ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE PARA A INDÚSTRIA DO CIMENTO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE COPROCESSAMENTO NO RIO GRANDE DO SUL

CIRCULARITY STRATEGIES IN THE CEMENT INDUSTRY: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR CO-PROCESSING IN RIO GRANDE DO SUL

Ruane Fernandes de Magalhães [1]; Daniela Govoni Sotelo [2]; Matheus Henrique Gomes de Medeiros[3]; João Pedro Martins Bueno [4]; Ana Paula Kirchheim [5]

[1]Doutora em Engenharia | ruane.magalhaes@ufrgs.br | UFRGS | Porto Alegre, Brasil; [2]Doutora em Engenharia e Tecnologia de Materiais | danigovoni@gmail.com | UFRGS | Porto Alegre, Brasil; [3]Mestre em Engenharia | matheus96h@gmail.com | UFRGS | Porto Alegre, Brasil, [4]Graduando em Ciências Econômicas | jpedrobueno2004@gmail.com | UFRGS | Porto Alegre, Brasil, [5]Doutora em Engenharia | anapaula.k@gmail.com | UFRGS | Porto Alegre, Brasil

Resumo:
A construção civil se apresenta como uma das maiores geradoras de impactos ao meio ambiente, havendo importantes desafios para o alcance de maiores níveis de sustentabilidade em seus processos. Dentre os processos mais poluentes da indústria da construção civil, destaca-se a produção de cimento, devido às características de seus processos tradicionais. Assim, faz-se necessária a compreensão de como os impactos da indústria cimenteira podem ser minimizados, a partir da adoção de diferentes estratégias, como as de circularidade, compreendendo características regionais de produção. Este estudo tem como objetivo explorar as perspectivas em disponibilidade de resíduos no Rio Grande do Sul, considerando suas tendências de geração, os quais possam ser aplicados em substituição parcial ao clínquer e como combustíveis alternativos, pela indústria do cimento. Para tanto, foram analisados de forma comparativa e crítica dados de geração de resíduos por indústrias gaúchas, entre 2018 e 2023. A análise realizada denotou que existem resíduos com características físico-químicas e com padrões de disponibilidade alinhadas às necessidades da produção do cimento, tais como a lama de cal e os resíduos têxteis. Esses resíduos apresentam potencial para coprocessamento, alinhados às estratégias de sustentabilidade de outras indústrias, compreendendo oportunidades de circularidade para a produção do cimento.

Palavras-chave:
Economia Circular; Coprocessamento; Aproveitamento de Resíduos; Indústria Cimenteira.

Abstract:
The construction industry is one of the highest generators of environmental impacts, and it faces significant challenges in achieving higher levels of sustainability in its processes. Among the most polluting processes in the construction industry, cement production stands out, due to the characteristics. Therefore, it is necessary to understand how the impacts of the cement industry can be minimized by strategies, such as circularity and understanding regional production characteristics. This study aims to explore the perspectives on waste availability in Rio Grande do Sul, considering its generation trends, which can be utilized as a partial replacement for clinker and as an alternative fuel by the cement industry. To this end, data on waste generation by industries in Rio Grande do Sul between 2018 and 2023 were analyzed comparatively and critically. The analysis carried out revealed that there are wastes with characteristics and availability patterns that align with the needs of cement production, such as lime sludge and textile waste. These residues have potential for co-processing, aligning with the sustainability strategies of other industries, and offering opportunities for circularity in cement production.

Keywords:
Circular Economy; Co-processing; Waste Utilization; Cement Industry.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil possui importantes desafios, relacionados à sustentabilidade ambiental, econômica e social de seus processos (Cortés *et al*., 2023). Se por um lado essa indústria é parte fundamental do desenvolvimento econômico da sociedade, por outro, é também uma das maiores geradoras de impactos sobre o meio ambiente; sendo, atualmente, responsável por 32% das emissões mundiais de CO_2 (UN, 2024). Seus principais impactos estão associados a diferentes características de seus processos produtivos, tais como: (i) uso extensivo de fontes de energia não renováveis (Zafar *et al*., 2019); (ii) extensa área de implantação de seus empreendimentos (Wang *et al*., 2024); (iii) alta demanda por matérias primas para produção de materiais e de sistemas construtivos (Cheng *et al*., 2021); e (iv) alto volume de geração de resíduos (Yang *et al*., 2017).

Dentre os potenciais impactos ambientais, a produção do cimento se destaca como um dos mais relevantes, a qual possui consequências em toda a cadeia produtiva da construção civil (Salas *et al*., 2016). Os impactos associados ao cimento se relacionam tanto a fatores específicos de seu modo de produção (Schneider *et al*., 2011) quanto à sua ampla demanda para o desenvolvimento de infraestrutura e de habitação (Wang *et al.*, 2013). O Cimento Portland emprega um alto volume de recursos naturais, como o calcário, o qual é decomposto em fornos de altas temperaturas, para produção de seu principal constituinte, o clínquer (Scrivener *et al.*, 2018). Adicionalmente, para esse processo de queima, de forma tradicional, a indústria do cimento utiliza, principalmente, combustíveis fósseis, como o coque de petróleo, o qual possui alto poder calorífico, necessário à produção do clínquer (Kumar, Nandi, 2023). Assim, a produção do clínquer está associada a intensas emissões de CO_2 ao ar, caracterizando a produção tradicional de Cimento Portland como potencialmente poluente (Malacarne *et al*., 2021). Assim, há urgência na implantação de estratégias para o alcance de maiores níveis de sustentabilidade nesses processos, as quais se apresentem como efetivas na transição para economias de baixo carbono (Salaripoor *et al.*, 2025).

Nesse contexto, uma estratégia fundamental a ser fomentada na construção civil é a promoção da Economia Circular, com o objetivo de fechamento de ciclos de recursos (Finamore, Oltean-Dumbrava, 2024), com vias a uma mudança definitiva do modelo de economia linear. O fechamento desses ciclos na construção civil pode se dar de forma integrada a outras indústrias poluentes, tais como: a indústria química (Monteiro *et al*., 2024), a indústria de papel e celulose (Sakthivelmurugan *et al*., 2022), a indústria madeireira (Ancapi *et al*., 2025), a indústria têxtil (De Felice *et al*., 2025); bem como com outros setores da indústria da construção civil (Dziedzic *et al*., 2025). As estratégias para Economia Circular na indústria cimenteira são especialmente relevantes para o alcance de maiores níveis de sustentabilidade, ao se considerar as possibilidades de incorporação, na produção do Cimento Portland, de resíduos das diferentes indústrias, tanto como substituição parcial do clínquer (Silveira *et al*., 2025), quanto para emprego enquanto combustíveis alternativos (Neto *et al*., 2025). Essas possibilidades de incorporação de resíduos são caracterizadas como coprocessamento (Kosajan *et al*., 2025), o qual vem sendo, progressivamente, mais utilizado na produção de cimento de todo o mundo, como forma de mitigação de seus potenciais impactos ambientais.

Apesar das possibilidades de utilização de diferentes resíduos e subprodutos no coprocessamento, a gestão da cadeia para essa integração pode se apresentar como altamente complexa. Isso porque demanda o comprometimento de diferentes stakeholders, cujas atividades possuem alto nível de heterogeneidade. Por esse motivo, torna-se essencial a compreensão ampla dos processos de fim de vida desses resíduos, sua disponibilidade em mercados marginais ao do cimento, bem como a viabilidade técnica de sua utilização em coprocessamento. Nesse contexto, o potencial de uso de resíduos e de subprodutos para coprocessamento no estado do Rio Grande do Sul pode ser mais bem explorado. Isso porque, no cenário brasileiro, a região sul representa 16% da produção de cimento do País, sendo o Rio Grande do Sul o 11º maior produtor de cimento nacional (SNIC, 2023). Além disso, o estado conta com a presença de diversas indústrias com potencial de integração com a indústria cimenteira, considerando-se inclusive, empresas licenciadas, com capacidade técnica bem estabelecida, para a composição de blends de coprocessamento. Assim, dadas tais perspectivas de fortalecimento da economia circular, a partir do fomento ao coprocessamento no

estado, este estudo tem como objetivo explorar as perspectivas em disponibilidade de resíduos no Rio Grande do Sul, considerando suas tendências de geração, os quais possam ser aplicados em substituição parcial ao clínquer e como combustíveis alternativos, pela indústria do cimento.

2. MÉTODOS

O método de pesquisa é baseado na análise do banco de dados de geração de resíduos industriais no Rio Grande do Sul, a partir dos cadastros de indústrias licenciadas junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Para tanto, o método foi dividido em quatro etapas principais.

Na primeira etapa, foi realizado o levantamento de dados a partir da base IBAMA, selecionando indústrias geradoras de resíduos do Rio Grande do Sul, entre os anos de 2018 e 2023. A partir de então, na segunda etapa do trabalho, os dados de geração de resíduos industriais foram estruturados e agrupados de acordo com as seguintes categorias: (i) tipo de resíduo gerado, conforme código IBAMA; (ii) tipo de indústria geradora; (iii) localidade da geração de resíduos; (iv) ano de geração; e (v) tipo de componente de blend para coprocessamento.

Após a estruturação dos dados de geração de resíduos, na terceira etapa, foi realizada a identificação de tendências de geração de resíduos, com potencial de coprocessamento, considerando suas características de geração no período. A identificação de tendências considerou as flutuações de geração de resíduos no banco de dados analisado, as prováveis causas dessas flutuações, bem como as perspectivas de estabilidade ou de alterações nos padrões de geração. Para tanto, foram consideradas políticas públicas vigentes no País, as quais podem influenciar, de forma relevante, a geração futura de resíduos ou subprodutos de interesse da cadeia produtiva do cimento. Na quarta etapa do trabalho, as tendências na geração de resíduos foram analisadas, de forma crítica, à luz de possíveis consequências e oportunidades para a indústria cimenteira. As oportunidades se caracterizaram como perspectivas de aumento dos níveis de circularidade da indústria, contribuindo para a sustentabilidade do setor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados obtidos, bem como as discussões relacionadas são apresentadas a seguir, conforme etapas do método de pesquisa.

3.1. LEVANTAMENTO DE DADOS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS IBAMA

O levantamento de dados de geração de resíduos, a partir de autodeclarações de indústrias licenciadas no Rio Grande do Sul, resultou em uma base de dados com as seguintes características:

a) 123.107 dados brutos de resíduos gerados entre 2018 e 2023 pela indústria do Rio Grande do Sul.
b) 8.054 indústrias;
c) 470 municípios do Rio Grande do Sul;
d) 21 tipos de atividades industriais;
e) 287 tipos de resíduos industriais gerados, conforme classificação IBAMA.

Os resíduos identificados nessa etapa são, prioritariamente, do tipo não perigosos, os quais apresentam alto potencial de aproveitamento em coprocessamento. Tal aproveitamento, pode se dar tanto na substituição de matéria prima no cimento, em substituição ao clínquer, quanto como combustíveis alternativos. Para a análise do potencial de sua utilização como coprocessamento, os dados foram estruturados, de acordo com suas características de aproveitamento.

3.2. ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Os dados brutos obtidos na primeira etapa do trabalho foram agrupados, de acordo com as possibilidades de coprocessamento, sendo:

a) MP: resíduos que podem ser empregados como matéria-prima;
b) B: resíduos que podem ser empregados na forma de Blend como combustíveis;
c) RCD: Resíduos de Construção e Demolição, os quais são de interesse de investigação da indústria cimenteira para inclusão na produção do cimento;
d) TX: Resíduos Têxteis, os quais são de interesse de investigação da indústria cimenteira como combustíveis alternativos.

Posteriormente, dentro de cada categoria, os resíduos foram classificados de acordo com a sua origem e quantitativo médio gerado no Rio Grande do Sul, entre 2018 e 2023. A estruturação desses dados é apresentada na Tabela 1.

Tipo de uso em coprocessamento	Código	Tipo de Resíduo	Quantitativo médio anual gerado	Unidade
Matéria-Prima	MP1	Cinza Volante	1.744.620.343,59	kg
	MP2	Resíduos de Gesso	716.676,62	kg
	MP3	Lama de Cal	131.447.585,64	kg
	RCD	Resíduos de Construção e Demolição	247.805,57	kg
Combustível	B1	Catalisadores Usados	327.914.174,05	kg
	B10	Papel e Papelão		
	B2	Substâncias Oleosas	53.174.255,49	kg
	B3	Resíduos Industriais	68.293.578,61	kg
	B11	Resíduos da Indústria Química		
	B4	Resinas, colas, látex	178.270.971,95	kg
	B7	Solventes		
	B5	Pneus e borrachas	11.105.226,04	kg
	B6	Madeiras	2.461.493.299,32	kg
	B8	Lodo de ETE e de ETA	7.831.341.546,40	kg
	B9	Terra contaminada		
	B14	Areia de Fundição		
	B12	Resíduos de Agricultura	3.424.086,21	kg
	B13	Resíduos da Indústria de Alimentos		
	TX	Resíduos Têxteis	19.864.494,28	kg

Tabela 1: Classificação e quantitativo médio anual de resíduos para coprocessamento.
Fonte: IBAMA (2024).

Conforme detalhado na Tabela 1, alguns resíduos com potencial de coprocessamento na forma de blends (ABCP, 2024), em combustíveis alternativos, tiveram seus quantitativos agrupados: Catalisadores usados, Papel e Papelão (B1 e B10); Resíduos Industriais e Resíduos da Indústria Química (B3 e B11); Resinas, colas, látex e Solventes (B4 e B7); Lodo de ETE e de ETA, Terra contaminada e Areia de Fundição (B8, B9 e B14); e Resíduos de Agricultura e Resíduos da Indústria de Alimentos (B12 e B13). Esse agrupamento foi realizado, uma vez que os resíduos possuem características similares na composição de blend para coprocessamento. Ademais, sua origem de geração possui congruências, em relação às principais atividades industriais geradoras.

Cabe ressaltar que o fato de os resíduos serem declarados e registrados em quilogramas pode gerar distorções quanto ao entendimento de sua disponibilidade ao mercado, considerando as características de densidade dos materiais. Por esse motivo, ao se considerar a disponibilidade de resíduos para a indústria cimenteira, faz-se necessário compreender outras características, como nível de estabilidade de geração e poder calorífico individual dos resíduos.

De forma complementar à análise do poder calorífico individual, a composição de blends para coprocessamento pode, justamente, possibilitar o fornecimento de combustíveis alternativos equilibrados ao coprocessamento (Venancio, 2022). Isso porque a presença de resíduos com menor poder calorífico em blends pode apoiar a neutralização de resíduos perigosos contaminados, com alto poder calorífico, mas que apresentam também alto nível de periculosidade ao serem empregados em fornos de cimento. Por esse motivo, a presença de resíduos com diferentes características, como blends em combustíveis alternativos, não apenas possibilita seu adequado uso no processo produtivo do cimento, como também evita potenciais impactos ambientais de sua destinação final, principalmente, em relação a resíduos perigosos, tais como os resíduos de origem industrial. Assim sendo, buscou-se compreender as tendências de geração dos resíduos identificados na Tabela 1 pela indústria do Rio Grande do Sul, a fim de identificar perspectivas futuras para sua utilização pela indústria do cimento.

3.3. IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

A partir da estruturação dos dados brutos de resíduos gerados, foram identificados os resíduos com maior potencial de utilização pela indústria cimenteira, devido às tecnologias disponíveis de coprocessamento, bem como de disponibilidade no mercado para inserção na indústria, quais sejam: (i) Cinza Volante (MP1); (ii) Resíduos de Gesso (MP2); (iii) Lama de Cal (MP3); (iv) Madeiras (B6); e (v) Resíduos Têxteis (TX). A cinza volante é um coproduto da combustão do carvão, largamente empregada como matéria-prima alternativa na produção do cimento, como adição ao clínquer (Camargo-Bertel *et al*., 2025). Os resíduos de gesso, principalmente originados em *drywall*, são empregados na produção do cimento, também na forma de matérias primas alternativas, como substituição às fontes naturais de gesso natural (Sina *et al*., 2024). A lama de cal é um subproduto da indústria de papel e celulose, rica em carbonato de cálcio, a qual é empregada na produção do cimento como matéria prima alternativa, em substituição parcial ao calcário (Dong *et al*., 2022). Os resíduos de madeira são utilizados na indústria cimenteira como combustíveis alternativos em coprocessamento (Pitre *et al*., 2024), em substituição coque de petróleo. Por fim, os resíduos têxteis, mais recentemente estudados e empregados pela indústria cimenteira, também são empregados como combustíveis alternativos; no entanto, são utilizados na forma de blends, como compostos heterogêneos (Salaripoor *et al*., 2025).

Com a seleção dos resíduos de interesse, foi investigado o comportamento de sua geração no período entre 2018 e 2023, de modo a serem analisadas as causas de gerações anômalas ou de novas tendências, a partir da demanda de mercado. As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as tendências médias de geração dos resíduos que podem ser coprocessados como matéria-prima (MP1, MP2 e MP3).

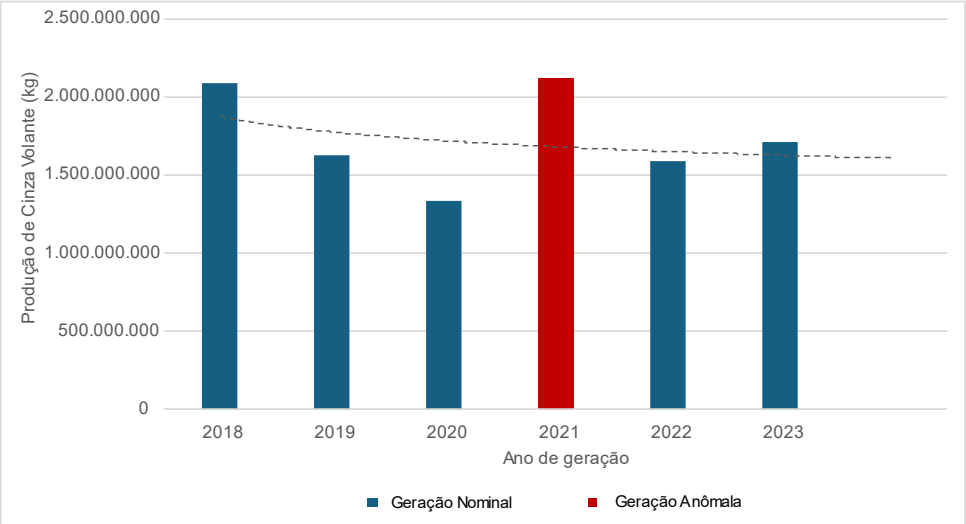


Figura 1: Tendências de geração de Cinza Volante (MP1) no Rio Grande do Sul.
Fonte: Os autores (2025).

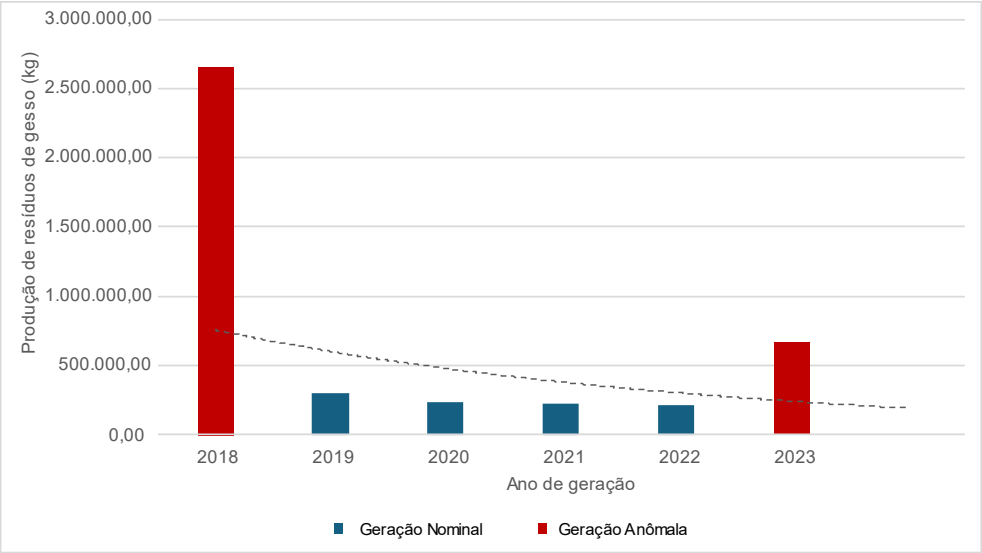


Figura 2: Tendências de geração de Resíduos de Gesso (MP2) no Rio Grande do Sul.
Fonte: Os autores (2025).

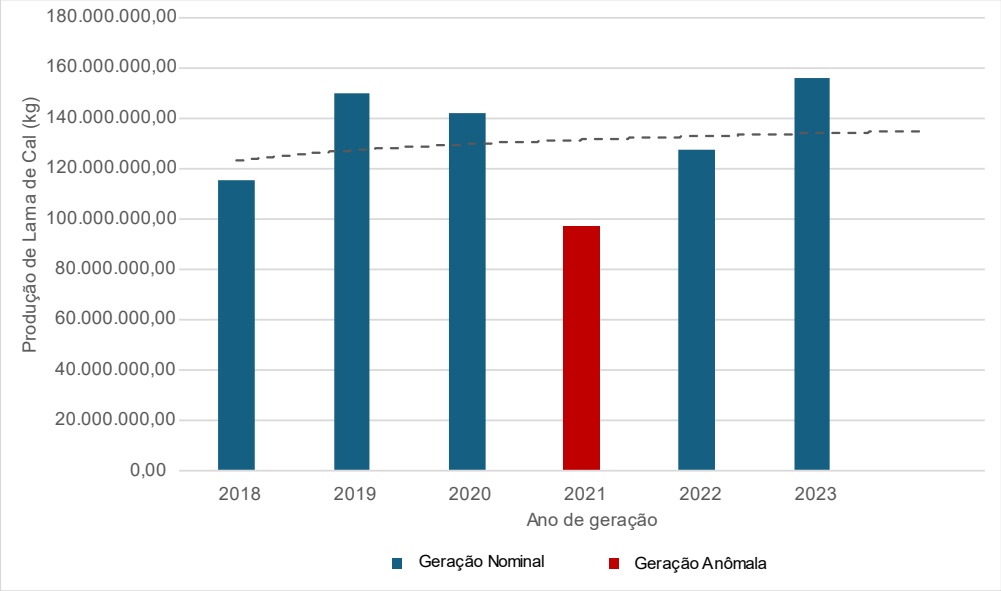


Figura 3: Tendências de geração de Lama de Cal (MP3) no Rio Grande do Sul.
Fonte: Os autores (2025).

Quanto à geração de Cinza Volante no Rio Grande do Sul, conforme Figura 1, verifica-se que há um registro de geração anômala, quanto à média nominal de geração, no ano de 2021. A origem da geração das cinzas volantes no estado é, predominantemente, relacionada à atividade de queima de carvão mineral por Usinas Termelétricas. Por conseguinte, em 2021, houve o registro do pior período de seca dos últimos 91 anos no Brasil (Ministério de Minas e Energia, 2021), o qual refletiu diretamente no acionamento emergencial de termelétricas a carvão, a fim de garantir o adequado fornecimento de energia elétrica no país. A partir de 2022, a tendência dos dados demonstra estabilidade de geração.

A Figura 2, a qual apresenta a tendência de geração de Resíduos de Gesso no Rio Grande do Sul, destaca geração anômala nos anos de 2018 e 2023. As gerações anômalas, nesse caso, se deveram a causas distintas, revelando a susceptibilidade da geração desse resíduo a tendências de mercado no estado, devida, principalmente, à heterogeneidade das indústrias geradoras. A variação observada nos períodos de 2019 a 2022, em relação a 2018, se relaciona ao fechamento de uma indústria de louças sanitárias; ao passo que a variação positiva em 2023 está associada a

um aumento de registros desses resíduos em passivos de aterros industriais, possivelmente, oriundos de obras de infraestrutura em diferentes regiões do estado.

Assim como a Cinza Volante, a origem de geração da Lama de Cal (Figura 3) é bem definida, relacionada, principalmente, à indústria de papel e celulose. A indústria geradora, presente no Rio Grande do Sul, opera, principalmente, com atividades de exportação. Por esse motivo, em 2021, houve um decréscimo de produção da indústria, relacionada às mudanças de mercado, devidas à Pandemia de COVID-19. No entanto, a partir de 2022, verifica-se nova tendência de crescimento da geração desse resíduo no estado, com estabilidade, em relação a períodos anteriores a 2021.

Posteriormente à análise de Matérias-Primas alternativas, foi realizada a identificação de tendências de resíduos empregados como combustíveis alternativos de coprocessamento. As Figuras 4 e 5 apresentam o comportamento de geração de Resíduos de Madeira e de Resíduos Têxteis, respectivamente.

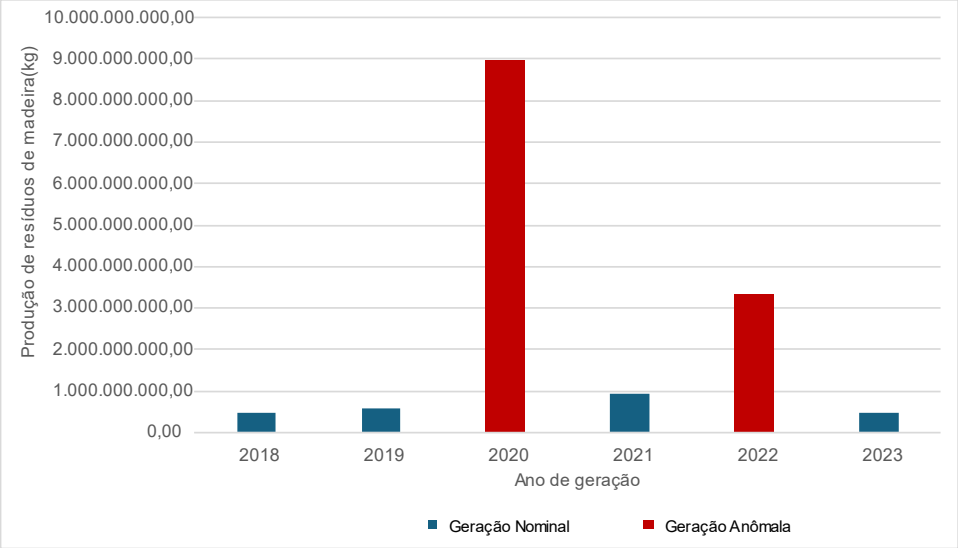


Figura 4: Tendências de geração de Resíduos de Madeira no Rio Grande do Sul.
Fonte: Os autores (2025).

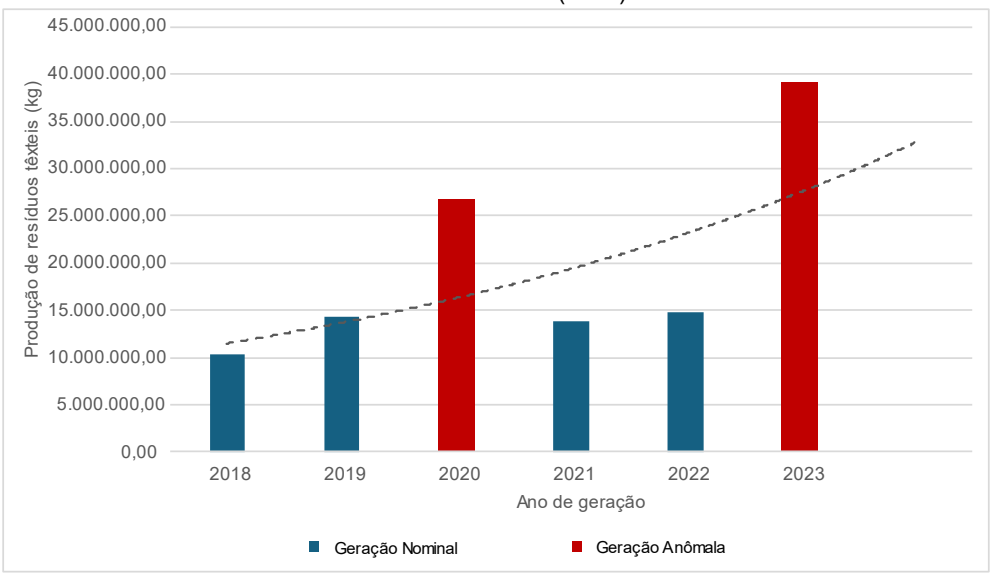


Figura 5: Tendências de geração de Resíduos Têxteis no Rio Grande do Sul.
Fonte: Os autores (2025).

Conforme apresentado na Figura 4, a geração de resíduos de Madeira no Rio Grande do Sul, no período de 2018 a 2023 se mostrou como altamente instável, o que acarretou a impossibilidade de projeção de tendências para o próximo período. Essa instabilidade pôde ser observada tanto na alteração dos padrões de geração de resíduos pela indústria de madeira existente, quanto devido

à instalação de novas indústrias no estado, no período analisado. Como consequência de alterações expressivas na produção do resíduo, há o aumento do nível de complexidade em sua adoção como combustível em coprocessamento, dado que a indústria cimenteira demanda certo grau de estabilidade no fornecimento de seus insumos principais.

Por fim, as análises da Figura 5 denotam uma tendência de crescimento relevante na geração de resíduos têxteis no Rio Grande do Sul. O potencial de uso desse resíduo para coprocessamento tem sido explorado mais recentemente pela indústria cimenteira, devido às oportunidades de acesso e de neutralização de resíduos perigosos em blends. Os períodos de geração anômala observados na amostra, em 2020 e em 2023, são devidos à instalação de novas indústrias calçadistas no estado, cuja produção foi, posteriormente, equilibrada pelo mercado, demonstrado pelo retorno à média nominal de geração. Apesar disso, a tendência observada é de aumento da geração de resíduos têxteis, no Rio Grande do Sul.

3.4. ANÁLISE CRÍTICA DE CONSEQUÊNCIAS E OPORTUNIDADES PARA A CIRCULARIDADE NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Os resíduos industriais analisados neste trabalho possuem diferentes características de disponibilidade e de tendências de geração, o que demanda compreensão específica de seus processos produtivos relacionados. Dentre os principais resíduos analisados, a cinza volante se destaca, atualmente, como insumo fundamental na produção do cimento no Rio Grande do Sul. Apesar disso, há um contraponto na tendência de geração desse resíduo. Isso porque a principal produção da cinza volante está associada à operação de usinas termelétricas, cuja infraestrutura tem sido desincentivada pelas políticas nacionais energéticas. A produção de energia a partir da queima de carvão possui alto potencial poluente; por conseguinte, a partir de políticas de descarbonização da matriz energética brasileira (EPE, 2024), há uma gradativa redução na disponibilidade de cinza volante para a indústria cimenteira, a qual, inclusive, trabalha com a possibilidade de escassez desse insumo para o processo produtivo principal. Essa escassez resulta na premência de estudos em resíduos para sua substituição, de forma a evitar a ampliação da extração de recursos naturais para produção do cimento.

Em relação aos resíduos de gesso, esse estudo verificou alta instabilidade em sua geração no Rio Grande do Sul. Isso se deve ao fato de que os resíduos de gesso dependem diretamente do desenvolvimento da infraestrutura e da construção civil no estado. Por outro lado, os resíduos de gesso são, tradicionalmente, empregados em larga escala na indústria de fertilizantes. Por conseguinte, há a necessidade do desenvolvimento de avaliações ambientais robustas, as quais sejam capazes de comparar os benefícios ambientais do uso de resíduos de gesso em ambas as indústrias. Além disso, cabe ressaltar que há uma lacuna de rastreamento na real produção desse resíduo no Rio Grande do Sul, principalmente, a se considerarem pequenos e médios empreendedores, os quais não possuem licenciamento estadual ou federal. Nesse caso, pode haver relevante disposição inadequada dos resíduos de gesso, a qual deve ser considerada em políticas públicas de incentivo ao seu aproveitamento na indústria.

Por sua vez, em análise crítica comparativa, verifica-se que a lama de cal e os resíduos de madeira apresentam comportamento opostos. Apesar de a indústria de papel e celulose apresentar a busca por processos otimizados menos impactantes, com a redução da geração de resíduos, verifica-se que, para a lama de cal, há tendência de estabilidade, de forma que se trata de um resíduo com disponibilidade estável à indústria cimenteira. Por outro lado, o resíduo de madeira se apresenta como de disponibilidade altamente instável, não sendo possível o cálculo de tendência, a partir do histórico do período analisado. Isso se deve a características cruzadas entre o cultivo da madeira e seu beneficiamento, as quais são orientadas por relações de mercado.

Por fim, a partir dos dados analisados, verifica-se uma tendência relevante na produção de resíduos têxteis, especialmente, ao se considerar a possibilidade de geração de resíduos contaminados em eventos climáticos extremos. Esses resíduos podem ter importante atuação como neutralizadores de resíduos industriais perigosos, com alto poder calorífico, possibilitando sua inclusão em blends de coprocessamento. Além disso, mostra-se como um resíduo de origem diversa e com alta

disponibilidade no estado, sendo seu uso no coprocessamento caracterizado como promissora estratégia de economia circular.

Apesar da potencialidade de uso desses resíduos em coprocessamento, o qual se destaca como uma eficiente estratégia para economia circular na construção civil, ainda existem importantes desafios para sua difusão. Enquanto o uso de matérias primas alternativas no cimento têm sido amplamente estudada, como materiais cimentícios suplementares (UN Environment *et al*., 2018), a utilização de blends como combustíveis alternativos ainda se apresenta como uma importante lacuna de conhecimento, tanto técnica quanto ambiental. Isso porque, embora a indústria cimenteira os utilize, de forma empírica, no Brasil, não há normas técnicas para composição de blends de coprocessamento, sendo os resíduos passíveis de emprego enquanto combustíveis alternativos apenas listados na Resolução CONAMA nº 499/2020 (CONAMA, 2020). Assim, ainda existem incertezas relevantes quanto a: (i) parâmetros técnicos adequados para a composição desses blends; (ii) comportamento dos resíduos, em interações heterogêneas em blends; (iii) ganhos ambientais reais a partir do emprego desses resíduos, sob parâmetros técnicos adequados em fornos de cimentos; e (iv) efeitos sobre a química do cimento, uma vez que sejam amplamente utilizados em escala industrial.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo explorar as perspectivas em disponibilidade de resíduos no Rio Grande do Sul, considerando suas tendências de geração, os quais possam ser aplicados tanto em substituição parcial ao clínquer quanto como combustíveis alternativos, pela indústria do cimento. Para tanto, foi analisada a geração de resíduos industriais, declarados à base IBAMA, entre os anos 2013 e 2023. A análise incluiu o potencial do uso de resíduos em coprocessamento, sua principal origem de geração e as tendências para geração futura, para consideração de seu incentivo em coprocessamento. A partir das análises críticas realizadas, verificou-se que há importante sensibilidade no uso de cinza volante, resíduo considerado, atualmente, como essencial, para a indústria cimenteira. Isso porque a cinza volante possui tendência relevante de redução na produção, com a orientação de desligamento de usinas termelétricas, como estratégia de descarbonização da matriz energética brasileira. Por outro lado, foram verificadas relevantes oportunidades para a circularidade na consideração da inclusão de resíduos têxteis em coprocessamento, na forma de blends, contribuindo para redução de disposição inadequada de resíduos contaminados. De forma complementar, a utilização de resíduos têxteis em blends apoia também o emprego de resíduos industriais no coprocessamento, a partir da compatibilização de propriedades físico-químicas relevantes para a indústria cimenteira. Por fim, considera-se que, para utilização de resíduos como combustíveis alternativos, em escala industrial, ainda existem importantes desafios relacionados à sua normatização técnica e avaliação ambiental, os quais denotam a necessidade de estudos mais aprofundados acerca de sua utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Panorama do Coprocessamento 2024 (Ano Base 2023)**. São Paulo, 2024.

ANCAPI, F. B.; KLEIJWEG, M.; VAN DEN BERGHE, K.; YORKE-SMITH, N.; VAN BUEREN, E. How Ex Ante Policy Evaluation Supports Circular City Development: Amsterdam's Mass Timber Construction Policy. **Journal of Environmental Management,** v. 376, p. 124516, 2025.

CAMARGO-BERTEL, A. A.; HINCAPIE, D.; PUGLIESE, V.; GONZALEZ-QUIROGA, A.; PUPO-RONCALLO, O. Decarbonizing the cement industry in Latin America and the Caribbean: A comprehensive review of strategies, barriers, and policies. **Energy conservation and Management: X**, v. 26, p. 100956, 2025.

CHENG, Z.; LI, X.; WANG, M. Resource curse and green economic growth. **Resources Policy**, v. 74, p. 102325, 2021.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA/MMA nº 499, de 6 de outubro de 2020**. Disponível em:< https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>.

CORTÉS, D.; ALBERT, A. T.; DOROTHEA, G. Sustainability Reporting in the Construction Industry – Status Quo and Directions of Future Research. **Heliyon**, v. 9, n. 11, 2023.

DE FELICE, F., FAREED, A. G.; ZAHID, A.; NENNI, M. E.; PETRILLO, A. Circular Economy Practices in the Textile Industry for Sustainable Future: A Systematic Literature Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 486, p. 144547, 2025.

DONG, B.; CHEN, C.; FANG. G.; WU, K.; WANG, Y. Positive roles of lime mud in blended Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 328, p. 127067, 2022.

DZIEDZIC, R.; PONDICHERRY, P.; DZIEDZIC, P. 2025. Review of National Policy Instruments Motivating Circular Construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 215, p. 108053, 2025.

EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional**: Relatório Final, 2024.

FINAMORE, M.; OLTEAN-DUMBRAVA, C. Circular economy in construction - findings from a literature review. **Heliyon**, v. 10, e346347, 2024.

IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Geração de Resíduos no Estado do Rio Grande do Sul em empreendimentos com licenciamento federal**. [Dados de acesso restrito a pesquisadores com autorização], 2024.

KOSAJAN, V.; DONG, J.; WEN, Z. Investigating the Impact of Co-Processing Municipal Solid Waste in Cement Kilns on Coal Savings and Emissions Using Machine Learning. **Journal of Cleaner Production**, v. 493, p. 144966, 2025.

KUMAR, P.; NANDI, B. K. Assessment of Combustion Characteristics of High Ash Indian Coal, Petroleum Coke and Their Blends for Cement Industry Using TGA. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 5, p. 100091, 2023.

MALACARNE, C. S.; DA SILVA, M. R. C.; DANIELI, S.; MACIEL, V. G.; KIRCHHEIM, A. P. Environmental and Technical Assessment to Support Sustainable Strategies for Limestone Calcined Clay Cement Production in Brazil. **Construction and Building Materials,** v. 310, p. 125261, 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico**, 2021.

MONTEIRO, A. G. A.; SCUR, G.; MATTOS, C. A.; DE OLIVEIRA, M. C. Circular Economy in the Brazilian Chemical Industry: A Proposal for a Circularity Index. **Cleaner Engineering and Technology,** v. 19, p. 100730, 2024.

NETO, J. S. A.; CARVALHO, I. C.; MONTEIRO, P. J.M.; DE MATOS, P. R.; KIRCHHEIM, A. P. Unveiling the Key Factors for Clinker Reactivity and Cement Performance: A Physic-Chemical and Performance Investigation of 40 Industrial Clinkers. **Cement and Concrete Research**, v. 187, p. 107717, 2025.

PITRE, V.; LA, H.; BERGERSON, J. Impacts of alternative fuel combustion in cement manufacturing: Life cycle greenhouse gas, biogenic carbon, and criteria air contaminant emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 475, p. 143717, 2024.

SAKTHIVELMURUGAN, E.; SENTHILKUMAR, G.; KARTHICK, K. N. Analysis of the Impact of Circular Economy over Linear Economy in the Paper Processing Industry. **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 1446-1452, 2022.

SALARIPOOR, H.; YOUSEFI, H.; ABDOOS, M. Life Cycle Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel (RDF) as an Alternative to Fossil Fuels in Cement Production: A Sustainable Approach for Mitigating Carbon Emissions. **Fuel Communications,** v. 22, p. 100135, 2025.

SALAS, D. A., RAMIREZ, A.D.; RODRÍGUEZ, C.R.; PETROCHE, D.M.; BOERO, A.J.; DUQUE-RIVERA, J. Environmental Impacts, Life Cycle Assessment and Potential Improvement Measures for Cement Production: A Literature Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 114-122, 2016.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. Sustainable Cement Production-Present and Future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 642-650, 2011.

SINA, A.T.; BRAHIM, J.A.; ALI, B.B.; ACHIOU, B.; HANEKLAUS, N.; BENIAZZA, R. Securing gypsum demand in cement industry by gypsum by-products: Current challenges and prospects. **Materials Today Sustainability**, v. 28, p. 101034, 2024.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO2 Cement-Based Materials Industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 2018.

SILVEIRA, V. A. L.; DE RESENDE, D. S.; BEZERRA, A. C. S. Sanitary Ware Waste in Eco-Friendly Portland Blended Cement: Potential Use as Supplementary Cementitious Material. **CEMENT,** v. 19, p. 100126, 2025.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual**, 2023.

UN - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME & GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION. Not just another brick in the wall: The solutions exist- Scaling them will build on progress and cut emissions fast. **Global Status Report for Buildings and Construction**, 2025.

UN ENVIRONMENT, SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

VENANCIO, R. J. M. **Análise de resíduos industriais utilizados na produção de blends para coprocessamento: uma visão sob o ponto de vista energético**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2022.

WANG, Y.; ZHU, Q.; GENG, Y. Trajectory and Driving Factors for GHG Emissions in the Chinese Cement Industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 53, p. 252–60, 2013.

WANG, Z.; HUANG, X; HUANG, Q.; DING, A. Environmental impacts of aerosol radiative effect and urbanization and their interactions over the Beijing-Tianjin-Hebei City cluster. **Urban Climate**, v. 56, p. 102020, 2024.

YANG, H.; XIA, J.; THOMPSON, J.R.; FLOWER, R.J. Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China. **Waste Management**, v. 63, p. 393-396.

ZAFAR, M.W.; MIRZA, F.M.; ZAIDI, S.A.H.; HOU, F. The nexus of renewable and nonrenewable energy consumption, trade openness, and CO_2 emissions in the framework of EKC: evidence from emerging economies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 15162-15173, 2019.

AGRADECIMENTOS

À FAPERGS, que financia esse estudo através dos projetos CLIMACIMENTO (24/2551-0002121-3) e ECOCIM (24/2551-0001926-0).