presença de óxidos metálicos oriundos do processo Bayer.

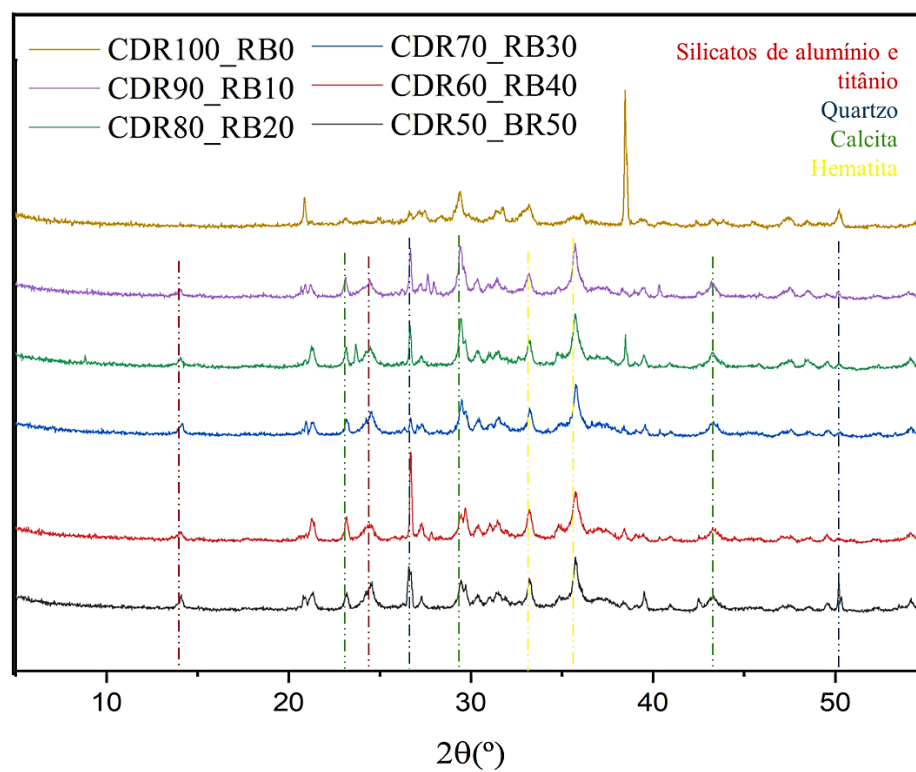
Nos compósitos, observou-se uma composição elementar intermediária em relação ao encontrado nas matérias-primas. O teor de cálcio diminuiu, enquanto os teores de alumínio e ferro aumentaram, resultando em uma composição química mais próxima da desejada para matérias-primas de clínquer. Para fornos de cimento, cálcio, alumínio, sílica e potássio compõem a base da formulação do clínquer, e os teores desses elementos podem ser

adequadamente corrigidos por meio do balanço de massa entre os materiais utilizados (Molin Filho, 2020).

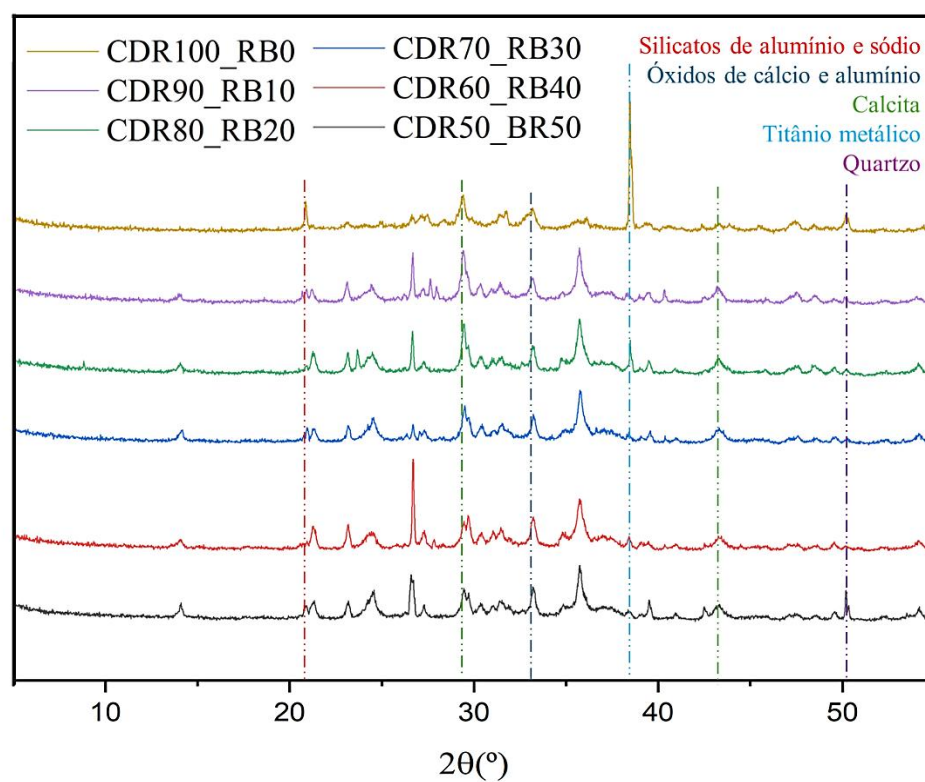
Para melhor compreensão do comportamento mineralógico dessas cinzas e identificação das fases formadas, os resultados podem ser relacionados com as análises por DRX, apresentadas na Figura 8. Foram realizadas comparações entre os difratogramas dos compósitos formados e os padrões individuais das matérias-primas. Em (A), observa-se a comparação com o difratograma do RB, enquanto em (B) é mostrada a comparação com o difratograma do CDR.

Figura 8. Difratomogramas de raios X obtidos dos compósitos. A) Comparação com as fases do RB e B) Comparação com as fases do CDR.

A



B



Fonte: Autoria própria.

Em ambas as análises, observou-se que os compósitos preservaram fases cristalinas características de cada material de origem. Na Figura 8A, destacam-se os picos associados à hematita, quartzo, calcita e silicatos de alumínio e titânio, fases tipicamente observadas no RB. Alguns desses picos são mais evidentes em compósitos com maiores proporções de RB, embora não tenha sido possível observar um aumento expressivo na intensidade dos sinais com a adição do resíduo. Isso pode estar relacionado à presença de material amorfo e ao efeito de diluição entre os constituintes.

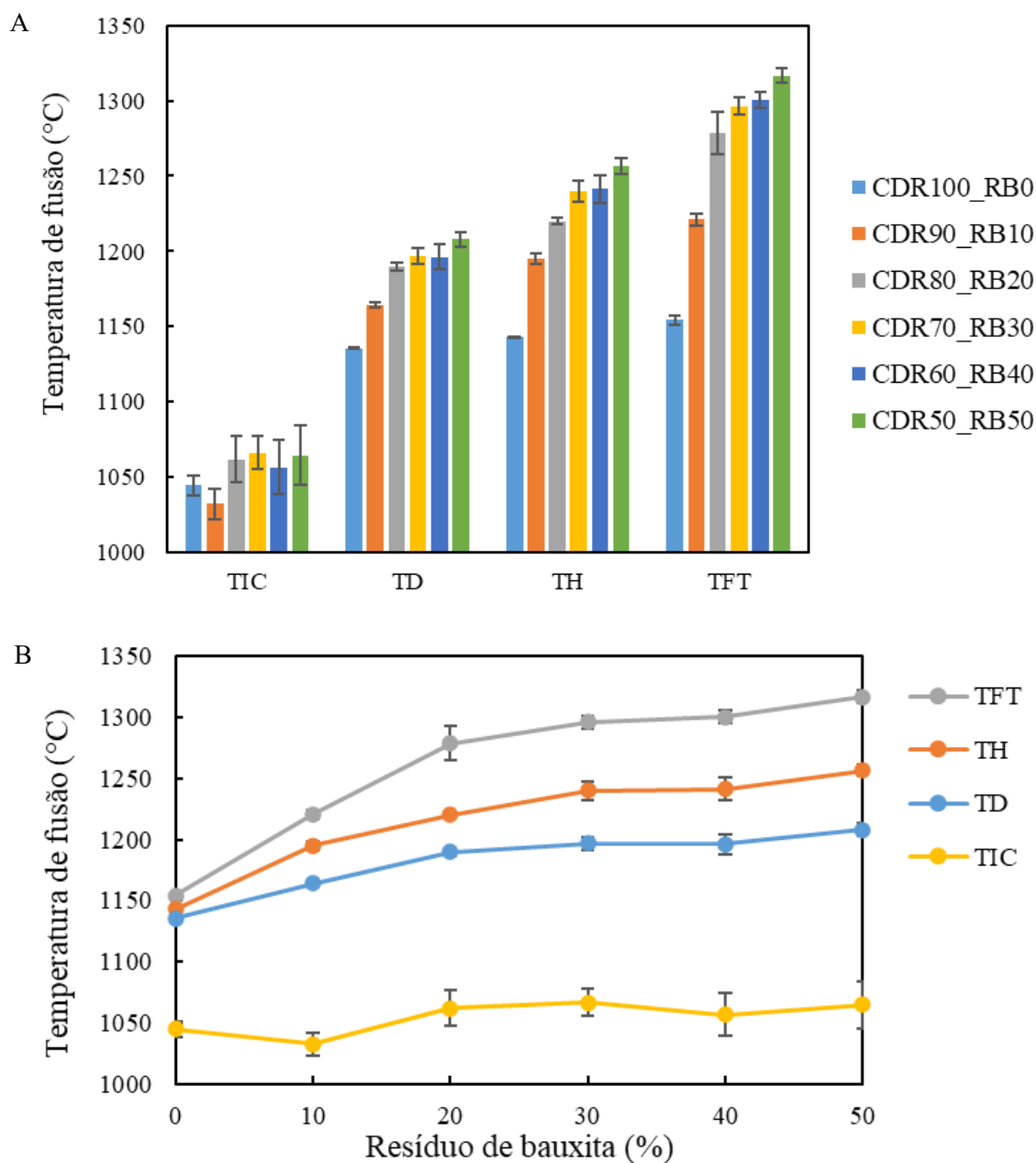
Na Figura 8B foi observado que o CDR também contribuiu com fases cristalinas, como silicatos de alumínio e sódio, óxidos de cálcio e alumínio, além de traços de titânio metálico, provavelmente provenientes de cargas minerais presentes em plásticos, borrachas ou outros resíduos inorgânicos. Algumas dessas fases, como o titânio metálico, apareceram com maior nitidez na amostra do CDR100_RB0 e perderam intensidade ou sumiram com a inserção do RB.

Os difratogramas apresentados sugerem que a mineralogia dos compósitos é resultado da simples sobreposição das fases presentes em cada material de origem. Não foi possível detectar evidências de formação de novas fases cristalinas resultantes da combinação entre CDR e RB e isso indica a preservação das estruturas minerais dos materiais de origem.

Essa estabilidade mineralógica pode ser considerada vantajosa para a produção de clínquer, pois favorece a previsibilidade reativa durante a calcinação e reduz o risco de formação de fases indesejadas. Os compósitos permanecem com componentes relevantes para a formação do clínquer, como óxidos de cálcio (CaO), silício (SiO₂), alumínio (Al₂O₃) e ferro (Fe₂O₃). A incorporação do RB aos compósitos resultou no enriquecimento das cinzas do CDR em relação a esses constituintes, contribuindo significativamente para a composição química desejada na produção de clínquer, reforçando seu potencial como matéria-prima alternativa.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos a partir do teste de fusibilidade das cinzas dos compósitos. Em (A) observa-se as temperaturas características de fusão: Temperatura Inicial de Contração (TIC), Temperatura de Deformação (TD), Temperatura Hemisférica (TH) e Temperatura de Fusão Total (TFT). Em (B) são apresentadas as tendências de variação das temperaturas de fusibilidade em função do aumento do teor de RB.

Figura 9. Resultados do teste de fusibilidade das cinzas dos compósitos. A) Temperaturas características de fusão. B) Tendência de variação das temperaturas de fusibilidade em função do aumento do teor de RB.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados foi possível constatar que o RB altera gradativamente as temperaturas de fusão (TIC, TD, TH e TFT). Esse comportamento indica que o RB contribui para tornar as cinzas mais refratárias, o que está associado à presença de óxidos termicamente estáveis no material, como Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 (Li *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2011).

Apesar do aumento nas temperaturas, todas as amostras apresentaram fusibilidade completa abaixo dos 1500 °C, faixa compatível com a temperatura típica de operação de fornos de clínquer (maiores que 1100 °C). Ainda, foi possível constatar que todos os tratamentos apresentam condições de serem inseridos no pré-calcinador, onde as temperaturas estão na faixa de 870 – 890 °C (Molin Filho, 2020). Assim, será permitida a degradação rápida e completa dos constituintes orgânicos do CDR, tendo em vista a baixa temperatura de ignição dos plásticos (330 – 450 °C). Após a queima, as cinzas inorgânicas remanescentes, enriquecidas com óxidos como CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, podem ser direcionadas ao forno principal e incorporadas à matriz das demais matérias-primas.

6.4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a formulação de compósitos a partir da mistura de CDR e RB é tecnicamente viável, tanto do ponto de vista energético quanto da composição mineral. A caracterização integrada indicou que, mesmo com a inclusão de um material inorgânico como o RB, os compósitos mantiveram propriedades compatíveis com aplicações térmicas e apresentaram composição elementar otimizada para sua utilização como matéria-prima do clínquer. Esses resultados reforçam o duplo potencial dos compósitos: como combustível alternativo e como insumo mineral.

Analizando os resultados de forma estratégica, tendo em vista os aspectos físicos, químicos e energéticos dos compósitos, conclui-se que o tratamento CDR80_RB20 é o mais promissor para aplicação como combustível sólido. Esse compósito apresentou boa integridade física e evidências de adesão efetiva do RB à matriz plástica, ao contrário dos tratamentos com maiores teores de RB, nos quais houve aumento de partículas finas mal incorporadas. Embora todos os compósitos apresentem potencial de aplicação, o desempenho observado no CDR80_RB20 indica que a proporção adotada tende a ser uma das mais adequadas.

Ficou evidenciada a importância de estratégias de valorização de resíduos que considerem abordagens híbridas e aproveitamento sinérgico de propriedades. A utilização de resíduos gerados em grandes quantidades, como o RSU e o RB, gera inúmeros benefícios ambientais, sociais e econômicos. Este trabalho está alinhado com as premissas da Agenda 2030, em busca do desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 22 maio 2022.
- ABU-ELYAZEED, O. S. M. *et al.* Co-combustion of RDF and biomass mixture with bituminous coal: a case study of clinker production plant in Egypt. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 257–266, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s42768-021-00081-0>.
- ALFÈ, M. *et al.* Pyrolysis and Gasification of a Real Refuse-Derived Fuel (RDF): The Potential Use of the Products under a Circular Economy Vision. **Molecules**, [s. l.], v. 27, n. 23, p. 8114, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/23/8114>.
- AMAO, A. O.; AL-OTAIBI, B.; AL-RAMADAN, K. High-resolution X-ray diffraction datasets: Carbonates. **Data in Brief**, [s. l.], v. 42, p. 108204, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352340922004085>.
- ÂRIÑA, D. *et al.* Characterization of Refuse Derived Fuel Production from Municipal Solid Waste: The Case Studies in Latvia and Lithuania. **Environmental and Climate Technologies**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 112–118, 2020. Disponível em: <https://www.sciendo.com/article/10.2478/rtuct-2020-0090>.
- AZAM, M. *et al.* Co-Combustion Studies of Low-Rank Coal and Refuse-Derived Fuel: Performance and Reaction Kinetics. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 13, p. 3796, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/3796>.
- BALOGH, H. A. *et al.* Catalytic co-liquefaction of sugarcane bagasse and polyethylene for bio-oil production under supercritical conditions: Effect of catalysts. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 153, p. 104944, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237020302710>.
- BANIVAHEB, S. *et al.* SolvX: Solvothermal conversion of mixed waste plastics in supercritical toluene in presence of Pd/C catalyst. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 108622, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343722014956>.
- BELLONI, E. da S. *et al.* Fatigue and impact load: Experimental investigation on mechanical behavior of high modulus polyethylene yarns. **Polymers and Polymer Composites**, [s. l.], v. 30, 2022. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09673911221103934>.
- BHATSADA, A. *et al.* Modification of the Aeration-Supplied Configuration in the Biodrying Process for Refuse-Derived Fuel (RDF) Production. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 3235, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/7/3235>.
- BHAVSAR, V.; TRIPATHI, D. Low and high frequency shielding effectiveness of PVC-PPy films. **Polymer Bulletin**, [s. l.], v. 75, n. 5, p. 2085–2104, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00289-017-2143-7>.
- BHUTADA, G. **All the Metals We Mined in 2021: Visualized**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.visualcapitalist.com/all-the-metals-we-mined-in-2021-visualized/>. Acesso em: 22

abr. 2024.

BIAŁOWIEC, A. *et al.* The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. **Waste Management**, [s. l.], v. 70, p. 91–100, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17306888>.

BIN, W. *et al.* Influence of Red Mud Proportion on Circular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2020, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2020/8578059/>.

BLUHM-DRENHAUS, T. *et al.* A model for the devolatilisation of large thermoplastic particles under co-firing conditions. **Fuel**, [s. l.], v. 101, p. 161–170, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236112003985>.

BRANDIĆ, I. *et al.* Biomass Higher Heating Value Estimation: A Comparative Analysis of Machine Learning Models. **Energies**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 2137, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/9/2137>.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. New York: J. Wiley, 192 p., 2016.

CHOTIKHUN, A. *et al.* Elemental Compositions of Wood Plastic Pellets Made from Sawdust and Refuse-Derived Fuel (RDF) Waste. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 13, n. 20, p. 11162, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/20/11162>.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; DE SANTA MARIA, L. C. Polyethylene: Main Types, Properties and Applications. **Polímeros**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003.

DA SILVA, S. B. *et al.* Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 147, p. 1870–1879, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148119314752>.

DANSK STANDARD- EFTERTRYK UDEN TILLADELSE FORBUDT. **DS/EN 15210-1:2010, Solid Biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets**. 2010.

DENTONI, V.; GROSSO, B.; PINNA, F. Experimental Evaluation of PM Emission from Red Mud Basins Exposed to Wind Erosion. **Minerals**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 405, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/4/405>.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14774-1: determination of moisture content: oven dry method: part 1, total moisture: reference method**. Berlin: CEN, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN 14918: Solid biofuels - Determination of calorific value**. Brussels: European Committee for Standardization, 2009.

EVANS, K. Successes and challenges in the management and use of bauxite residue. *In:* , 2015, Leuven. **Bauxite Residue Valorisation and Best Practices**. Leuven: Red Mud Project,

2015. p. 113–128.

EVANS, K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 316–331, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40831-016-0060-x>.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 529, 2019. Disponível em: <http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>. Acesso em: 24 mar. 2020.

FURTADO, J. B. de M. *et al.* Polyethylene/Fiber Composite - Characterization and Degradation. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 272–285, 2020. Disponível em: http://rvq.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=1164&nomeArquivo=v12n1a21.pdf.

GALEVSKY, G. V.; RUDNEVA, V. V.; ALEKSANDROV, V. S. Current state of the world and domestic aluminium production and consumption. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 411, p. 012017, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/411/1/012017>.

GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 60–79, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.004>.

GRAMMELIS, P. *et al.* Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of waste recovered fuels. **Fuel**, [s. l.], v. 88, n. 1, p. 195–205, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236108000471>.

GUNDIM, R. S. *et al.* Extrusion allows optimizing the eucalyptus bark and sugarcane straw for energy generation with the addition of RDF (Refuse-Derived Fuel). **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s. l.], v. 73, p. 104155, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138824005514>.

HAAS, J.; WEBER, R. Co-firing of refuse derived fuels with coals in cement kilns: combustion conditions for stable sintering. **Journal of the Energy Institute**, [s. l.], v. 83, n. 4, p. 225–234, 2010. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/014426010X12839334040898>.

HARRISSON, A. M. Constitution and Specification of Portland Cement. *In*: LEA'S CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRETE. [S. l.: s. n.], 2019. p. 87–155.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S. Treating lignocellulosic biomass with dilute solutions at ambient temperature: effects on cellulose crystallinity. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 14, n. 9, p. 9967–9981, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s13399-022-03085-w>.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE - AIA. **Sustainable Bauxite Residue Management Guidance**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://international-aluminium.org/resource/sustainable-bauxite-mining-guidelines-second-edition-2022-2/>. .

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17828: Solid**

biofuels - Determination of bulk density. [S. l.]: International Organization for Standardization, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18122: Solid biofuels — Determination of ash content.** [S. l.]: International Organization for Standardization, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18123: Solid biofuels — Determination of volatile matter.** [S. l.]: International Organization for Standardization, 2023.

JADHAV, P. S. *et al.* Study of the preparation and properties of polyvinyl chloride/nitrocellulose polymer blends. **Polymer International**, [s. l.], v. 71, n. 8, p. 1009–1021, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pi.6385>.

JAYASANKAR, K. *et al.* Production of pig iron from red mud waste fines using thermal plasma technology. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, [s. l.], v. 19, n. 8, p. 679–684, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12613-012-0613-3>.

KARA, M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 68, p. 21–28, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344912001097>.

KOLBEINSEN, L. The beginning and the end of the aluminium value chain. **Matériaux & Techniques**, [s. l.], v. 108, n. 5–6, p. 506, 2020. Disponível em: <https://www.mattech-journal.org/10.1051/mattech/2021008>.

LEE, Y. *et al.* Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 148, p. 196–201, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852413013862>.

LI, X. *et al.* Influence of FexOy and Al2O3 Contents on the Thermal Stability of Iron Ore-Waste Fibers: Key Mechanisms and Control. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 14, p. 3480, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/14/3480>.

LIU, J.; LI, X.; ZHOU, C. Mechanical and thermal properties of modified red mud-reinforced phenolic foams. **Polymer International**, [s. l.], v. 67, n. 5, p. 528–534, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pi.5540>.

LYU, F. *et al.* Dealkalization processes of bauxite residue: A comprehensive review. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 403, p. 123671, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389420316575>.

LYU, F. *et al.* Efficient removal of Pb(II) ions from aqueous solution by modified red mud. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 406, p. 124678, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389420326686>.

MACIEJCZYK, A. *et al.* The Influence of Protective Coatings on High-Temperature Corrosion under Biomass Ash Deposits. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 21, p. 7221, 2023.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7221>.

MOJAVER, M.; AZDAST, T.; HASANZADEH, R. Assessments of key features and Taguchi analysis on hydrogen rich syngas production via gasification of polyethylene, polypropylene, polycarbonate and polyethylene terephthalate wastes. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 46, n. 58, p. 29846–29857, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319921024198>.

MOLIN FILHO, R. A. D. **Viabilidade de queima de casca de eucalipto em fornos de cimento**. 2020. 80 f. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2020.

MORENO, R.; SENO, R. Votorantim Metais/CBA bauxite residue: challenges and solutions. In: , 2015, Dubai. **33rd International ICSOBA Conference**. Dubai: 33rd International ICSOBA Conference, 2015. p. 3.

MOURA, D. S. *et al.* Characterisation of microplastics is key for reliable data interpretation. **Chemosphere**, [s. l.], v. 331, p. 138691, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004565352300958X>.

MUCSI, G. *et al.* Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolymers. **Rudarsko-geološko-naftni zbornik**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 27–36, 2019. Disponível em: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=315598.

NOWAK, M. Features of Refuse Derived Fuel in Poland – Physicochemical Properties and Availability of Refuse Derived Fuel. **Journal of Ecological Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 1–9, 2023. Disponível em: <http://www.jeeng.net/Features-of-Refuse-Derived-Fuel-in-Poland-Physicochemical-Properties-and-Availability,157159,0,2.html>.

ORTEGA, J. *et al.* Effects of Red Mud Addition in the Microstructure, Durability and Mechanical Performance of Cement Mortars. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 984, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/984>.

ÖZBAY, İ.; ÖZBAY, B.; AKDEMİR, U. Biodrying for fuel recovery from sewage sludge: An integrated evaluation by ultimate and proximate analyses. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [s. l.], v. 41, n. 1, 2022. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ep.13723>.

PORSHNOV, D.; OZOLS, V.; KLAVINS, M. Thermogravimetric analysis as express tool for quality assessment of refuse derived fuels used for pyro-gasification. **Environmental Technology**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 29–35, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2019.1584648>.

RAHOTHARN, U.; KHEMKHAO, M.; KAEWPENGKROW, P. R. Solid waste management by RDF production from landfilled waste to renewable fuel of Nonthaburi. **International Journal of Renewable Energy Development**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 968–976, 2023. Disponível em: <https://ijred.cbiorid.org/index.php/ijred/article/view/52956>.

RIVALDI, J. D. *et al.* Thermochemical characterization and assessment of residual biomass energy in Paraguay. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 14, n. 9, p. 10115–10130, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s13399-022-03155-z>.

SARC, R.; LORBER, K. E. Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). **Waste Management**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 1825–1834, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X13002134>.

SENO JÚNIOR, R. *et al.* Synergistic pyrolysis with Refuse-Derived Fuel (RDF) can neutralize bauxite residue. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 189, p. 1103–1111, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582024008188>.

TANG, J. *et al.* Bagasse modification of red mud for efficient photocatalytic degradation of real dye wastewater: An utilization attempt for massive waste. **Environmental Research**, [s. l.], v. 267, p. 120608, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001393512402512X>.

VOUNATSOS, P. *et al.* Refuse-derived fuel classification in a mechanical–biological treatment plant and its valorization with techno-economic criteria. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1137–1146, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13762-014-0509-z>.

WANG, L. *et al.* A Review on Comprehensive Utilization of Red Mud and Prospect Analysis. **Minerals**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 362, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/6/362>.

WANG, Y. *et al.* Mechanism of magnetizing the Bayer red mud and meanwhile improving the cementitious activity of its tailings by using biomass. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 287, p. 125016, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620350605>.

WANG, S. *et al.* Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. **Water Research**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 129–138, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135404004592>.

WANG, X. *et al.* The Effect of Red Mud on Sintering Processes and Minerals of Portland Cement for Roads. **Crystals**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1267, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/10/1267>.

WANG, Y. *et al.* Transformation and Characterization of Cement Clinker Prepared from New Structured Red Mud by Sintering. **JOM**, [s. l.], v. 71, n. 8, p. 2505–2512, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11837-019-03475-y>.

WANG, X. *et al.* Utilization of red mud as raw material in the production of field road cement. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 877–882, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11595-016-1462-0>.

WANG, P.; LIU, D. Y. Physical and Chemical Properties of Sintering Red Mud and Bayer Red Mud and the Implications for Beneficial Utilization. **Materials**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 1800–1810, 2012.

ZHANG, N. *et al.* Early-age characteristics of red mud–coal gangue cementitious material.

Journal of Hazardous Materials, [s. l.], v. 167, n. 1–3, p. 927–932, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409001150>.

ZHANG, N. *et al.* Electron probe microanalysis for revealing occurrence mode of scandium in Bayer red mud. **Rare Metals**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 295–303, 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12598-017-0893-x>.

ZHANG, X. *et al.* Rapid conversion of red mud into soil matrix by co-hydrothermal carbonization with biomass wastes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 106039, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343721010162>.

ZHOU, K. *et al.* Enhanced selective leaching of scandium from red mud. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 182, p. 57–63, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X18302032>.

ZHU, Z. *et al.* Thermodynamics of Reactions Among Al₂O₃, CaO, SiO₂ and Fe₂O₃ During Roasting Processes. In: THERMODYNAMICS - INTERACTION STUDIES - SOLIDS, LIQUIDS AND GASES. [S. l.]: InTech, 2011. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/thermodynamics-interaction-studies-solids-liquids-and-gases/thermodynamics-of-reactions-among-al2o3-caO-sio2-and-fe2o3-during-roasting-processes>.

7. CONCLUSÕES GERAIS

Os trabalhos realizados abrangeram uma ampla investigação sobre o resíduo de bauxita e o CDR, desde revisões sistematizadas de literatura até a caracterização e produção de compósitos. Os resultados obtidos a partir das revisões de literatura forneceram uma base sólida sobre o estado atual do conhecimento em um cenário mundial e brasileiro. Foi possível constatar as principais diferenças entre as pesquisas nacionais e internacionais, assim como as lacunas relacionadas aos temas.

A caracterização do CDR trouxe informações importantes sobre suas propriedades. Não obstante, propiciou uma discussão a respeito dos aspectos desafiadores quanto à sua utilização como suas características intrínsecas, ausência de um arcabouço legal brasileiro e exigências industriais.

Por fim, a produção de compósitos a partir desses materiais demonstrou o potencial de inovação e sustentabilidade do trabalho. A indústria cimenteira, que já utiliza o CDR *in natura* nos fornos de clínquer e é receosa quanto à inserção do resíduo de bauxita no processo, pode se beneficiar com um combustível mais homogêneo, mais denso energeticamente e mais rico em constituintes químicos desejáveis para o clínquer.

Juntos, esses quatro estudos contribuem para um melhor entendimento sobre os materiais e dão abertura para novas possibilidades de aproveitamento de resíduos e para o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 22 maio 2022.
- AZAM, M. *et al.* Co-Combustion Studies of Low-Rank Coal and Refuse-Derived Fuel: Performance and Reaction Kinetics. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 13, p. 3796, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/3796>.
- BHUTADA, G. **All the Metals We Mined in 2021: Visualized**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.visualcapitalist.com/all-the-metals-we-mined-in-2021-visualized/>. Acesso em: 22 abr. 2024.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. New York: J. Wiley, 192 p., 2016.
- EVANS, K. Successes and challenges in the management and use of bauxite residue. *In:* , 2015, Leuven. **Bauxite Residue Valorisation and Best Practices**. Leuven: Red Mud Project, 2015. p. 113–128.
- EVANS, K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 316–331, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40831-016-0060-x>.
- GALEVSKY, G. V; RUDNEVA, V. V; ALEKSANDROV, V. S. Current state of the world and domestic aluminium production and consumption. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 411, p. 012017, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/411/1/012017>.
- GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 60–79, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.004>.
- HAAS, J.; WEBER, R. Co-firing of refuse derived fuels with coals in cement kilns: combustion conditions for stable sintering. **Journal of the Energy Institute**, [s. l.], v. 83, n. 4, p. 225–234, 2010. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/014426010X12839334040898>.
- KARA, M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 68, p. 21–28, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344912001097>.
- KOLBEINSEN, L. The beginning and the end of the aluminium value chain. **Matériaux & Techniques**, [s. l.], v. 108, n. 5–6, p. 506, 2020. Disponível em: <https://www.mattech-journal.org/10.1051/mattech/2021008>.
- NOWAK, M. Features of Refuse Derived Fuel in Poland – Physicochemical Properties and Availability of Refuse Derived Fuel. **Journal of Ecological Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 1–9, 2023. Disponível em: <http://www.jeeng.net/Features-of-Refuse-Derived-Fuel-in-Poland->

Physicochemical-Properties-and-Availability,157159,0,2.html.

ORTEGA, J. *et al.* Effects of Red Mud Addition in the Microstructure, Durability and Mechanical Performance of Cement Mortars. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 984, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/984>.

PORSHNOV, D.; OZOLS, V.; KLAVINS, M. Thermogravimetric analysis as express tool for quality assessment of refuse derived fuels used for pyro-gasification. **Environmental Technology**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 29–35, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2019.1584648>.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 33–45, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X11000454>.

SARC, R.; LORBER, K. E. Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). **Waste Management**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 1825–1834, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X13002134>.

WANG, L. *et al.* A Review on Comprehensive Utilization of Red Mud and Prospect Analysis. **Minerals**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 362, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/6/362>.

WANG, X. *et al.* The Effect of Red Mud on Sintering Processes and Minerals of Portland Cement for Roads. **Crystals**, [s. l.], v. 11, n. 10, p. 1267, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/10/1267>.

WANG, Y. *et al.* Transformation and Characterization of Cement Clinker Prepared from New Structured Red Mud by Sintering. **JOM**, [s. l.], v. 71, n. 8, p. 2505–2512, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11837-019-03475-y>.

ZHANG, N. *et al.* Early-age characteristics of red mud–coal gangue cementitious material. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 167, n. 1–3, p. 927–932, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409001150>.