



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES E HUMANIDADES
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS APLICADO NA INDÚSTRIA
CIMENTEIRA: UMA PRÁTICA SUSTENTÁVEL

MARIA EDUARDA DE SOUZA

Goiânia
2025

MARIA EDUARDA DE SOUZA

COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS APLICADO NA INDÚSTRIA
CIMENTEIRA: UMA PRÁTICA SUSTENTÁVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de
Licenciatura em Química, como parte dos requisitos
exigidos para a conclusão do curso.

Orientadora: Profa. Dra. Adélia Maria Lima da Silva

Goiânia
2025



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE
FORMAÇÃO DE PROFESSORES E HUMANIDADES
CURSO DE QUÍMICA - LICENCIATURA

Ata de Defesa Pública do Trabalho de Conclusão de Curso

Aos 05 dias do mês de dezembro de 2025, às 17 horas, em sessão pública na sala 406 do bloco 6 da área 6 da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, na presença da Banca Examinadora presidida pelo(a) Professor(a) Adélia Maria Lima da Silva e composta pelos examinadores:

1. Sandra Regina Longhin
 2. Rodrigo da Costa Bastos
- do(a) estudante Maria Eduarda de Souza

apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso II intitulado:

Coprocessamento de resíduos sólidos aplicado na indústria cimenteira: uma prática sustentável

como requisito curricular indispensável para a integralização do Curso de Licenciatura em Química. Após reunião em sessão reservada, a Banca Examinadora deliberou e decidiu pela ARROVAÇÃO do referido trabalho, divulgando o resultado formalmente ao estudante e demais presentes e eu, na qualidade de Presidente da Banca, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais examinadores e pelo estudante. Fica formalmente definido que a nota final será registrada somente após a correção e entrega do trabalho final dentro das normas exigidas pelo Curso.

Presidente da Banca Examinadora: Adélia Maria Lima da Silva
Assinatura: [Assinatura]

Examinador 01 – Nome: Sandra Regina Longhin
Assinatura: [Assinatura]

Examinador 02 – Nome: Rodrigo da Costa Bastos
Assinatura: [Assinatura]

Estudante – Nome: Maria Eduarda de Souza
Assinatura: [Assinatura]

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me sustentou até aqui, abrindo portas e caminhos que tornaram possível a conclusão deste curso. Sou profundamente grata aos meus pais, que sob sol forte, desafios e inúmeros obstáculos, me deram a oportunidade de estudar, seguir meus sonhos e conquistar meu espaço no mundo. À minha irmã, que foi apoio, consolo e base durante toda a caminhada. Sua presença, incentivo e ajuda foram essenciais para que eu chegasse até aqui. À minha professora e orientadora, Adélia Maria Lima da Silva, pela dedicação, paciência e por nunca desistir de mim. Sua orientação foi fundamental para a realização deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos também aos professores Sandra Regina Longhin, Danna Pereira Barbosa e Rodrigo Mota de Bastos, que, mesmo diante de tantos desafios, sempre me motivaram, me fortaleceram e me ajudaram a encontrar soluções ao longo do percurso acadêmico. Aos colegas de curso e amigos, deixo minha sincera gratidão. Com vocês, a jornada se tornou mais leve. Enfrentamos dificuldades, mas seguimos firmes, apoiando uns aos outros. Carrego comigo cada um de vocês com muito carinho. Foi um privilégio dividir a rotina de estudos, aprendizados e vivências que levarei para a vida.

Concluo este ciclo com gratidão e com o sentimento de dever cumprido, consciente de que estou contribuindo de alguma forma para a sociedade. Fazer um curso de Licenciatura em Química é mais que estudar leis educacionais; é aprender a formar pessoas, compartilhar conhecimento e transformar realidades. Meus mais sinceros agradecimentos a todos vocês, por tudo e por tanto!

Maria Eduarda de Souza

RESUMO

Diante do agravamento da crise climática e da necessidade de práticas industriais mais eficientes e sustentáveis, o coprocessamento destaca-se como uma alternativa capaz de gerar benefícios ambientais e econômicos. Esse processo consiste na substituição parcial de matérias-primas e combustíveis fósseis por resíduos sólidos que apresentam poder calorífico e composição adequados ao funcionamento dos fornos de clínquer, utilizados na produção de cimento. Dessa forma, resíduos que poderiam receber destinação inadequada passam a ser reaproveitados como insumos industriais, reduzindo impactos ambientais e ampliando a eficiência produtiva. O uso de resíduos no coprocessamento é rigorosamente monitorado por legislações que regulamentam a classificação, o risco associado e as formas corretas de destinação, garantindo que todo o processo ocorra dentro dos parâmetros governamentais. Com base nisso, o Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo investigar o coprocessamento realizado por uma indústria que trata resíduos sólidos por meio dessa técnica. A pesquisa, caracterizada como aplicada e descritiva, busca relacionar conhecimentos teóricos com a prática observada durante a visita técnica, além de analisar os impactos ambientais decorrentes das operações da empresa. O estado da arte reúne informações sobre o coprocessamento de resíduos sólidos em fornos de clínquer, as normas regulamentadoras e a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Também aborda aspectos socioambientais, tecnológicos, procedimentos de controle de qualidade e a produção técnico-científica relacionada ao tema. Os resultados indicam que o modelo adotado pela empresa se apresenta como uma solução tecnológica viável, segura e alinhada às demandas de desenvolvimento econômico aliado à responsabilidade ambiental.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos, Coprocessamento, Sustentabilidade

ABSTRACT

Given the worsening climate crisis and the need for more efficient and sustainable industrial practices, co-processing stands out as an alternative capable of generating environmental and economic benefits. This process consists of the partial replacement of raw materials and fossil fuels with solid waste that has a calorific value and composition suitable for the operation of clinker kilns used in cement production. In this way, waste that could receive inadequate disposal is reused as industrial inputs, reducing environmental impacts and increasing productive efficiency. The use of waste in co-processing is rigorously monitored by legislation that regulates classification, associated risk, and correct disposal methods, ensuring that the entire process occurs within governmental parameters. Based on this, the Undergraduate Final Project aims to investigate the co-processing carried out by an industry that treats solid waste using this technique. The research, characterized as applied and descriptive, seeks to relate theoretical knowledge with the practice observed during the technical visit, in addition to analyzing the environmental impacts resulting from the company's operations. The state-of-the-art report compiles information on the co-processing of solid waste in clinker kilns, regulatory standards, and the National Solid Waste Policy. It also addresses socio-environmental aspects, technology, quality control procedures, and the technical-scientific production related to the topic. The results indicate that the model adopted by industry presents itself as a viable, safe technological solution aligned with the demands of economic development combined with environmental responsibility.

Keywords: Solid Waste, Co-processing, Sustainability

LISTAS

ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Ilustração da produção de cimento Portland. Fonte: CIMENTO: História, Produção, Tipos e Aplicações - Estruturas&BIM.....	21
Figura 2. Etapas do coprocessamento de resíduos realizadas pela empresa. Fonte: Criado pela autora.....	24
Figura 3. Ilustrações do coprocessamento aplicado na empresa Fonte: a autora.....	26

QUADROS

Quadro 1. Principais legislações relacionadas ao coprocessamento de RS no Brasil.....	20
Quadro 2. Classificação de RS.....	23
Quadro 3. Classificação dos RS de acordo com a empresa.....	24

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
EC	Economia Circular
GEE	Gases de efeito estufa
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RS	Resíduo Sólido
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
3 METODOLOGIA.....	15
3.1 Natureza da pesquisa.....	15
3.2 Coleta de dados.....	16
3.3 Análise de dados.....	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4.1 Coprocessamento.....	16
4.2 Legislação do coprocessamento.....	19
4.3 Vantagens e desvantagens do coprocessamento.....	21
4.4 Empresa que coprocessa os RS.....	22
4.5 Etapas do Coprocessamento de RS pela empresa.....	24
4.6 Controle de qualidade dos resíduos.....	27
4.7 Produtos coprocessados.....	28
4.8 Fator econômico.....	29
4.9 Fator ambiental.....	30
4 CONCLUSÃO.....	30
RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

1. INTRODUÇÃO

A crise climática é um desafio global crescente, cujos efeitos se tornam cada vez mais evidentes. A necessidade de adotar medidas eficazes para mitigar suas consequências é cada vez mais urgente, com a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) emergindo como uma prioridade inadiável (Prado *et al*, 2022).

Os gases de efeito estufa são substâncias capazes de absorver e reemitir radiação infravermelha, contribuindo para o aquecimento da atmosfera terrestre. Entre os principais GEE estão o dióxido de carbono (CO_2), proveniente sobretudo da queima de combustíveis fósseis, do desmatamento e de processos industriais; o metano (CH_4), emitido por atividades agropecuárias, aterros sanitários e pela extração de petróleo e gás; e o óxido nitroso (N_2O), associado principalmente ao uso de fertilizantes nitrogenados e a processos industriais. O vapor d'água (H_2O) também atua como gás de efeito estufa natural, desempenhando um papel importante nos mecanismos de retroalimentação climática. Além desses, há os gases industriais fluorados, como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF_6) e trifluoreto de nitrogênio (NF_3), utilizados em sistemas de refrigeração, na indústria eletrônica e em outros processos, caracterizando-se por apresentarem elevado potencial de aquecimento global mesmo em baixas concentrações (Araújo, 2020; Oliveira, 2021; Viczek *et al.*, 2021).

Para reduzir a emissão de GEE, é essencial que gestores, empresários, sociedade e governo atuem de forma coordenada e eficaz. Dentro desse contexto, o gerenciamento adequado dos resíduos assume um papel fundamental, pois o descarte inadequado desses materiais, especialmente em aterros, contribui significativamente para a emissão de GEE, a contaminação do solo e da água, além de acarretar custos elevados para a recuperação ambiental.

A gestão de resíduos sólidos (RS) se apresenta como um dos maiores desafios ambientais da atualidade, impulsionada pelo crescimento populacional, o aumento do consumo e a intensificação da industrialização. Este cenário resulta em uma produção maciça de resíduos, frequentemente descartados de maneira inadequada, causando degradação ambiental e poluição. Segundo Prado *et al.* (2022, p. 154), “as indústrias cimenteiras são responsáveis por aproximadamente 3% das emissões mundiais de GEE e por aproximadamente 5% das emissões de dióxido de carbono (CO_2)”. Uma das alternativas utilizadas para reduzir as emissões de GEE é o uso de combustíveis alternativos por meio do coprocessamento de RS e da utilização de biomassa.

Nesse contexto, a indústria cimenteira se destaca como um dos setores pioneiros na implementação de soluções inovadoras para o manejo de resíduos, adotando práticas que não apenas reduzem os impactos ambientais, mas também geram benefícios socioeconômicos e de saúde pública (ABCP, 2024). O coprocessamento é uma dessas soluções, sendo uma técnica capaz de reincorporar resíduos ao processo produtivo, seja como fontes de energia ou como substitutos de matérias-primas, favorecendo a economia circular e o aproveitamento eficiente dos recursos (Araújo, 2020).

Em 2023, a indústria cimenteira atingiu um marco importante ao converter cerca de 3,25 milhões de toneladas de resíduos em recursos valiosos, evitando seu descarte em aterros e contribuindo para a redução da pressão sobre os ecossistemas (ABCP, 2024). Regulamentado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução nº 499/2020 e integrado à Lei nº 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o coprocessamento se consolidou como uma das principais alternativas para a redução das emissões de carbono e para a promoção de uma economia de baixo impacto ambiental (Brasil, 2010; Brasil, 2020; ABCP, 2024).

Conforme estabelece a Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009 (Brasil, 2009), o coprocessamento de RS é definido como a “destinação final ambientalmente adequada que envolve o processamento de resíduos como substituto parcial de matéria-prima e/ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento”. Embora apresente potencial para reduzir emissões de GEE e minimizar passivos ambientais, persistem incertezas quanto à variabilidade de sua composição e à presença de contaminantes inorgânicos, o que leva alguns países a limitarem seu uso (Viczek *et al.*, 2021).

Apesar dessas restrições, o coprocessamento tem se consolidado como estratégia de gestão de RS, utilizando combustíveis alternativos na matriz energética da indústria cimenteira. O setor reaproveita toneladas de resíduos, como pneus, plásticos, têxteis pós-consumo, lodos e biomassas. Essa prática reduz significativamente as emissões de CO₂ na atmosfera, minimiza o descarte em aterros e os riscos de contaminação ambiental, alinhando-se aos princípios da economia circular, mostrando-se um tema interessante para ser pesquisado como objeto de estudo (CEMBUREAU, 2023; ABCP, 2024).

Com o avanço da industrialização e das novas tecnologias, o volume de resíduos gerados tem aumentado cada vez mais. Para enfrentar esse cenário, diversas práticas vêm sendo adotadas, e a economia circular surge como uma importante aliada, com o objetivo de reduzir impactos ambientais ao promover a reutilização de resíduos e a extensão do ciclo de vida dos produtos. Segundo Oliveira, Silva e Moreira (2019, p. 274), “a economia circular é uma

alternativa ao atual modelo linear de produção, que não prevê o retorno adequado dos materiais ao ciclo econômico ou à natureza”. Essa abordagem consiste na gestão de recursos finitos, visando recuperar seus valores, priorizar a regeneração e reduzir o uso de matérias-primas.

O conceito de economia circular (EC) propõe a manutenção do valor dos recursos extraídos e produzidos em circulação por meio de cadeias produtivas integradas. O destino de um material deixa de ser uma questão de gerenciamento de resíduos, mas parte do processo de design de produtos e sistemas; com o objetivo de aumentar a eficiência do uso de recursos, com foco especial em resíduos urbanos e industriais, para alcançar um melhor equilíbrio e harmonia entre economia, meio ambiente, e sociedade (Oliveira; Silva; Moreira, p.274, 2019).

Assim, para que um RS possa ser substituído termicamente nos fornos de clínquer é preciso que, proporcione uma substituição máxima de materiais não renováveis. “Como regra os resíduos aceitos como Combustível Derivado de Resíduo (CDR) devem agregar valor ao forno de cimento em termos do poder calorífico da parte orgânica e do valor material da parte mineral”. (CEMBUREAU, 2023).

2. OBJETIVOS

Dada a complexidade e a abrangência do tema, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo geral pesquisar informações sobre o coprocessamento de RS de uma empresa que coprocessa resíduos sólidos, como objeto de estudo. Especificamente, realizou-se um estudo da arte sobre as etapas do processo, envolvendo suas vantagens e desvantagens, uma visita com entrevista com a química responsável pelas etapas do processamento e controle de qualidade.

3. METODOLOGIA

3.1 Natureza da Pesquisa

Quanto aos objetivos, a pesquisa foi classificada como aplicada, uma vez que busca empregar conhecimentos teóricos em uma situação prática, com foco no coprocessamento de resíduos sólidos por uma empresa e na avaliação dos impactos ambientais de suas operações. Além disso, caracteriza-se como descritiva, pois apresenta o estudo de caso de uma indústria específica.

3.2 Coleta de Dados

Foram realizadas visitas técnicas na empresa que coprocessa RS, acompanhada pela responsável técnica química do local. Durante a visita, foram levantados os resíduos gerados na empresa e realizada uma entrevista, cujas perguntas abordaram a descrição da empresa, os processos desenvolvidos, os tipos de análises realizadas, suas aplicações e a sustentabilidade das práticas adotadas.

3.3 Análise de Dados

As etapas do processamento foram organizadas conforme o fluxo operacional da empresa, e um fluxograma foi elaborado com base nas informações obtidas durante a visita técnica. A análise qualitativa da entrevista ocorreu por meio da interpretação de imagens, com o objetivo de identificar as etapas e estratégias do coprocessamento adotadas pela empresa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estado da arte descreve informações sobre o coprocessamento de RS em fornos na empresa que coprocessa RS, as legislações regulamentárias e a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Foram abordados aspectos socioambientais e tecnológicos do coprocessamento, bem como as análises de controle de qualidade e a produção técnico-científica sobre o coprocessamento.

4.1 Coprocessamento

O coprocessamento tem se consolidado como uma estratégia central na indústria cimenteira global, visando reduzir emissões de GEE, promover a economia circular e integrar a gestão de RS à produção de cimento (Rocha, Lins, Santo, 2011; Prado *et al.*, 2022). Esse processo consiste na substituição parcial de matérias-primas e combustíveis fósseis por resíduos com poder calorífico e composição química compatíveis, inseridos de forma controlada em fornos de clínquer operando em altas temperaturas, meio alcalino e atmosfera oxidante, garantindo a completa decomposição térmica e a recuperação de energia (Araújo, 2020; Oliveira, 2021).

No contexto global, a indústria do cimento movimentava aproximadamente US\$ 250 bilhões anuais e é responsável por cerca de 5% das emissões de CO₂, com quase uma tonelada de CO₂ gerada para cada tonelada de cimento Portland produzida (ABCP, 2024). Em 2023, a União Europeia substituiu 53% de seus combustíveis fósseis por resíduos não recicláveis e biomassa, destacando-se como líder mundial nessa prática (CEMBUREAU, 2023). Globalmente, a utilização de combustíveis alternativos deve crescer de 6% em 2023 para 22% em 2030 e atingir 43% até 2050, segundo estimativas da *Global Cement and Concrete Association* (GCCA, 2023).

No Brasil, a indústria cimenteira também tem avançado na adoção do coprocessamento. Em 2024, a Votorantim Cimentos alcançou uma taxa de substituição térmica de 32,1%, utilizando biomassa e resíduos como combustível em seus fornos, com meta de atingir 53% até 2030 (Votorantim Cimentos, 2024). Estima-se que a substituição de combustíveis fósseis por alternativas no país possa representar uma redução de até 13% nas emissões de CO₂ do setor até 2050 (SNIC, 2023).

A produção do cimento Portland envolve uma sequência de etapas industriais que se inicia com a utilização de matérias-primas específicas e segue até a obtenção do produto. O principal insumo é o calcário, encontrado em jazidas na forma de carbonato de cálcio (CaCO₃), que pode apresentar, em sua composição natural, impurezas como óxidos de ferro, alumínio e silício. Outro componente essencial é a argila, constituída principalmente por silicatos de alumínio hidratados, além de óxidos de ferro, alumínio e silício, que fornecem os elementos necessários para a formação dos compostos do cimento. O gesso, por sua vez, é obtido de jazidas sedimentares, ocorrendo na forma de gipsita, bassanita ou anidrita (CaSO₄), e desempenha papel fundamental na etapa final do processo. Em alguns tipos de cimento, também pode ser adicionada a escória de alto-forno, material que contribui para o aumento da resistência e durabilidade do produto, sendo composta por aglomerantes ativados pelo hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, proveniente da hidrólise do óxido de cálcio (SNIC, 2023; Votorantim Cimentos, 2024).

A Figura 1 apresenta uma ilustração das etapas da produção do cimento Portland. Após a extração, as matérias-primas passam pela etapa de pré-homogeneização, na qual o material previamente britado é armazenado em pilhas com o objetivo de garantir um suprimento uniforme ao processo de moagem. Essa etapa visa reduzir as variações na composição química da mistura, utilizando-se equipamentos como o *stacker*, responsável por organizar as pilhas e promover a dosagem e homogeneização do calcário com a argila. Em seguida, ocorre a moagem de cru, na qual o material pré-homogeneizado é transformado

em uma farinha fina, conhecida como farinha de cru. Inicialmente, na britagem secundária, utilizam-se britadores de martelos para reduzir o tamanho das partículas, que posteriormente são moídas em moinhos de bolas, compostos por duas câmaras contendo esferas de aço, até atingir uma granulometria da ordem de 50 μm (Votorantim Cimentos, 2024).

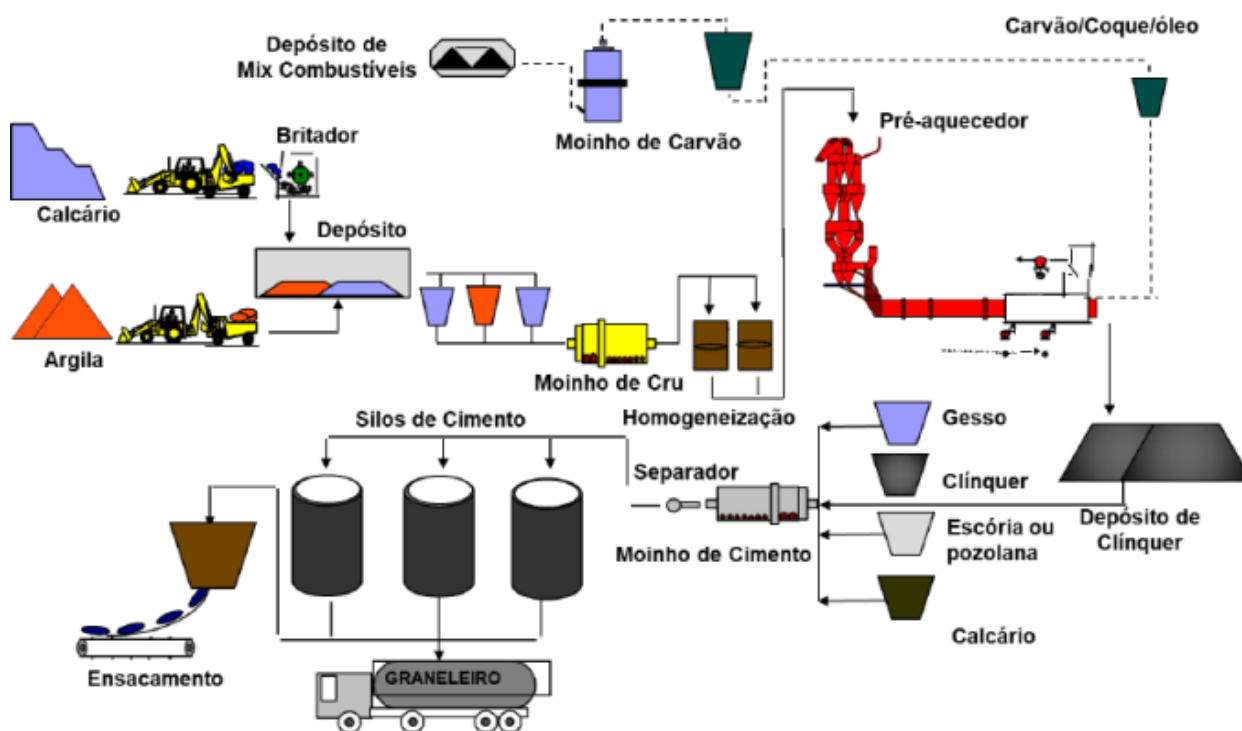


Figura 1. Ilustração da produção de cimento Portland. Fonte: CIMENTO: História, Produção, Tipos e Aplicações - Estruturas&BIM.

A farinha de cru é então encaminhada à torre de ciclones, onde ocorre a etapa de pré-calcinação. Nesse equipamento, o material percorre um gradiente térmico, com temperaturas que variam de aproximadamente 400 °C no topo a 900 °C na base, promovendo a liberação do dióxido de carbono (CO_2) por meio do processo de calcinação e preparando a mistura para a formação do clínquer. Na etapa seguinte, denominada clinquerização, ocorre a fase mais importante da produção do cimento. No interior do forno rotativo, o material é aquecido a temperaturas em torno de 1450 °C, condição essencial para a formação dos principais silicatos do clínquer, como o silicato tricálcico (C_3S), o silicato dicálcico (C_2S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Após essa etapa, o clínquer é rapidamente resfriado em resfriadores específicos, a fim de estabilizar os compostos formados, sendo posteriormente armazenado em silos.

Por fim, na etapa de moagem do cimento, o clínquer é dosado com aditivos que conferem propriedades específicas ao produto. O gesso é adicionado para controlar o tempo de pega, a escória contribui para a durabilidade, e as pozolanas aumentam a resistência química do cimento. Essa mistura é novamente submetida à moagem em moinhos semelhantes aos utilizados na moagem de cru, contando com sistemas de resfriamento para evitar o superaquecimento e garantir que o cimento atenda aos padrões de qualidade estabelecidos.

Historicamente, a indústria cimenteira brasileira evoluiu no uso de combustíveis. Nas décadas de 1960 e 1970 predominava o petróleo cru, na década de 1980 o carvão mineral e vegetal, e a partir da década de 1990 iniciou-se a incorporação de resíduos renováveis e industriais, tornando o coprocessamento também uma fonte de receita adicional (Rocha; Lins; Santo, 2011). O processo caracteriza-se pela introdução controlada de RS nos fornos de clínquer, em condições que asseguram a decomposição completa, segurança operacional e recuperação energética (Oliveira, 2021).

Os resíduos reaproveitados na indústria cimenteira são diversos, desde solventes, resíduos oleosos, pneus, plásticos, papel e serragem até lamas industriais, ossos de animais, grãos vencidos e resíduos do agronegócio, todos com composição química compatível com o clínquer (Araújo, 2020). Segundo o Panorama do Coprocessamento, mais de 3,2 milhões de toneladas de resíduos foram reaproveitadas no Brasil em 2024, o maior volume registrado desde o início da prática na década de 1990, evidenciando o potencial ambiental e econômico do coprocessamento no setor cimenteiro (ABCP, 2024)

4.2 Legislação sobre coprocessamento

Inserido no conceito de economia circular, o coprocessamento está sujeito a regulamentações específicas, como a Resolução CONAMA N° 499/2020, que estabelece critérios e procedimentos técnicos para garantir a segurança e a eficácia do processo (Brasil, 2020). Também é regulamentado pela Resolução CONAMA N° 264/1999, que estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de fornos rotativos utilizados na produção de clínquer, quando empregados no coprocessamento de resíduos. Contudo, determinados tipos de resíduos, como domiciliares brutos, de serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e similares, estão expressamente excluídos dessa prática (Brasil, 1999). Apesar da regulamentação, a carência de infraestrutura adequada para o manejo de RS ainda representa um obstáculo significativo à ampliação do coprocessamento no país.

Quadro 1. Principais legislações relacionadas ao coprocessamento de RS no Brasil

Legislação/Norma	Órgão Emissor	Tema/Abrangência	Principais Exigências e Aplicações
Lei nº 12.305/2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos	Congresso Nacional/MMA	Gestão integrada e destinação ambientalmente adequada dos RS	Estabelece a hierarquia de gestão: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final. Autoriza o reaproveitamento energético de resíduos não recicláveis.
Decreto nº 7.404/2010	Presidência da República	Regulamenta a PNRS	Detalha a implementação da política, os planos de gerenciamento e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.
Resolução nº 499/2020	CONAMA/MMA	Critérios e procedimentos técnicos	Define os critérios e procedimentos técnicos para garantir a segurança e a eficácia do coprocessamento
Resolução nº 264/1999	CONAMA/MMA	Uso de resíduos em fornos de clínquer	Define critérios para recebimento, armazenamento, caracterização, blendagem e queima de resíduos. Exige controle de emissões e laudos laboratoriais.
Resolução CONAMA Nº 005/1993	CONAMA/MMA	Gerenciamento de resíduos em portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários, bem como em serviços de saúde	Determina a elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), a correta classificação, acondicionamento, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos
NBR 10004:2004	ABNT	Classificação de resíduos sólidos	Classifica os resíduos em perigosos (Classe I), não inertes (Classe II A) e inertes (Classe II B). Base para aceitação e controle de resíduos.
NBR 17100:2023	ABNT	Estabelece os requisitos gerais para o gerenciamento de resíduos	Aborda desde a geração até a destinação final, incluindo a recuperação energética.

Fonte: Elaborado pela autora, baseando-se nas informações do ABCP, 2024.

De acordo com PNRS, Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, art. 9º, “Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (Brasil, 2010). Sendo assim, é necessário seguir esses critérios para destinação e reutilização dos resíduos sólidos. A PNRS integra a Política Nacional do Meio Ambiente e articula-se com as diretrizes nacionais para o saneamento básico e com a política federal de saneamento básico. Essa política busca o equilíbrio socioambiental e define responsabilidades compartilhadas entre geradores e o poder público (Quadro 1).

Além das resoluções e da Lei citadas, outras regulamentações relevantes complementam o arcabouço legal do coprocessamento, como o Decreto nº 7.404/2010, que regulamenta a PNRS, e a Resolução CONAMA nº 005/1993, que trata do gerenciamento de resíduos em portos, aeroportos, terminais e instalações afins. Também se destacam as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especialmente a NBR 10.004:2004, que estabelece a classificação dos resíduos sólidos, e a NBR 17.100:2023, que aborda todas as etapas, ou seja, desde a da geração à destinação final, incluindo a recuperação energética (uso como combustível) desses resíduos. O Quadro 1 apresenta as principais legislações relacionadas ao coprocessamento de resíduos sólidos no Brasil, utilizadas pela empresa como referência para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos.

4.3 Vantagens e desvantagens do coprocessamento

O coprocessamento consiste em utilizar RS em fornos da indústria do cimento, seja como combustível alternativo ou como matéria-prima alternativa. É um processo complexo, que exige controle rigoroso da formulação química e equipamentos especializados (Prado *et al*, 2022). De forma geral, a produção envolve etapas como “extração e britagem de matérias-primas (calcário, argila, areia e outros minerais), preparação da farinha crua, tratamento de combustíveis alternativos, pré-aquecimento, pré-calcinação, produção de clínquer em forno rotativo, resfriamento, moagem e armazenamento” (ABCP, 2024, p. 8).

A etapa de produção do clínquer requer energia e emite GEE, o que torna essencial estratégias de mitigação como o coprocessamento, que utiliza resíduos como substitutos parciais de matérias-primas e combustíveis fósseis, contribui para a sustentabilidade ao integrar os princípios da economia circular. Ambientalmente, reduz o envio de resíduos para aterros, minimiza a poluição do solo, da água e do ar pela substituição de combustíveis fósseis tradicionais, como carvão e coque de petróleo. Essa prática também preserva recursos naturais

e reduz a pressão sobre ecossistemas, ao mesmo tempo em que evita a incineração de resíduos e promove sua valorização energética (Rocha, Lins, Santo, 2011).

No aspecto social, o coprocessamento auxilia na melhoria da saúde pública, sobretudo para comunidades próximas a áreas de descarte inadequado, e fomenta a conscientização sobre gestão responsável de resíduos. A cadeia de coleta, triagem e pré-processamento gera empregos diretos e indiretos, fortalecendo a economia local e incentivando práticas sustentáveis (Viczeck *et al.*, 2021).

Economicamente, reduz custos de aquisição de matérias-primas e combustíveis, bem como despesas com destinação de resíduos em aterros. Essa economia operacional pode resultar em maior competitividade de mercado e atrair investimentos voltados à inovação no setor. A prática ainda amplia oportunidades de negócios e consolida um ciclo produtivo mais eficiente e sustentável (Prado *et al.*, 2022).

O uso de resíduos no coprocessamento de cimento Portland tem vários benefícios, segundo CEMBUREAU, 2023:

Menor necessidade de pedreiras, não tem impactos negativos nas emissões do processo produtivo nem e na qualidade ambiental e técnica do produto final; não afeta a saúde e segurança dos trabalhadores; destruição completa dos compostos orgânicos; neutralização total dos gases ácidos, óxidos de enxofre e cloreto de hidrogênio; incorporação de vestígios de metais pesados na estrutura do clínquer com elos estáveis e nenhuma produção de subprodutos como cinzas ou resíduos líquidos de limpeza de gás. (CEMBUREAU, 2023).

Apesar dos benefícios, o coprocessamento apresenta desafios. A incorporação de resíduos na produção de clínquer requer avaliação criteriosa, devido aos riscos associados à emissão de poluentes e à presença de substâncias perigosas. Durante a combustão, resíduos sólidos podem liberar metais voláteis como mercúrio (Hg) e tálio (Tl), metais tóxicos como cádmio (Cd), chumbo (Pb), antimônio (Sb) e selênio (Se), além de não voláteis como arsênio (As), cromo (Cr), cobre (Cu) e níquel (Ni). Também podem ser formados compostos organoclorados persistentes, como dioxinas e furanos, prejudiciais à saúde ocupacional e ao meio ambiente (Viczeck *et al.*, 2021; ABCP, 2024).

4.4 Empresa que coprocessa os RS

A empresa objeto de estudo é brasileira e atua na área de soluções sustentáveis para a destinação final de resíduos sólidos. Suas atividades abrangem todas as etapas da gestão de

resíduos, incluindo gerenciamento, reaproveitamento, tratamento e destinação ambientalmente adequada, de acordo com as características de cada tipo de resíduo industrial. Entre os serviços oferecidos estão a logística de resíduos, a classificação, o armazenamento e a destinação final, além de soluções como a obtenção de créditos de logística reversa e o coprocessamento de resíduos.

Nesse contexto, os resíduos são preparados, misturados e processados para substituir matérias-primas ou combustíveis em processos industriais, como a produção de cimento. Esses resíduos são transportados para fornos industriais, onde passam a ser utilizados como combustíveis alternativos, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados aos processos produtivos.

A NBR 10004:2004 ABNT e a Resolução CONAMA nº 005/1993 estabelece a classificação dos resíduos sólidos em classes: Classe I (perigosos), Classe II (não inertes) e Classe III (inertes), definindo critérios para manejo, tratamento e destinação ambientalmente adequada. No contexto do coprocessamento na indústria cimenteira, essa classificação é fundamental para selecionar os resíduos que podem ser utilizados como substitutos parciais de combustíveis fósseis ou matérias-primas, garantindo que apenas resíduos com composição química compatível e poder calorífico adequado sejam incorporados aos fornos de clínquer, promovendo eficiência energética e redução de emissões de gases de efeito estufa (Brasil, 1993).

Quadro 2. Classificação de RS

Classe	Classificação	Definição
I	Perigosos	Apresentam risco à saúde humana e ao meio ambiente (ex. solventes, óleos usados e baterias)
II	Não inertes	Não se enquadram como perigosos, mas sofrem decomposição química ou biológica (ex. resíduos orgânicos, restos de construção)
III	Inertes	Não sofrem decomposição e não apresentam risco significativo (ex. areia, vidro, entulho, pneus)

Fonte: Elaborado pela autora, baseando-se na Resolução do CONAMA nº 005/1993.

No contexto do coprocessamento realizado pela empresa, apenas os resíduos compatíveis com a composição química do clínquer e com poder calorífico adequado podem ser utilizados. Geralmente, são provenientes das classes II (não inertes) e III (inertes). Os tipos de materiais recebidos são então classificados em quatro classes A, B, C e D, de acordo com a Resolução nº 005/1993 (Quadro 3).

Quadro 3. Classificação dos RS de acordo com a empresa

Classificação	Material
Classe A	Resíduos recicláveis, como entulhos e solos.
Classe B	Plásticos, papeis, metais e vidros.
Classe C	Aguardando tecnologia.
Classe D	Resíduos perigosos, como, tintas e solventes.

Fonte: Elaborado pela autora, baseando-se nas informações da empresa.

4.5 Etapas do Coprocessamento de RS pela Empresa

A empresa atua como unidade de preparação de RS para coprocessamento, transformando cargas industriais em combustíveis derivados ou matérias-primas alternativas para outros processos industriais, especialmente na produção de cimento. Durante a entrevista com a responsável técnica, foram discutidas as etapas do processo e, dessa forma, construiu-se um diagrama do fluxo operacional desde a coleta até o monitoramento final (Figura 2).

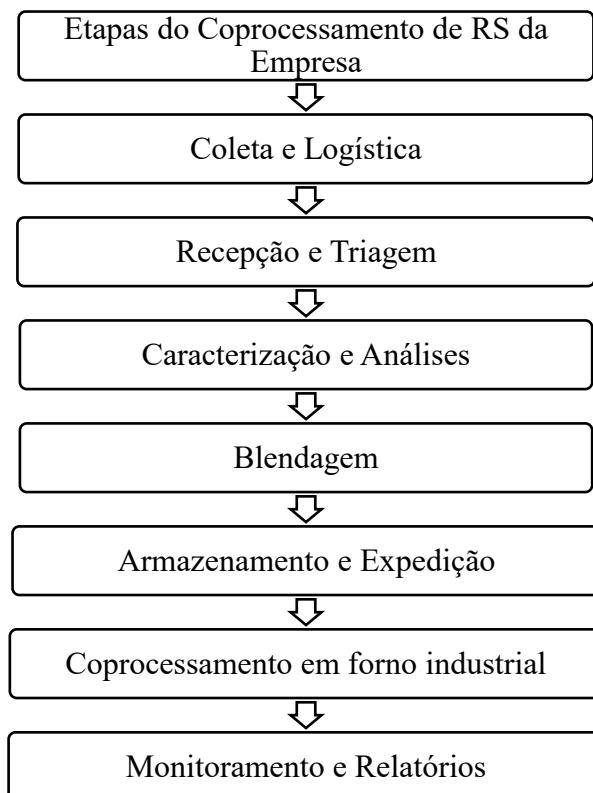


Figura 2. Etapas do coprocessamento de resíduos realizadas pela Empresa. Fonte: Criado pela autora.

A Figura 3 apresenta imagens representativas do processo. A empresa mantém frota autorizada e monitorada para receber cargas, assegurando rastreabilidade e cumprimento das normas de transporte de resíduos. O processo tem início com a coleta e logística (Figura 3A), etapa em que os resíduos são transportados até a unidade de preparo. Em seguida, ocorre a recepção e triagem, momento em que os materiais recebidos são identificados, classificados e avaliados quanto à sua adequação para o coprocessamento. Nessa etapa o material é analisado pela responsável técnica química, vendo seu grau de risco e periculosidade, feito isso posteriormente, o material se autorizado é recebido pela empresa e armazenado no galpão de resíduo de acordo com as normas de criteriosidade (Figura 3B).

O armazenamento é realizado conforme as informações apresentadas nos Quadros 2 e 3, de modo que cada tipo de resíduo é destinado ao local apropriado, garantindo sua adequada segregação e posterior homogeneização no processo de blindagem (Figura 3C). Nesse processo o material armazenado é separado no galpão de acordo com sua classe estabelecido de acordo com a NBR 10004:2004 ABNT e a Resolução CONAMA nº 005/1993. Para ser feito o processo de dosagem posterior, chamado de homogeneização (Figura 3D).

Após a etapa de armazenamento, inicia-se o processo de homogeneização dos materiais, no qual resíduos quimicamente compatíveis são combinados de forma controlada, visando à formação dos lotes finais. Essa etapa é fundamental para garantir a uniformidade da composição dos resíduos, bem como a segurança e a eficiência do processo subsequente (Figura 3E). Uma vez definidos, os lotes passam por homogeneização mecânica e, em seguida, são encaminhados para a etapa de trituração, na qual os materiais são reduzidos a granulometrias adequadas por meio de equipamentos específicos. Após a trituração, os resíduos são novamente organizados e armazenados em baias identificadas, assegurando a rastreabilidade, o controle operacional e a conformidade com os parâmetros estabelecidos para o processo de blendagem e coprocessamento (Figura 3F).

Após a formação e o armazenamento dos lotes homogeneizados e triturados, inicia-se a etapa de dosagem, que é realizada com base nas análises físico-químicas dos materiais. Nessa fase, os resíduos são cuidadosamente dosados e acondicionados em baias específicas, onde permanecem sob monitoramento contínuo, a fim de assegurar a manutenção da qualidade e a conformidade com os parâmetros estabelecidos. Concluídas as etapas de homogeneização, trituração e análise, o resíduo encontra-se apto a ser encaminhado para a queima nos fornos de clínquer. Até o momento da expedição, o material permanece armazenado em baia designada, sendo submetido a um rigoroso controle de qualidade por meio de análises periódicas,

garantindo a rastreabilidade, a segurança operacional e a eficiência do processo de coprocessamento.



A. Recebimento e coleta de resíduos sólidos



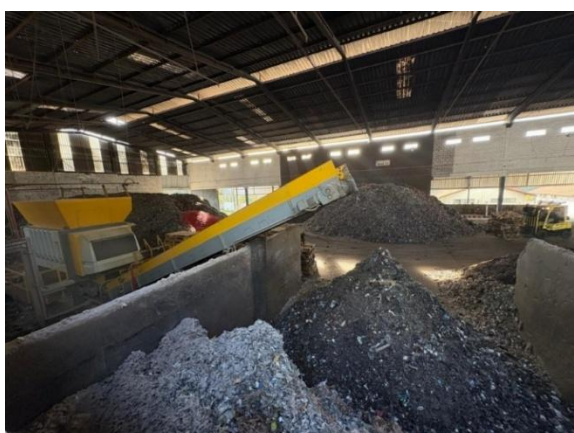
B. Armazenamento no galpão de RS



C. Separação dos RS de acordo com a classe



D. Homogeneização para trituração



E. Dosagem dos materiais por lote.



F. Armazenamento e expedição na baia 11.

Figura 3. Ilustrações do coprocessamento aplicado na *empresa*. Fonte: a autora, 2025.

4.6. Controle de qualidade dos resíduos sólidos

Na fase de caracterização e análises, realizam-se avaliações físico-químicas que determinam o potencial energético e a composição dos resíduos, garantindo sua compatibilidade com o processo industrial. As análises de controle de qualidade incluem a determinação do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), do teor de umidade do material, da quantidade de cloro e de cinzas, além da verificação dos resíduos de compostos orgânicos remanescentes no material. Essa etapa é fundamental para definir o destino adequado dos resíduos e verificar sua viabilidade para o coprocessamento ou a necessidade de tratamento prévio. Essa caracterização prévia é fundamental para garantir que os resíduos utilizados não comprometam a eficiência energética do processo nem gerem emissões indesejáveis, assegurando a conformidade com as diretrizes ambientais vigentes (Brasil, 2011; CEMBUREAU, 2023). Entretanto, os dados analíticos do controle não foram disponíveis pela empresa.

De acordo com dados da literatura, para que o resíduo seja um combustível de processo totalmente produtivo requer que “o forno seja operado em altas temperaturas, o que também é necessário e fundamental para a destruição de resíduos orgânicos perigosos. Para produzir clínquer, o material no interior do forno precisa alcançar temperaturas da ordem de 1.400 até 2.000°C (Ferrari, 2014).

Para que seja compatível com a temperatura dos fornos, é realizada análise de PCS e PCI para determinar a quantidade energética do resíduo. Esse tipo de análise é responsável por verificar se o resíduo é adequado para queima, se a capacidade calorífica dele é um bom substituto térmico. “Para que um resíduo seja utilizado como substituto de combustível para fins de reaproveitamento de energia, seu poder calorífico inferior, na base seca, deve ser superior a 2775 kcal/kg (5000 Btu/lb). Resíduos com poder calorífico inferior, na base seca, menor que 2775 kcal/kg devem ser estudados caso a caso” (CETESB, 2003).

A análise de umidade descreve o método para determinação do teor de água e substâncias voláteis de uma amostra de *blend* de resíduos sólidos e/ou matéria prima alternativa, mediante secagem em estufa (ABCP, 2023).

A análise de cinza, é a queima da matéria orgânica gerada durante a temperatura nos fornos, que são incorporados na produção do clínquer. “Um dos problemas com a combustão de resíduos perigosos em incineradores convencionais é a geração de cinzas. Visto que a cinza gerada pela queima dos resíduos é incorporada e inertizada na massa de clínquer produzido.

Todo resíduo coprocessado é destruído, a parcela orgânica é quebrada através da combustão e a parcela inorgânica é incorporada ao clínquer, sendo completamente inertizada (Ferrari, 2014).

A porcentagem de cloro do material é monitorada e analisada a partir da pastilha prensada, ou seja, com utilização do raio x verificamos no sistema se a quantidade de cloro é aceita ou se é reprovada com base em parâmetros da empresa. “A presença de cloro afeta diretamente o processo devido à sua volatilidade, causando problemas como entupimento e corrosão dos materiais na torre de ciclones, além de atuar como um catalisador, aumentando a volatilidade dos metais pesados e afetando a qualidade do clínquer” (Verdiani *et al.*, 2025).

4.7 Produtos coprocessados

Com base nos dados de caracterização, os resíduos são separados e distribuídos em lotes e encaminhados para a blendagem (baia), ou seja, combinados em lotes com composição homogênea, ajustados para atender às especificações técnicas exigidas pelo forno de cimento. Essa etapa visa otimizar o uso como combustível ou matéria-prima alternativa e assegurar a performance no processo industrial subsequente, que consiste na homogeneização do material para trituração (Brasil, ABCP, 2024).

A empresa mantém rastreabilidade completa dos resíduos, com registro de data, origem, lote e destinador, assegurando o controle e a conformidade em todas as etapas do processo, conforme as exigências da Resolução CONAMA nº 499/2020 (Brasil, 2020). Após a caracterização e aprovação para uso, os materiais são armazenados adequadamente até o momento da expedição às unidades industriais parceiras, geralmente, fábricas de cimento que utilizam os resíduos como parte de sua matriz energética ou como matéria-prima alternativa, de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 10004:2004, que classifica e orienta o manejo de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

Além disso, o monitoramento dos materiais do galpão de resíduos é feito a partir da Ficha de Dados de Segurança, todo material antes de adentrar na unidade é preciso verificação e autorização da responsável técnica. Analisar todos seus aspectos e grau de risco de acordo com o quadro 2 (p. 20). Sendo reprovado, ele deve retornar ao seu local de destino.

O coprocessamento em fornos industriais constitui o ponto central do processo, no qual os resíduos previamente preparados são empregados como substitutos parciais de combustíveis fósseis ou de insumos minerais na produção de clínquer. Essa prática contribui para a redução de GEE, o aproveitamento dos resíduos e a diminuição do consumo de recursos naturais,

estando alinhada às políticas de produção mais limpa e aos princípios da economia circular (Brasil, 2020; ABNT, 2004).

Por fim, a empresa realiza o monitoramento contínuo das operações e a elabora relatórios técnicos, garantindo o controle ambiental, a rastreabilidade dos resíduos e o cumprimento das normas técnicas e legais. Esse conjunto de procedimentos assegura um processo seguro, eficiente e ambientalmente responsável, consolidando o coprocessamento como uma solução sustentável para a destinação adequada de resíduos e o fortalecimento da sustentabilidade no setor cimenteiro.

4.8 Fator econômico

Visto que, os fornos de clínquer precisam de fatores energéticos de grande escala, combustíveis não renováveis atuam como fonte de energia aos fornos, como petróleo, carvão, moinha, entre outros. Mas os resíduos coprocessados garantem uma maior acessibilidade econômica e financeira a indústria. “Uma grande quantidade de resíduo gerada possui um significativo conteúdo energético. Essa fonte de energia potencial é uma das primeiras razões do interesse da indústria cimenteira pela queima dos resíduos” (Ferrari, 2010).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 de 12 de fevereiro de 1998, art. 9º determina que: Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. (Brasil, 2010).

Dessa forma, os resíduos coprocessados além de ser um fator positivamente ambiental é benéfico ao fator econômico das cimenteiras. “A substituição parcial desses combustíveis por alternativas provenientes dos resíduos pode, em determinados casos, reduzir significativamente os custos de produção” (Ferrari, 2010).

De acordo com a Lei nº 12.305/10 Art. 7º - Dentre os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, destacam-se: XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético.

4.9 Fator ambiental

Além de atuar como um substituto térmico legalmente reconhecido e ambientalmente benéfico, o coprocessamento se destaca por ser uma tecnologia limpa, capaz de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Trata-se de uma prática considerada sustentável, pois contribui diretamente para a diminuição do volume de resíduos destinados a aterros sanitários, locais que, muitas vezes, recebem materiais descartados sem a devida destinação final adequada.

Segundo o diagnóstico relatados no Panorama de Coprocessamento (ABCP, 2022) “o coprocessamento constitui alternativa vantajosa em relação à disposição em aterros, muitos deles já com elevado grau de esgotamento, ou à incineração, que gera outros resíduos”. Além de mitigar a sobrecarga dos aterros e evitar a geração de novos passivos ambientais, essa tecnologia permite reduzir de forma progressiva o uso de combustíveis fósseis na indústria cimenteira. A instituição destaca que “o coprocessamento constitui alternativa vantajosa com relação à disposição em aterros, com elevado grau de esgotamento, ou à incineração, que gera outros resíduos. Isto permitirá atingir um patamar de 55% de substituição ao combustível fóssil em 2050.

Assim, o coprocessamento não apenas promove a valorização energética de resíduos que seriam descartados inadequadamente, como também fortalece políticas de sustentabilidade, economia circular e redução de impactos ambientais no setor industrial.

5. CONCLUSÃO

O coprocessamento de resíduos realizado pela empresa evidenciou-se como uma estratégia eficiente e ambientalmente responsável para a gestão de resíduos industriais. Ao transformar RS em insumos energéticos ou matérias-primas para a produção de cimento, a empresa contribui para a redução de GEE e diminuição da disposição de resíduos em aterros.

O sistema adotado integra de forma articulada logística, caracterização, preparo e destinação final dos resíduos, formando uma cadeia produtiva alinhada aos princípios da economia circular. Essa abordagem não apenas otimiza o aproveitamento dos RS, mas também promove eficiência energética, reduz a emissão de poluentes e fortalece a sustentabilidade do setor industrial.

A utilização de coprocessamento gera vários benefícios sociais, ambientais e econômicos. Indústrias reduzem gastos com matéria-prima não renovável, o meio ambiente não é afetado pela geração de GEE durante sua combustão, além de contribuir por uma sociedade mais limpa, reduzindo resíduo que muitas vezes seriam descartados sem ter sua reutilização adequada. As blendeiras vêm se expandindo, e gerando rendimento lucrativo para sociedade, como a geração de empregos, e contribuição com o meio social.

Dessa maneira, o modelo de coprocessamento da empresa se mostra uma alternativa tecnológica viável e segura, capaz de conciliar desenvolvimento econômico com responsabilidade ambiental. Quando implementado de forma adequada, com preparação controlada dos resíduos, monitoramento ambiental e conformidade regulatória, o coprocessamento gera impactos positivos relevantes em níveis ambiental, econômico e social, contribuindo para um modelo produtivo mais limpo, inovador e sustentável. Ao mesmo tempo, ressalta-se que a prática exige atenção a desafios como a qualidade e fornecimento contínuo de resíduos, custos de adaptação tecnológica, controle rigoroso de emissões e estabilidade de mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Determinação de umidade pelo método de secagem em estufa.** Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/publicacoes/determinacao-de-umidade-pelo-metodo-de-secagem-em-estufa/>. Acesso em: 9 nov. 2025.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Panorama do coprocessamento. 2019.** Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Panoramaco_processamento_2019_bx.pdf. Acesso em: 9 nov. 2025.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Panorama do coprocessamento. 2022.** Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2023/05/Panorama_Coprocessamento_2022_Ano_Base_2021_v2.pdf. Acesso em: 9 nov. 2025.

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Panorama do Coprocessamento 2024** (Ano Base 2023). Disponível em: [https:// https://coprocessamento.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2024-ano-base-2023/](https://coprocessamento.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2024-ano-base-2023/). Acesso em: 14 de agosto de 2025.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004 Resíduos sólidos: classificação.** Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 30 out. 2025.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17.100 Gerenciamento de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/679183581/ABNT-NBR-17100-1-2023-Gerenciamento-de-Residuos>. Acesso em: 30 out. 2025.

ARAÚJO, Geraldo José Ferraresi de. O coprocessamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades.** v. 8, n. 57, p. 52-61, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 264, de 26 de agosto de 1999.** Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 de mar de 2000.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009.** Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=597&option=com_sisconama&task=arquivo.download&utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 out. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 499, de 6 de outubro de 2020.** Dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de produção de clínquer. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 de outubro de 2020.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>. Acesso em: 30 de outubro de 2025.

CEMBUREAU. The European Cement Association. **Guidelines for Coprocessing of Alternative Fuels and Raw Materials in Cement Production**. Brussels: CEMBUREAU, 2023. Disponível em: <https://cembureau.eu/media/dnbf4xzc/activity-report-2023-for-web.pdf>. Acesso em: 14 de agosto 2025.

ECOBLENDING. **Empresa Ambiental. Especialistas em Gestão de Resíduos**. 2024. Disponível em: <https://empresa.com.br>. Acesso em: 14 ago. 2025.

CETESB. **Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer**. Norma Técnica P4.263. Dez. 2003.

FERRARI, Ronaldo. **Coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer**. ITAMBÉ, 2014. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Coprocessamento-apostila-Itambe2014.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2025.

GCCA. Global Cement and Concrete Association. **Getting to Net Zero. 2023**. Disponível em: <https://gccassociation.org/concretetfuture/getting-to-net-zero/>. Acesso em: 14 ago. 2025.

OLIVEIRA, Josenaidy Mirelly da Mata. **Avaliação da utilização de resíduos no coprocessamento em fornos da indústria cimenteira: uma revisão da literatura**. 2021. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

OLIVEIRA, Adna Caroline Vale. SILVA, Aline de Souza. MOREIRA, Ícaro Thiago Andrade. **Economia circular: conceitos e contribuições na gestão de resíduos urbanos**. Revista de Desenvolvimento Econômico. Salvador, BA. P. 273 a 289. Dezembro, 2019.

PRADO, J. E. A.; FUJIWARA, F. L. A.; PINEDA, F. J. C.; SILVA, V. A. O. Análise das emissões de gases do efeito estufa pelo coprocessamento de resíduos sólidos em indústria cimenteira. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 18, n. 53, p. 154-166, 2022.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; SANTO, B. C. E. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, p. 1-10, 2011.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. *Visão da Indústria Brasileira do Cimento para Alcançar a Neutralidade de Carbono*. 2023. Disponível em: <https://snic.org.br/assets/pdf/neutralidade-carbono/apresentacao-roadmap-net-zero-V7-VIngles.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

VERDIANI, V. B.; YAMAJI, F. M.; LIMA, L.; BELINI, G. **Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 25, e140295, jan./dez. 2025.

VENANCIO, Raoni Junio Martins. **Análise de resíduos industriais utilizados na produção de blends para o coprocessamento: uma visão sob o ponto de vista energético**. UFMG, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/8e70bc7f-af64-4c67-903d-0a142c96daa4/content>. Acesso em: 9 nov. 2025.

VICZEK, S. A. LORBER, K. E. POMBERGER, R. SARC, R. Production of contaminant depleted solid recovered fuel from mixed commercial waste for co-processing in the cement industry. **Fuel**, v. 294, p. 120414, jun. 2021.

VOTORANTIM CIMENTOS. *Votorantim Cimentos Reduced Its Global CO₂ Emissions by 27.9% Between 1990 and 2024*. 2024. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com/news/votorantim-cimentos-reduced-its-global-co2-emissions-by-27-9-between-1990-and-2024/>. Acesso em: 14 ago. 2025.