XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9006

Metodologia de mapeamento de resíduos industriais para coprocessamento na indústria do cimento

Methodology for mapping industrial waste for co-processing in the cement industry

Matheus Henrique Gomes de Medeiros
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | matheus96h@gmail.com
João Pedro Martins Bueno
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | jpedrobueno2004@gmail.com
Ruane Fernandes de Magalhães
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | ruane.magalhaes@ufrgs.br
Ana Paula Kirchheim
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | anapaula.k@gmail.com

Resumo

Este trabalho estrutura e avalia, por aplicação em escala estadual, uma metodologia de mapeamento e triagem de resíduos industriais declarados a órgão licenciador, com potencial de aproveitamento na cadeia produtiva do cimento. A pesquisa, documental e quantitativa, estruturou dados do Rio Grande do Sul entre 2018 e 2024, mediante delimitação dos resíduos de interesse, preparação da base, codificação segundo função potencial e agregação por resíduo, atividade e município. O procedimento foi aplicado a 163.529 registros, referentes a 9.224 indústrias, 486 municípios e 518 tipologias de resíduos. A análise identificou fluxos expressivos de cinza volante e lama de cal como potenciais matérias-primas alternativas e de madeiras, lodos de ETE e ETA e resíduos agrícolas e alimentares como candidatos à composição de combustíveis alternativos, além de evidenciar concentrações territoriais, como a lama de cal em Guaíba e a cinza volante em Candiota. A metodologia constitui instrumento de triagem para orientar caracterizações posteriores e estratégias de circularidade na indústria cimenteira.

Palavras-chave: Resíduos industriais. Coprocessamento. Indústria cimenteira. Economia circular. Mapeamento territorial.

Abstract

This study structures and evaluates, through application at the state scale, a methodology for mapping and screening industrial waste declared to licensing body with potential use in the cement production chain. The documentary and quantitative research structured data from Rio Grande do Sul, Brazil, between 2018 and 2024 through the delimitation of waste streams of interest, database preparation, coding according to potential function, and aggregation by waste type, activity and municipality. The procedure was applied to 163,529 records from 9,224 industries, 486 municipalities and 518 waste types. The analysis identified significant flows of fly ash and lime mud as potential alternative raw materials, as well as wood, wastewater and water treatment sludge, and agricultural and food-industry residues as candidates for alternative fuel blends. It also highlighted territorial concentrations, such as lime mud in Guaíba and fly ash in Candiota. The method is a screening tool to guide subsequent characterization and circularity strategies in the cement industry.

Keywords: Industrial waste. Co-processing. Cement industry. Circular economy. Territorial mapping.

Como citar:
MEDEIROS, M. H. G. de; BUENO, J. P. M.; MAGALHÃES, R. F. de; KIRCHHEIM, A. P. Metodologia de mapeamento de resíduos industriais para coprocessamento na indústria do cimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9006

INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira é altamente dependente do consumo intensivo de matérias-primas minerais não renováveis, especialmente calcário, argila e minério de ferro na preparação da farinha para produção de clínquer. De forma complementar, a produção do cimento é baseada fortemente em combustíveis fósseis, como coque e carvão mineral, empregados para suprir a elevada demanda térmica do processo [1]. Por esses motivos, a indústria do cimento representa uma fonte expressiva de emissões de CO_2, respondendo por aproximadamente 26% das emissões industriais globais [2]. Nesse contexto, o aumento dos níveis de aproveitamento de resíduos e de subprodutos constitui uma estratégia relevante para promover a economia circular no setor, reduzir a extração de recursos naturais e diversificar as fontes materiais e energéticas empregadas na fabricação do cimento.

A inserção de resíduos na cadeia produtiva do cimento é denominada coprocessamento e pode ocorrer por diferentes rotas tecnológicas. [3]. A primeira compreende seu emprego como matéria-prima alternativa na composição da farinha, quando o resíduo possui constituintes minerais compatíveis com a formação do clínquer, como a lama de cal, substituindo parcialmente o calcário [4]. A segunda corresponde ao uso de resíduos como combustível alternativo, mediante coprocessamento em fornos ciclones e rotativos de produção de clínquer, desde que atendidos os requisitos técnicos e ambientais aplicáveis à infraestrutura industrial [5]. A terceira rota envolve a utilização de resíduos ou subprodutos como constituintes do cimento, como por exemplo a cinza volante [6] e as argilas naturais [7], após beneficiamento e comprovação de desempenho e conformidade normativa, contribuindo para a redução do consumo de clínquer ou de outras matérias-primas convencionais.

Apesar de sua relevância, o aumento da incorporação de resíduos pela indústria cimenteira depende, inicialmente, da identificação dos resíduos e subprodutos que são gerados em determinadas regiões, das quantidades geradas, das atividades industriais que dispõem tais resíduos e em que localidades sua geração ocorre. Sem uma base estruturada de informações, torna-se limitada a seleção de resíduos com potencial de aproveitamento pela indústria cimenteira, assim como induz a lacunas para análise de disponibilidade territorial, regularidade de geração e possibilidades de integração com cadeias produtivas existentes. Nesse contexto, o Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (RAPP) [8], mantido pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), constitui uma base de dados declaratória de informações ambientais, como fonte relevante para subsidiar decisões técnicas, ambientais e estratégicas relacionadas à circularidade material no setor cimenteiro. No entanto, essa base de dados é altamente complexa, composta por dados brutos individualizados, sendo necessário amplo e profundo tratamento de dados para que as análises realizadas orientem o processo decisório de incorporação de resíduos para a indústria cimenteira.

Assim, este artigo tem por objetivo estruturar e avaliar, pela aplicação em escala estadual, uma metodologia técnica de mapeamento, classificação e análise de resíduos industriais declarados ao IBAMA, direcionada à triagem de potenciais matérias-primas alternativas e combustíveis para coprocessamento, na indústria cimenteira.

METODOLOGIA

A pesquisa é de natureza aplicada, documental e quantitativa. A metodologia foi concebida como um fluxo de triagem em quatro etapas: (i) definição do grupo de resíduos de interesse, (ii) aquisição da base declaratória, (iii) tratamento, (iv) codificação dos dados, e (v) análises contextualizadas. O procedimento não busca atestar que determinado resíduo possa ser aproveitamento em coprocessamento; mas sim identifica resíduos com alto potencial para essa técnica, a partir das evidências de origem, disponibilidade e recorrência que justificam análises físico-químicas, ambientais e industriais aprofundadas.

A metodologia auxilia em desafios presentes em bases extensas de resíduos, tais como: as tipologias de resíduos sem definição clara, baseadas em códigos genéricos; a necessidade de distinguir potencial de substituição de matéria-prima, combustível ou materiais que não se aplicam a processos específicos, como o coprocessamento; a dispersão espacial e setorial da geração; e a impossibilidade de interpretação de quantidades exatas por tipologias de resíduos.

ETAPA 1 - DELIMITAÇÃO DOS RESÍDUOS DE INTERESSE

A composição do material investigado iniciou-se pela identificação, na literatura, de resíduos com possibilidade de uso como matéria-prima ou combustível em coprocessamento. A lista preliminar de resíduos identificados foi confrontada com a Resolução CONAMA/MMA nº 499/2020, que fornece o enquadramento regulatório nacional para coprocessamento, e com diretrizes setoriais que distinguem resíduos empregados como combustíveis e como matérias-primas alternativas [5].

ETAPA 2 - AQUISIÇÃO E PREPARAÇÃO DA BASE DECLARATÓRIA

Os dados de análise, priorizados na etapa anterior, foram filtrados nas autodeclarações de geração de resíduos industriais vinculadas ao IBAMA [8]. Foram selecionados registros referentes ao estado do Rio Grande do Sul e aos anos-base de 2018 a 2024. Os dados utilizados na aplicação compreenderam informações de munícipio de geração, categoria de atividade industrial geradora, detalhamento da atividade industrial, ano de geração, tipo de resíduo (conforme classificação IBAMA), quantidade gerada (litros ou quilogramas) e classificação do resíduo (perigoso ou não perigoso).

A partir da análise inicial dos dados brutos obtidos, a base de dados filtrada apresentou as seguintes características:

a) 163.529 dados brutos de resíduos gerados entre 2018 e 2024 pela Indústria do Rio Grande do Sul.

b) 9.224 indústrias geradoras;
c) 486 municípios de geração no Rio Grande do Sul;
d) 21 tipos de atividades industriais;
e) 518 tipos de resíduos industriais gerados, conforme classificação IBAMA.

ETAPA 3 - CODIFICAÇÃO PARA COPROCESSAMENTO

A codificação dos resíduos industriais presentes na base de dados foi construída conforme a função potencial do resíduo ou subproduto no coprocessamento, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Codificação de triagem dos resíduos declarados

Código	Função analítica	Interesse para a indústria cimenteira
MP	Matéria-prima alternativa	Potencial de substituição de matérias-primas convencionais.
B	Blend combustível	Para composição de combustíveis alternativos.
RCD	Resíduos de construção e demolição	Categoria específica para investigação de incorporação na produção de cimento.
TX	Resíduos têxteis	Categoria específica para investigação como combustível alternativo.
NB	Não blend	Não encaminhados como potenciais a combustível alternativo no escopo adotado, devido a suas características de periculosidade ou de falta de detalhamento do tipo de resíduo.

Fonte: elaborado pelos autores

Para o código MP, foram registradas subclasses de cinza volante, gesso e lama de cal. Dentro da categoria B, que compõe os materiais potenciais para composição de blends de combustíveis, detalharam-se subclasses de resíduos com origem ou finalidade de triagem semelhante: catalisadores usados; substâncias oleosas; resíduos industriais; resinas, colas e látex; pneus e borrachas; madeiras; solventes; lodos de ETE e ETA; terra contaminada; papel e papelão; resíduos da indústria química; resíduos da agricultura; resíduos da indústria de alimentos; equipamentos de proteção individual; resíduos líquidos; e areia de fundição. A etapa inicial de tratamento previu, ainda, classificação de não blend (NB) para registros que não deveriam prosseguir como potencial a combustíveis alternativos no escopo adotado, por suas características de periculosidade ou devido à base de dados não apresentar o detalhamento necessário para seleção do resíduo.

Além da codificação em primeiro nível, os resíduos codificados como MP, B, RCD e TX, tiveram suas categorias de atividades industriais classificadas de forma mais detalhada. Isso porque algumas classificações padrão da base IBAMA, como ‘Transporte, Terminais, Depósitos e Comércio’ tornavam a análise altamente inespecífica, dificultando a compreensão da atividade industrial geradora. Para esse segundo nível de análise, tais classificações foram corrigidas a partir da análise de CNPJ e CNAE das indústrias geradoras, individualmente.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9006

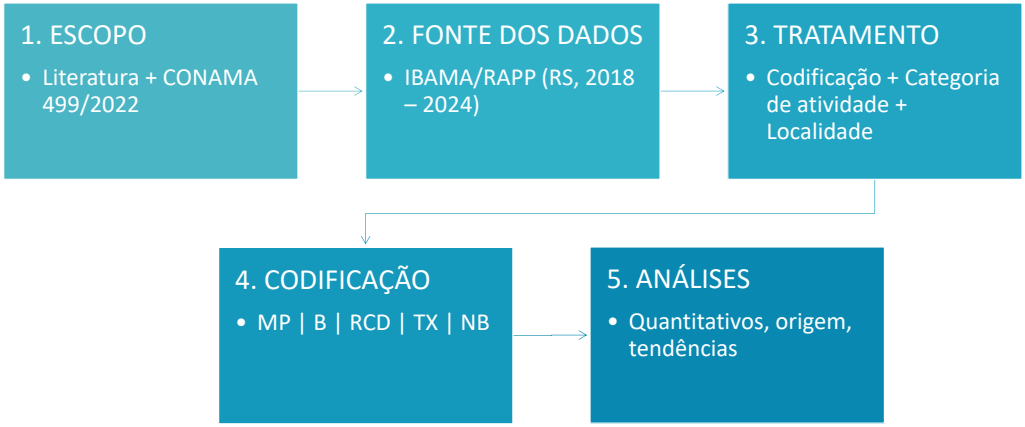
ETAPA 4 - AGREGAÇÕES E ANÁLISE DOS DADOS

Após a codificação dos resíduos presentes na base de dados, as quantidades compatíveis de cada tipo de resíduo foram agregadas, por ano de geração e por categoria de atividade industrial geradora. A partir de então, foi possível realizar as seguintes análises:

a) classificação e quantitativo médio anual de resíduos com potencial para coprocessamento como matéria-prima ou combustível alternativo;
b) identificação das atividades industriais associadas à geração de cada classe de resíduo;
c) identificação dos municípios geradores dos resíduos;
d) relações entre tipo de resíduo industrial gerado, atividade industrial geradora, localidade de geração e quantidade média anual gerada.

A Figura 1 sintetiza a metodologia desenvolvida.

Figura 1 – Fluxo metodológico.



Fonte: autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises iniciais consistiram no levantamento do quantitativo médio anual gerado pelos resíduos com potencial de substituição como matéria-prima (Tabela 1) e como combustíveis alternativos (Tabela 2) na produção de cimento.

Tabela 1: Quantitativo médio anual de geração de resíduos com potencial de coprocessamento como matéria-prima

Código de classificação	Tipo de Resíduo	Quantitativo médio gerado entre 2018 – 2024 (em toneladas)	Principais indústrias geradoras
MP1	Cinza Volante	1.853.797	Usinas Térmicas a carvão
MP2	Gesso	738	Indústrias diversas (construção civil, cerâmica)
MP3	Lama de Cal	138.020	Indústria de papel e celulose

Fonte: os autores.

Na Tabela 1, destaca-se a geração da cinza volante, gesso e da lama de cal, em quantitativos anuais. O quantitativo de cinza volante gerado no Rio Grande do Sul se deve, em mais de 90%, à operação da usina térmica a carvão de Candiota. Por sua vez, o gesso é gerado por diferentes setores, principalmente a construção civil. Considerando que a base de dados analisada compreende empreendimentos com alto potencial poluidor, licenciados pelo IBAMA, verifica-se que o baixo quantitativo de gesso registrado denota possível subdeclaração dos resíduos gerados ou ainda geração esparsa no estado, com origem em pequenos e médios geradores.
Complementarmente, a Tabela 2 apresenta o quantitativo levantado para resíduos com potencial de coprocessamento enquanto combustíveis alternativos.

Tabela 2: Quantitativo médio anual de geração de resíduos com potencial de emprego como combustíveis no coprocessamento

Código de classificação	Tipo de Resíduo	Quantitativo médio gerado entre 2018 – 2024 (em toneladas)
B1	Catalisadores usados	316.291
B10	Papel e papelão	
B2	Substâncias oleosas	70.879
B3	Resíduos industriais	64.592
B11	Resíduos da indústria química	
B4	Resinas, colas, látex	172.892
B7	Solventes	
B5	Pneus e borrachas	29.199
B6	Madeiras	2.216.425
B8	Lodo de ETE e de ETA	8.809.792
B9	Terra contaminada	21.637
B14	Areia de fundição	
B12	Resíduos de Agricultura	1.516.109
B13	Resíduos da Indústria de Alimentos	
TX	Resíduos Têxteis	21.160

Fonte: os autores.

Dentre os principais resíduos mapeados na Tabela 2, podem ser destacados: resíduos industriais e da indústria química; madeiras; lodo de ETE e de ETA; e resíduos têxteis. Os resíduos industriais e da indústria química se destacam pelo alto poder calorífico superior, contribuindo para o potencial de aproveitamento nos fornos de cimento. Esses resíduos, no entanto, devem ser combinados a resíduos que possuam propriedades de neutralização do blend de coprocessamento, de forma que o composto obtido apresente segurança de utilização. Nesse sentido, o papel dos resíduos têxteis e de madeira torna-se fundamental, os quais possuem propriedades adequadas de queima, com poder calorífico intermediário, capazes de equilibrar blends que possuam resíduos industriais em sua composição. Adicionalmente, destaca-se o potencial de aproveitamento dos lodos de ETE e de ETA, os quais apresentam alto volume de geração no Rio Grande do Sul. Esse resíduo desempenha função relevante no blend de coprocessamento, atuando como estabilizador de sua composição ou como forma de elevação do poder calorífico superior da mistura.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9006

MATRIZ DE ANÁLISE DE LOCALIDADE, ATIVIDADE INDUSTRIAL E GERAÇÃO POR RESÍDUO

Após as análises iniciais, foi possível realizar o cruzamento de dados dos resíduos industriais com maior potencial de emprego em coprocessamento no Rio Grande do Sul com seus dados de rastreio. O cruzamento de dados considerou o município em que está localizada a indústria geradora, o tipo de atividade industrial relacionado e o quantitativo total de resíduos gerados por ano. A matriz de cruzamento foi desenvolvida para todos os resíduos com potencial de coprocessamento; ao passo que a Figura 2 demonstra sua aplicação, ao caso da lama de cal.

Figura 2 – Matriz de análise para o emprego de lama de cal.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Bento Gonçalves	90.590,00	–	–	–	–	–	90.590,00
Indústria de produtos alimentares e bebidas	90.590,00	–	–	–	–	–	90.590,00
Campo Bom	–	–	–	–	100,00	–	100,00
Indústria mecânica	–	–	–	–	100,00	–	–
Caxias Do Sul	–	–	–	1.230,00	30.000,00	69.680,00	100.910,00
Indústria de produtos alimentares e bebidas	–	–	–	–	30.000,00	66.000,00	96.000,00
Indústria mecânica	–	–	–	1.230,00	–	–	1.230,00
Serviços de utilidade	–	–	–	–	–	3.680,00	3.680
Charqueadas	–	–	–	–	12.000,00	17.080,00	29.080,00
Transporte, terminais, depósitos e comércio	–	–	–	–	12.000,00	17.080,00	29.080,00
Guaíba	115.540.650,00	150.103.530,00	142.245.305,00	96.913.350,00	127.690.540,00	155.928.394,00	788.430.769,00
Indústria de papel e celulose	115.540.650,00	150.103.530,00	142.245.305,00	96.913.350,00	127.690.540,00	155.928.394,00	788.430.769,00
Sapiranga	–	–	–	11.250,00	12.000,00	–	23.250,00
Indústria de papel e celulose	–	–	–	11.250,00	12.000,00	–	23.250,00
Sapucaia Do Sul	10.430,00	–	–	–	–	–	10.430,00
Indústria metalúrgica	10.430,00	–	–	–	–	–	10.430,00
Vacaria	–	–	–	–	80,00	304,84	384,84
Indústria de produtos alimentares e bebidas	–	–	–	–	80,00	304,84	80,00
Uso de recursos naturais	–	–	–	–	–	–	304,84
Total geral (kg)	**115.641.670,00**	**150.103.530,00**	**142.254.305,00**	**96.925.830,00**	**127.744.720,00**	**156.015.458,84**	**788.685.513,84**

Fonte: os autores.

A análise referente à lama de cal demonstrou que sua geração é centralizada pela indústria de papel e celulose do Rio Grande do Sul, mais precisamente na cidade de Guaíba/RS. A série histórica apresenta apenas um dado anômalo, referente ao ano de 2021, devido à queda da produção durante a pandemia de COVID-19. A geração desse resíduo é dependente das atividades da indústria de papel e celulose, a qual é balizada por relações de mercado internacionais, uma vez que possui foco principal em exportação.

Portanto, a partir da matriz, é possível compreender, de forma detalhada, os padrões de geração do resíduo, a variação histórica no decorrer dos anos e onde são as principais regiões de geração. Essa análise possibilita a tomada de decisão estratégia pela indústria cimenteira, para emprego de resíduos; além de apontar caminhos relevantes a serem considerados em políticas públicas de incentivo à circularidade.

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a sistematização dos dados autodeclaratórios de bases de dados extensas, como a do IBAMA, possibilita converter dados amplos e heterogêneos de geração de resíduos em informações que contribuam para a tomada de decisão em coprocessamento na indústria cimenteira. A aplicação do método aos 163.529 registros do Rio Grande do Sul, entre 2018 e 2024, permitiu organizar os resíduos conforme sua função potencial, identificar atividades e municípios geradores e reconhecer padrões de concentração e recorrência que não seriam claros, a partir da base bruta. Os resultados destacaram fluxos relevantes para estudos posteriores: cinza volante e lama de cal como potenciais matérias-primas alternativas; e madeiras, lodos de ETE e ETA, resíduos industriais/químicos e resíduos têxteis como candidatos à composição de combustíveis alternativos. A matriz de localidade, atividade industrial e geração por resíduo evidenciou, ainda, que alguns fluxos estão associados a polos ou indústrias específicas, como a lama de cal em Guaíba, aspecto determinante para avaliações logísticas e de regularidade de fornecimento do resíduo à indústria cimenteira.

Cabe ressaltar que a metodologia proposta não substitui ensaios de caracterização físico-química, avaliação ambiental, análise de conformidade regulatória ou testes industriais; sua contribuição está relacionada à etapa prévia de triagem, capaz de direcionar essas investigações para resíduos com maior relevância quantitativa e territorial. Assim, o trabalho oferece uma abordagem replicável para outros contextos ou bases históricas e subsidia estratégias voltadas à redução do uso de recursos não renováveis e à promoção da economia circular no setor cimenteiro.

AGRADECIMENTOS

À FAPERGS, que financiou este estudo através dos projetos ECOCIM (24/2551-0001926-0) e Climacimento (24/2551- 0002121-3). APK agradece o apoio do CNPq na forma de bolsa de produtividade em pesquisa. MHGM agradece o apoio do CNPq na forma de bolsa de doutorado. Os autores agradecem à Fundação PROAMB pelo apoio técnico e de acesso a dados junto ao IBAMA.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro utilizou o ChatGPT 5.5 para sintetização da introdução e resultados do trabalho, bem como a revisão ortográfica do texto. Após a

utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] SNIC. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: [ ], 2019. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf. Acesso em: 20 abr. 2026.

[2] GUO, Y.; LUO, L.; LIU, T.; HAO, L.; LI, Y.; LIU, P.; ZHU, T. A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. **Journal of Environmental Sciences**, v. 136, p. 682-697, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021

[3] GIZ. **Guidelines on Pre- and Co-processing of waste in Cement Production**. LafargeHolcim, 2020.

[4] DIKSHIT, A. K.; GUPTA, S.; CHATURVEDI, S. K.; SINGH, L. P. Usage of lime sludge waste from paper industry for production of Portland cement clinker: sustainable expansion of Indian cement industry. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, e100557, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100557

[5] 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>.

[6] MEDEIROS, M. H. G. **Impacto do uso de aditivos aceleradores de hidratação e resistência à compressão à base de alcanolaminas em cimentos Portland com diferentes teores de cinza volante**. 2022. 116 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

[7] SCHULZE, S. E.; RICKERT, J. Suitability of natural calcined clays as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 92-97, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.07.006

[8] INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (RAPP)**. Brasília, DF: IBAMA, [s. d.]. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/servicos/relatorios/atividades-poluidoras. Acesso em: 20 maio 2026