



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ANTÔNIO VERIDIANO SOUSA SANTIAGO

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS E BIOMASSAS COMO COMBUSTÍVEL
ALTERNATIVO EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO CEARÁ**

MOSSORÓ

2025

ANTÔNIO VERIDIANO SOUSA SANTIAGO

COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS E BIOMASSAS COMO COMBUSTÍVEL
ALTERNATIVO EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO CEARÁ

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Ribeiro do
Carmo.

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S235c Santiago, Antonio Veridiano Sousa .
Coprocessoamento de resíduos e biomassas como
combustível alternativo em uma indústria
cimenteira no Ceará / Antonio Veridiano Sousa
Santiago. - 2025.
43 f. : il.

Orientador: Frederico Ribeiro do Carmo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Química, 2025.

1. Coprocessoamento. 2. Cimento. 3. Resíduos. 4.
Biomassa. 5. Impactos ambientais. I. Carmo,
Frederico Ribeiro do , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANTÔNIO VERIDIANO SOUSA SANTIAGO

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS E BIOMASSAS COMO COMBUSTÍVEL
ALTERNATIVO EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO CEARÁ**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em engenharia química.

Defendida em: 26/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Frederico Ribeiro do Carmo (UFERSA)

Presidente

Me. Antonio Diego da Silva Teixeira (Doutorando PPGMSA)

Membro Examinador

Prof. Me. Rafael Leandro Fernandes Melo (IFCE)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A realização desta monografia representa a concretização de um ciclo de aprendizado e crescimento, e, por isso, expressei minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para essa jornada.

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, força e perseverança para enfrentar os desafios ao longo deste caminho.

Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo suporte, motivação e carinho nos momentos mais difíceis. Em especial, à minha mãe, que fez tudo o possível para que eu conseguisse me manter na faculdade, e aos meus irmãos, pelo apoio incondicional. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

Ao meu orientador, Frederico Ribeiro, pela orientação precisa, paciência e incentivo, fornecendo insights valiosos que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a todos os professores do curso, que compartilharam conhecimento e despertaram meu interesse pela área, enriquecendo minha trajetória acadêmica.

Agradeço também ao Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP, gestão FINEP, mais especificamente ao PRH-55.1, pela bolsa de iniciação científica e todo o apoio fornecido durante a realização deste trabalho e para a construção da minha formação.

Aos amigos e colegas de curso, pelo companheirismo, pelas trocas de experiências e pelo apoio mútuo ao longo dessa caminhada. As discussões, risadas e desafios compartilhados tornaram essa jornada muito mais leve e enriquecedora. Em especial, agradeço a cinco pessoas incríveis que estiveram ao meu lado nessa trajetória desafiadora. Cassio Alves Pereira Sampaio, Izaac Adonai do Nascimento e Ana Clara Rocha Silva, amigos do curso, vocês foram fundamentais para que esse percurso fosse mais motivador e enriquecedor. Também deixo meu agradecimento a Deymisson de Sousa Santiago e Joana Lídia Vale de Brito, que, mesmo sendo de outro curso, tiveram um papel essencial no meu crescimento pessoal e acadêmico. Obrigado a todos pelo apoio inestimável.

Quero ainda expressar minha gratidão a três professores da UFERSA, que, talvez sem saber, tiveram um impacto imenso no meu aprendizado e formação.

Primeiro, novamente agradeço Prof. Frederico Ribeiro do Carmo: Além de orientador, foi um professor que sempre me disse o que eu precisava ouvir, mesmo quando as palavras não eram fáceis. Seu compromisso com o futuro e bem-estar dos alunos fez toda a diferença na minha trajetória.

Prof. Ricardo Henrique de Lima Leite: Apesar da postura aparentemente inflexível, sempre demonstrou um genuíno cuidado com os alunos, sendo o primeiro professor a me mostrar a beleza da Engenharia Química.

Profa. Jusciane da Costa e Silva: Faz tanto tempo que talvez nem lembre de mim, mas foi a primeira a acreditar no meu potencial dentro da UFERSA, algo que fez toda a diferença na minha jornada acadêmica.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, deixo aqui meu mais sincero agradecimento.

Muito obrigado!

RESUMO

O coprocessamento de resíduos sólidos urbanos e biomassas na indústria cimenteira configura-se como uma das principais estratégias de descarbonização do processo de produção de cimento, ao reduzir a utilização de combustíveis fósseis. Este estudo apresenta dados coletados em uma cimenteira localizada no estado do Ceará, destacando os principais desafios operacionais, como o controle de qualidade dos resíduos, a necessidade de investimentos em infraestrutura e os efeitos ambientais associados à prática. Foram coletadas cinco amostras de cada tipo de material, submetidas a análises de poder calorífico inferior (PCI) e teor de umidade. Os resultados indicaram que, entre os resíduos utilizados, a borra oleosa (5.309 a 6.546 kcal/kg), apesar dos elevados teores de umidade, e a casca de castanha de caju (4.054 a 4.544 kcal/kg) apresentam-se como alternativas viáveis à substituição do coque de petróleo (7.750 kcal/kg). Além disso, os resíduos sólidos urbanos (RSU) tem ganhado valorização, mesmo com PCI relativamente inferior, devido à sua ampla disponibilidade e baixo custo, consolidando-se como uma opção relevante frente aos combustíveis convencionais. A cimenteira demonstra elevado potencial de expansão no uso do coprocessamento, o qual se revela uma alternativa técnica e ambientalmente vantajosa, contribuindo para a redução de custos no processo de fabricação do cimento.

Palavras-chave: coprocessamento; resíduos sólidos urbanos; indústria cimenteira; biomassa; descarbonização.

ABSTRACT

Co-processing municipal solid waste and biomass in the cement industry is one of the main strategies for decarbonizing cement production, as it reduces the use of fossil fuels. This study presents data collected from a cement plant in Ceará, Brazil, highlighting key operational challenges, such as waste quality control, the need for infrastructure investment, and the environmental impacts associated with this practice. Five samples of each material type were collected and analyzed for lower heating value (LHV) and moisture content. The results indicated that among the residues used, oily sludge (5,309 to 6,546 kcal/kg), despite its high moisture content, and cashew nutshell (4,054 to 4,544 kcal/kg) are viable alternatives to petroleum coke (7,750 kcal/kg). Additionally, refuse-derived fuel (RDF) has gained value, even with a relatively low LHV, due to its wide availability and low cost, making it a relevant option compared to conventional fuels. The cement plant demonstrates strong potential for expanding co-processing, a technically and environmentally advantageous alternative contributing to cost reduction in cement manufacturing.

Keywords: co-processing; municipal solid waste; cement industry; biomass; decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Britador.....	17
Figura 2 – Pilha tipo Chevron (a) e esquema do pátio homogeneizador.	18
Figura 3 – Moinho vertical (a) e moinho de bolas (b).	19
Figura 4 – Silo de homogeneização da farinha e torre de ciclones.	21
Figura 5 – Emissões de dióxido de carbono equivalente, dos processos industriais no Brasil.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poder calorífico inferior (PCI) dos principais combustíveis utilizados em coprocessamento nas cimenteiras.	26
Tabela 2 – Substituição térmica de 2014 a 2023.	29
Tabela 3 – PCI (kcal/kg) e umidade dos combustíveis alternativos avaliados.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira De Cimento Portland
ABREMA	Associação Brasileira De Resíduos e Meio Ambiente
Al_2O_3	Alumina
CaCO_3	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
C_3S	Silicato tricálcio
CO_2	Dióxido de carbono
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Fe_2O_3	Óxido de ferro
GCCA	Global Cement and Concrete Association
GEE	Gases de efeito estufa
IEA	International Energy Agency
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SiO_2	Sílica
C_2S	Bicálcico
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
SUMÁRIO	XI
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 HISTÓRICO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	16
3.2 PROCESSOS PRODUTIVOS DO CIMENTO.....	17
3.2.1 <i>Mineração e britagem</i>	17
3.2.2 <i>Moagem de farinha</i>	18
3.2.3 <i>Clinquerização</i>	20
3.2.4 <i>Moagem de cimento</i>	21
3.3 A INDÚSTRIA CIMENTEIRA NA TRANSIÇÃO PARA UM MODELO DE BAIXO CARBONO	22
3.4 COPROCESSAMENTO: CONCEITOS E APLICAÇÕES	24
3.4.1 <i>Definição de Coprocessamento</i>	24
3.4.2 <i>Tipos de resíduos utilizados</i>	26
3.5 OPERAÇÃO DO COPROCESSAMENTO NA CIMENTEIRA	30
3.5.1 <i>Fluxo de resíduos no processo produtivo</i>	30
3.5.2 <i>Controle de qualidade dos resíduos</i>	31
4 METODOLOGIA.....	33
4.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS	33
4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE	33
4.3 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 COPROCESSAMENTO NA CIMENTEIRA	35
5.2 PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS COPROCESSADOS.....	36

6	CONCLUSÕES FINAIS	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se intensificado a busca por estratégias que visem mitigar os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas. Nesse contexto, a geração de resíduos – especialmente os provenientes da produção industrial e das áreas urbanas – tornou-se um dos principais desafios ambientais da atualidade, exigindo soluções inovadoras e sustentáveis para minimizar seus efeitos. Essa preocupação resultou, em 2010, na criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, a qual previa, entre outras medidas, a erradicação dos lixões. Contudo, tal meta ainda não foi plenamente alcançada. (Torres, 2022)

De acordo com estimativas da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), aproximadamente 35% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ainda possuem destinação final inadequada, o que representa mais de 28 milhões de toneladas descartadas sem os devidos cuidados (ABREMA, 2023). Além disso, conforme o Panorama do Coprocessamento de 2023, publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), cerca de 2.800 municípios brasileiros ainda destinam seus resíduos a locais impróprios, gerando problemas ambientais e de saúde pública nas áreas afetadas (ABCP, 2023).

O crescimento populacional e o constante avanço industrial impõem a necessidade de soluções eficazes para o gerenciamento de resíduos e a mitigação de passivos ambientais. Nesse cenário, a indústria cimenteira se destaca por meio da adoção do coprocessamento, técnica que permite a substituição parcial de combustíveis fósseis por Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o que contribui para a redução dos impactos ambientais (ABCP, 2023). Outro fator crítico associado à indústria cimenteira é sua expressiva contribuição às emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). Estima-se que o setor seja responsável por cerca de 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), principalmente em função da calcinação do calcário e do uso intensivo de combustíveis fósseis nos fornos de clínquer. Além disso, a produção de cimento também demanda grandes quantidades de energia e recursos naturais, como calcário e argila (Zhang et al., 2018).

O coprocessamento consiste na utilização de biomassas, resíduos industriais e urbanos como combustíveis alternativos aos convencionais ou como substitutos de matérias-primas na fabricação do cimento (ABCP, 2023). Em vez de serem destinados a aterros sanitários ou incinerados, esses resíduos são processados nos fornos de clínquer, fornecendo energia térmica ou atuando como matéria-prima, reduzindo a demanda por combustíveis fósseis, como o coque de petróleo, e por materiais virgens (Schneider, 2011).

Nos últimos anos, a utilização de resíduos como combustível alternativo tem crescido significativamente no setor cimenteiro. Desde 2020, a taxa de substituição térmica no Brasil supera 25%, o que significa que um quarto da energia consumida na produção de cimento já provém de fontes alternativas. Esse aumento reflete uma tendência de valorização do potencial energético do RSU, que, de outra forma, seria descartado inadequadamente. (ABCP, 2024)

O coprocessamento representa, portanto, uma estratégia capaz de reduzir consideravelmente as emissões de CO₂, ao mesmo tempo em que diminui o volume de resíduos descartados de forma inadequada, reduz a necessidade de aterros sanitários e promove o aproveitamento energético dos materiais descartados. Além disso, essa prática contribui para o desenvolvimento de uma economia circular, mitigando os impactos ambientais associados à indústria do cimento.

Diante desse panorama, este trabalho propõe-se a analisar o processo de coprocessamento na produção de cimento em uma indústria localizada no Ceará, com foco na substituição de combustíveis fósseis por resíduos sólidos e suas implicações para a sustentabilidade e a eficiência energética da indústria. Serão discutidos os principais desafios operacionais enfrentados pelas cimenteiras, como o controle de qualidade dos resíduos, e os impactos dessas limitações sobre a expansão do coprocessamento. Também será abordada a importância do poder calorífico dos materiais utilizados, fator determinante para a estabilidade do processo de queima, bem como estratégias para contornar as limitações energéticas de resíduos com baixo valor calorífico, como o cavaco de cajueiro e o RSU.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade do uso de resíduos e biomassas como combustíveis alternativos no coprocessamento em uma indústria cimenteira localizada no estado do Ceará, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os tipos de resíduos e biomassas utilizados no processo de coprocessamento, identificando suas características, origens e compatibilidade com os requisitos da indústria cimenteira.
- Avaliar os impactos ambientais associados à utilização dos resíduos e biomassas no coprocessamento, considerando aspectos como emissões atmosféricas, consumo de recursos naturais e geração de efluentes.
- Identificar os principais desafios e oportunidades no processo de coprocessamento, levando em conta a viabilidade técnica e econômica, bem como as barreiras regulatórias e as possíveis vantagens competitivas para a indústria cimenteira no Ceará.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Histórico da indústria cimenteira

O cimento possui origens milenares, com registros de sua utilização nas antigas civilizações egípcia e romana. No Egito, há cerca de 4.500 anos, era comum o uso de uma mistura à base de gesso calcinado na construção de estruturas monumentais. Já em Roma, o cimento utilizado em obras grandiosas, como o Panteão e o Coliseu, continha solo vulcânico proveniente da região de Pozzuoli, na Itália, o que conferia ao material a capacidade de endurecer mesmo em contato com a água (Battagin, 2019).

A fórmula exata do cimento foi perdida com o passar dos séculos, até que, no século XVIII, o engenheiro britânico John Smeaton realizou avanços significativos ao desenvolver um tipo de cimento resistente à água do mar, utilizando cinzas vulcânicas. Esse material foi empregado na reconstrução do Farol de Eddystone. Em 1824, Joseph Aspdin aperfeiçoou o processo e patenteou o que denominou cimento Portland, nome inspirado na semelhança da coloração do material com as pedras da Ilha de Portland. Esse composto consolidou-se como a base do cimento moderno, reconhecido por sua durabilidade e resistência, e sua invenção promoveu transformações profundas na engenharia civil, possibilitando construções mais robustas e arrojadas (Medeiros e Torres, 2019).

No Brasil, o desenvolvimento da indústria cimenteira teve início de forma tímida no final do século XIX, com iniciativas como a de Antônio Proost Rodovalho, em Sorocaba (SP), e a da fábrica de Tiriri, na Paraíba. No entanto, essas experiências foram limitadas pela baixa competitividade, pela distância dos principais centros consumidores e pela escassez de matéria-prima. Um marco importante para o setor foi a fundação da Companhia Brasileira de Cimento Portland, na década de 1920, com a inauguração da fábrica de Perus, em São Paulo. Esse evento representou a consolidação da produção nacional de cimento e a redução da dependência de importações, estabelecendo as bases para o desenvolvimento da indústria cimenteira no país (Santos, 2011).

3.2 Processos produtivos do cimento

3.2.1 Mineração e britagem

A extração de calcário para a produção de cimento tem início com a mineração em cavas a céu aberto, nas quais se utilizam explosivos para o desmonte do material rochoso. Os blocos extraídos, que apresentam variações em tamanho e composição devido à heterogeneidade natural da jazida, são então transportados para a unidade fabril, onde passam pelo processo de britagem. Nessa etapa, o calcário é fragmentado em partículas menores, preparando-o para a etapa de pré-homogeneização e, posteriormente, para a moagem destinada à obtenção da farinha crua. Esses procedimentos são fundamentais para aumentar a área de contato entre as partículas e otimizar as reações químicas no forno, essenciais à formação do clínquer. (Paula, 2009)

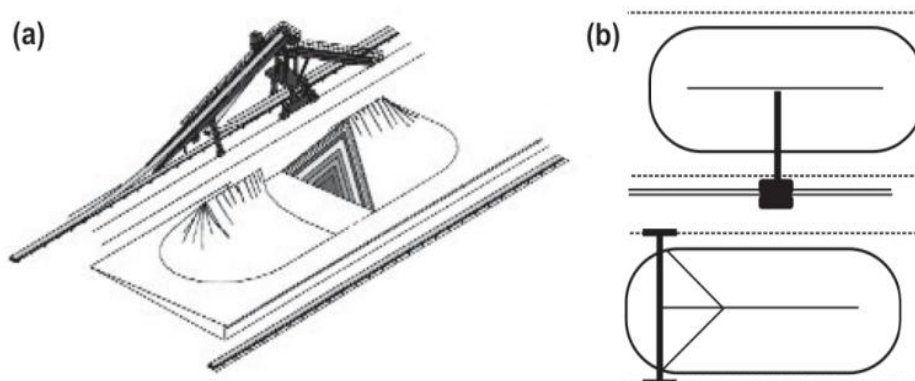
Figura 1 – Britador.



Fonte: Ribeiro (2023).

Após a britagem, o material é armazenado em pilhas formadas por camadas com composições ligeiramente distintas, reflexo da variabilidade natural do minério. Essa técnica de empilhamento é essencial para o processo de pré-homogeneização, cujo objetivo é reduzir as flutuações na composição química do material. A criação de pilhas estratificadas favorece uma mistura mais eficiente durante a extração, garantindo uma composição mais uniforme da farinha crua e, conseqüentemente, do clínquer – elemento-chave para a qualidade do cimento. (Mochizuki, 2017)

Figura 2 – Pilha tipo Chevron (a) e esquema do pátio homogeneizador.



Fonte: Marques *et al.* (2010).

Assim, a mineração e a britagem do calcário não apenas preparam a matéria-prima para as etapas subsequentes, como também exercem papel crucial na uniformidade e na qualidade do produto final.

3.2.2 Moagem de farinha

A produção da farinha crua pode ser realizada por quatro processos principais: via seca, via úmida, via semiseca e via semiúmida. No processo por via úmida, a matéria-prima é moída juntamente com água, formando uma pasta que é aquecida no forno. No entanto, esse método apresenta elevado consumo de energia, uma vez que exige a evaporação completa da água antes da calcinação. No processo semiúmido, a pasta é parcialmente seca antes de ser introduzida no forno, reduzindo moderadamente o consumo energético. Já o processo semisseco utiliza menor quantidade de água (cerca de 10% a 15%) e também inclui uma etapa de secagem prévia à queima, sendo mais eficiente que os métodos anteriores. (Belato, 2013)

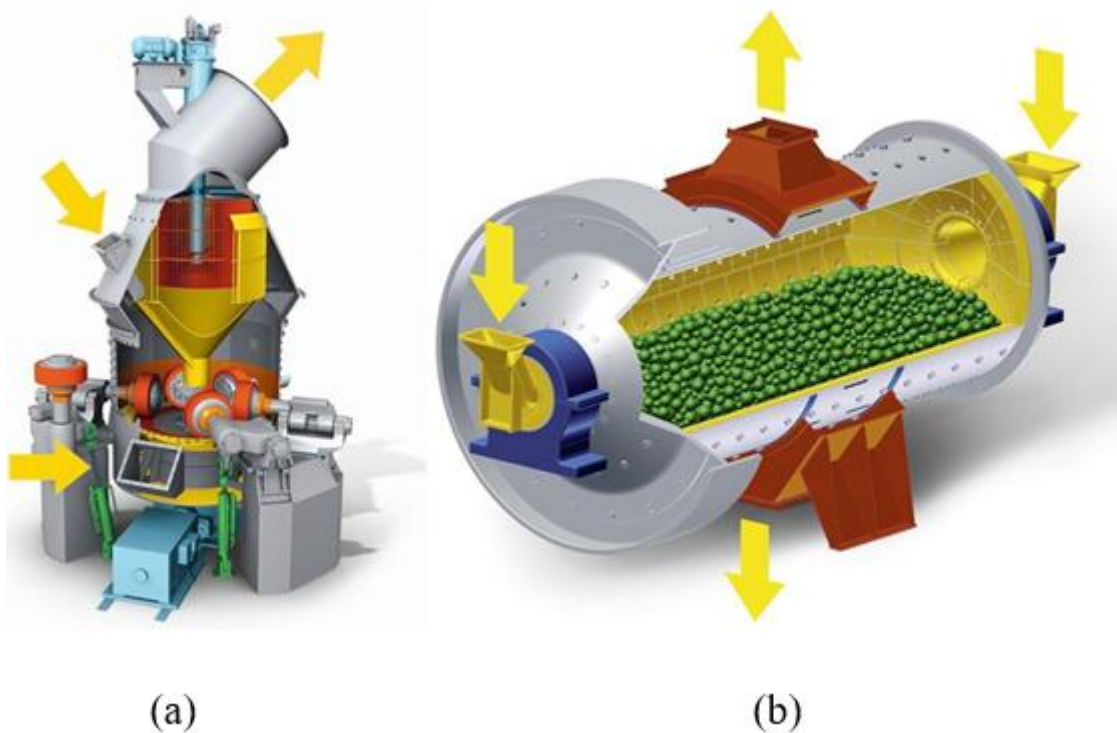
O processo por via seca, atualmente utilizado por quase a totalidade das fábricas de cimento no mundo, destaca-se por sua maior eficiência energética e econômica. Nesse método, a mistura de matérias-primas é moída com o auxílio de gases quentes e, eventualmente, pequenas quantidades de água, resultando em um pó seco que é posteriormente alimentado no forno. Embora demande equipamentos mais complexos – como sistemas avançados de filtragem – esse processo apresenta menor consumo de energia e menor emissão de poluentes, consolidando-se como o mais adotado pela indústria cimenteira moderna. (Belato, 2013)

O objetivo da moagem das matérias-primas é a redução do tamanho das partículas, de modo a facilitar as reações químicas necessárias à formação do clínquer. Esse processo ocorre em moinhos operando de forma contínua, que recebem o material bruto e possuem sistemas de separação para as partículas mais finas, conhecidas como “farinha crua”.

Para ajustar a composição química da farinha e assegurar a qualidade do clínquer, adicionam-se ao calcário outros materiais corretivos ricos em ferro, alumínio e sílica – como argila e escória de siderurgia. Esses aditivos são incorporados desde a formação das pilhas após a britagem, e durante a etapa de moagem. (Lima, 2011)

Tradicionalmente, segundo Belato (2013), a moagem da farinha é realizada em moinhos de bolas, cilindros rotativos equipados com esferas metálicas que fragmentam o material por impacto e atrito. No entanto, em unidades industriais mais modernas, tem-se adotado os moinhos verticais, que utilizam uma mesa giratória e rolos para realizar a moagem. Este é o caso da cimenteira analisada neste estudo. Os moinhos verticais oferecem vantagens como maior economia de energia e menor ocupação de espaço físico, embora exijam sistemas de operação mais sofisticados.

Figura 3 – Moinho vertical (a) e moinho de bolas (b).



Fonte: GEBR (2023).

3.2.3 Clinquerização

Após a moagem da farinha crua, o material é armazenado em um silo de homogeneização, com o objetivo de estabilizar a mistura e minimizar variações na composição química. Esse procedimento é fundamental para garantir a uniformidade da matéria-prima que será utilizada na produção do clínquer, assegurando a qualidade do cimento final. (Silva Neto, 2018)

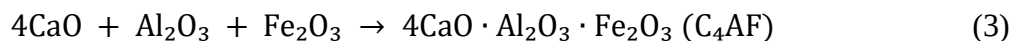
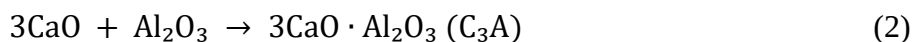
O processo de clinquerização tem início com o pré-aquecimento da farinha em uma torre de ciclones, onde ela é gradualmente aquecida pelos gases quentes provenientes do forno rotativo. Essa etapa permite a recuperação de calor do forno, otimizando o consumo energético e promovendo o início da pré-calцинаção – processo em que parte do dióxido de carbono (CO_2) presente no carbonato de cálcio (CaCO_3) é liberada, convertendo-o em óxido de cálcio (CaO). (Andrade, 2023)

Com a farinha parcialmente calcinada, o material segue para o calcinador, onde a descarbonatação é concluída a temperaturas superiores a $800\text{ }^\circ\text{C}$, resultando na liberação de CO_2 . Essa etapa é responsável por aproximadamente 60% da energia total requerida para a produção de clínquer. (Silva Neto, 2018)

Segundo Duda (1985), a clinquerização é um processo termoquímico complexo, realizado em forno rotativo, onde o material atinge temperaturas em torno de $1.450\text{ }^\circ\text{C}$. Nessa fase, ocorrem reações químicas fundamentais que transformam as matérias-primas em compostos responsáveis pelas propriedades hidráulicas do cimento. Um dos principais eventos é a calcinação do calcário, conforme descrito pela reação:



A altas temperaturas, o CaO formado reage com os óxidos de silício, alumínio e ferro presentes nos materiais argilosos, originando os principais compostos do clínquer, como:



Além desses, destacam-se os silicatos de cálcio: o silicato tricálcico (C_3S ou alita) e o silicato bicálcico (C_2S ou belita), formados a partir da reação entre CaO e SiO_2 . Esses

compostos são determinantes para a resistência mecânica e o desempenho do cimento ao longo do tempo.

O desempenho do forno rotativo é crucial, pois é nessa etapa que se define tanto a qualidade do clínquer quanto a eficiência do processo produtivo como um todo (Souza, 2009).

Após a clinquerização, o clínquer formado é resfriado rapidamente, a fim de evitar a decomposição dos compostos formados e preservar suas propriedades. O resfriamento rápido também favorece a resistência mecânica e melhora a moabilidade do cimento. O ar utilizado nesse processo é reaproveitado no sistema térmico do forno e do calcinador, contribuindo para a eficiência energética da planta. (Silva Neto, 2018)

Figura 4 – Silo de homogeneização da farinha e torre de ciclones.



Fonte: Silva Neto (2018).

3.2.4 Moagem de cimento

A moagem do cimento constitui a etapa final do processo de fabricação e desempenha um papel decisivo na definição das propriedades do produto acabado. O tipo de cimento produzido está diretamente relacionado à combinação e ao tipo de aditivos incorporados ao clínquer. Nessa fase, o clínquer resfriado é moído em conjunto com materiais como gesso, calcário, escória granulada de alto-forno e pozolana, utilizando-se moinhos de bolas ou moinhos verticais de rolos. Cada aditivo, armazenado separadamente em silos, é dosado de maneira precisa, de acordo com a formulação desejada. O gesso é um componente essencial, pois atua

no controle do tempo de pega. Os demais aditivos são ajustados conforme os requisitos específicos da produção de diferentes tipos de cimento Portland. (Apolinário, 2023)

Durante a moagem, o controle de qualidade é rigoroso e contínuo, com a realização de análises periódicas para monitoramento de parâmetros fundamentais, como: granulometria, índice de Blaine, teor de SO_3 , perda ao fogo, tempo de pega e resistência à compressão. Apenas após o cumprimento dos padrões estabelecidos, o cimento é encaminhado para os silos de estocagem, de onde segue para o ensacamento ou para o carregamento a granel. (Souza, 2009)

3.3 A Indústria cimenteira na transição para um modelo de baixo carbono

Embora o processo produtivo do cimento esteja consolidado e amplamente difundido, ele impõe sérios desafios ambientais, principalmente no que se refere às emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a indústria cimenteira tem buscado alternativas para tornar-se mais sustentável e alinhada às metas globais de descarbonização.

A indústria do cimento é fundamental para o setor da construção civil, mas enfrenta desafios ambientais significativos. Entre os principais impactos, destacam-se as elevadas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e o alto consumo de recursos naturais, como calcário e argila. (IEA, 2018)

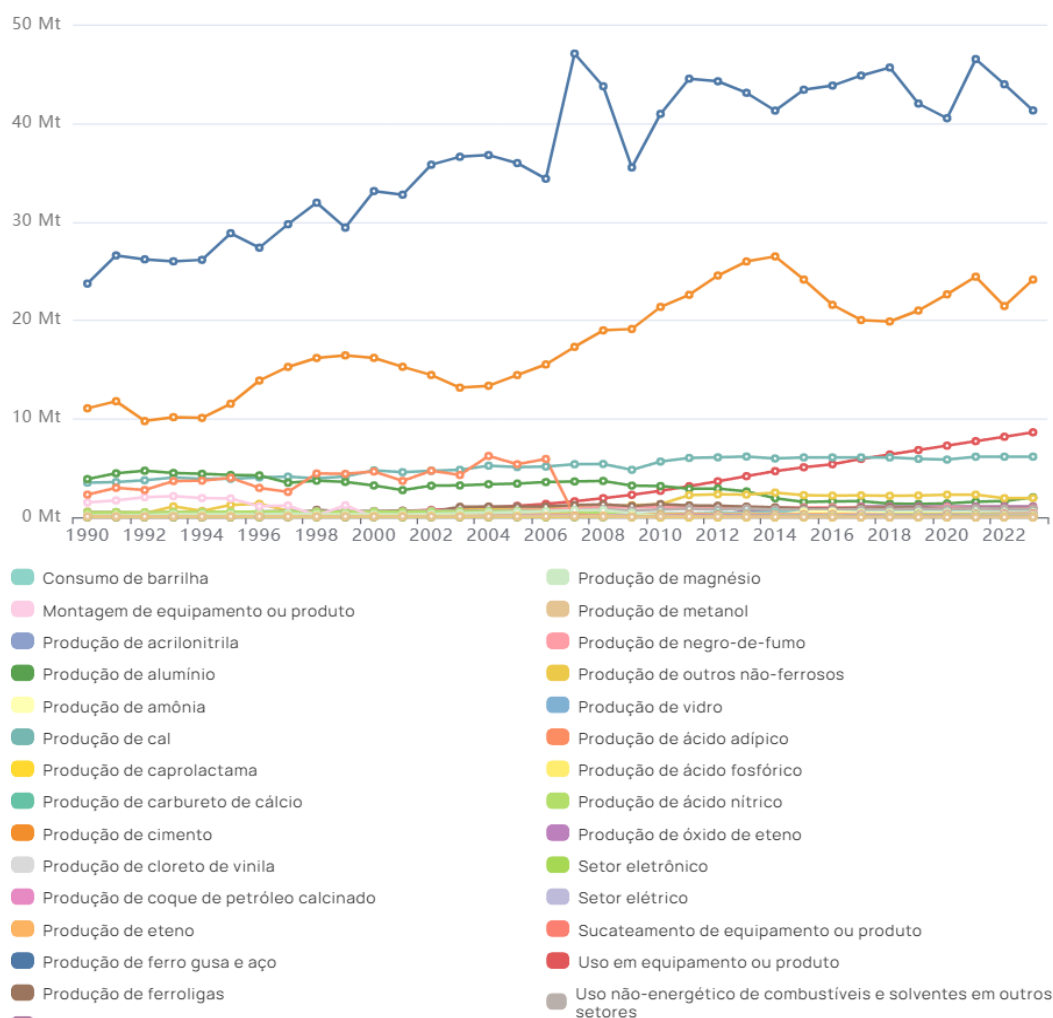
No Brasil, dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) indicam que, em 2023, a produção de cimento foi responsável pela emissão de 24,139 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Esse volume representa mais de um quarto das emissões do setor industrial brasileiro, tornando a indústria cimenteira a segunda maior fonte de emissões industriais do país, atrás apenas da produção de ferro-gusa e aço, conforme ilustrado na Figura 5. (Observatório do Clima, 2024)

Globalmente, estima-se que cerca de 7% das emissões totais de CO_2 sejam atribuídas à produção de cimento, o que coloca o setor entre os maiores emissores de gases de efeito estufa no mundo. Essa condição o torna um dos principais alvos das políticas internacionais de mitigação das mudanças climáticas e promoção do desenvolvimento sustentável (Zhang *et al.*, 2023). Aproximadamente 66% dessas emissões provêm do processo de descarbonatação do calcário durante a produção de clínquer, enquanto os 33% restantes resultam da queima de combustíveis fósseis nos fornos (APODI, 2024). Esses números evidenciam a urgência na adoção de estratégias voltadas à redução da pegada de carbono da indústria cimenteira.

Nesse contexto, a busca por sustentabilidade no setor tem se intensificado. Em 2021, a *Global Cement and Concrete Association* (GCCA), juntamente com 40 das maiores empresas

globais de cimento e concreto, estabeleceu o compromisso de alcançar emissões líquidas zero até 2050. O plano inclui metas intermediárias, como a redução de 25% das emissões até 2030, o que corresponde à emissão de menos de 2 gigatoneladas de CO₂ naquele ano. Para atingir esse objetivo, as empresas estão investindo em tecnologias e práticas sustentáveis, entre as quais se destaca a meta de substituição de 55% dos combustíveis fósseis por fontes alternativas até 2050. (GCCA, 2023)

Figura 5 – Emissões de dióxido de carbono equivalente dos processos industriais no Brasil.



Fonte: Observatório do Clima (2024).

Uma das principais estratégias adotadas nesse esforço é o coprocessamento, que consiste na utilização de resíduos como combustíveis alternativos e substitutos parciais de matérias-primas na produção de cimento. Essa prática contribui diretamente para a redução do consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, das emissões de CO₂. Além de seu papel na mitigação das emissões, o coprocessamento também oferece uma solução

ambientalmente adequada para o gerenciamento de resíduos, evitando sua disposição em aterros e colaborando para a conservação de recursos naturais (ABCP, 2024).

Tais iniciativas são fundamentais para a transição do setor cimenteiro rumo a um modelo de baixo carbono, conectando os desafios ambientais globais à implementação de soluções sustentáveis. Com o compromisso internacional de redução das emissões e a adoção de práticas inovadoras, a indústria do cimento tem o potencial não apenas de minimizar seus impactos ambientais, mas também de contribuir significativamente para o cumprimento das metas climáticas globais (ABCP, 2024).

3.4 Coprocessamento: conceitos e aplicações

3.4.1 Definição de coprocessamento

O coprocessamento é uma prática integrada à produção de cimento que consiste na substituição parcial de matérias-primas e combustíveis fósseis por resíduos com valor energético ou mineral. Essa substituição ocorre durante a etapa de produção do clínquer, na qual a matéria-prima é submetida a altas temperaturas nos fornos da cimenteira. O uso de resíduos como combustíveis alternativos ou matérias-primas auxiliares possibilita a destruição segura de substâncias indesejáveis, em função das condições extremas de temperatura, tempo de residência e atmosfera oxidante e alcalina presentes no forno. (Cruz, 2023)

A queima de resíduos demanda atenção especial ao controle de emissões, uma vez que pode liberar poluentes e partículas potencialmente nocivas à saúde humana e ao meio ambiente. O coprocessamento, no entanto, se apresenta como uma alternativa viável, pois se beneficia das tecnologias de filtragem já presentes na estrutura dos fornos de cimento. Essa infraestrutura permite a integração eficiente de resíduos com custos adicionais reduzidos, assegurando o controle das emissões atmosféricas. Dessa forma, o coprocessamento otimiza o uso de recursos, promovendo uma queima segura e ambientalmente adequada. (Rocha, Lins e Espírito Santo, 2011)

O conceito de coprocessamento está diretamente alinhado aos princípios da economia circular, que busca maximizar a utilização de recursos, promover a reciclagem e reduzir a geração de resíduos. No contexto da indústria cimenteira, essa prática valoriza energeticamente os resíduos e reduz a dependência de combustíveis fósseis, como o coque de petróleo. Além disso, a substituição de matérias-primas virgens por resíduos com características minerais

similares contribui para a diminuição dos impactos ambientais relacionados à extração de recursos naturais. (ABCP, 2024)

Diversos resíduos podem ser utilizados como combustíveis alternativos, incluindo pneus inservíveis, resíduos plásticos, lodos de tratamento de efluentes, entre outros. Essa abordagem não apenas contribui para a gestão sustentável desses materiais, como também representa uma oportunidade de redução de custos operacionais para a indústria cimenteira, diminuindo os gastos com combustíveis fósseis e matérias-primas, além de evitar os custos associados à disposição final dos resíduos. (ABCP, 2023)

Outro benefício importante do coprocessamento é sua eficácia na destruição térmica de resíduos perigosos. O ambiente dos fornos de clínquer é capaz de eliminar compostos orgânicos voláteis e outros poluentes sem a geração de subprodutos tóxicos, como cinzas perigosas. Resíduos que não são completamente queimados tendem a ser incorporados à estrutura cristalina do clínquer, de forma estável e segura, evitando sua liberação no meio ambiente. (Torres e Lange, 2022)

Em termos regulatórios, o coprocessamento é disciplinado por uma série de normas e diretrizes que asseguram a sua prática segura e ambientalmente responsável. Destaca-se a Resolução CONAMA nº 499/2020, que estabelece os critérios para o licenciamento ambiental do coprocessamento em fornos de cimento, promovendo a redução de resíduos destinados a aterros sanitários. Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Decreto nº 11.043/2022), a Resolução CONAMA nº 416/2009 (que trata especificamente do coprocessamento de pneus inservíveis) e o Decreto nº 10.936/2022 (que regulamenta a logística reversa), reforçam a importância da valorização de resíduos e a transição para a economia circular. (ABCP, 2024)

As cimenteiras devem seguir normas ambientais rigorosas, que incluem o controle das emissões atmosféricas, o monitoramento contínuo das condições de queima e a avaliação da qualidade do produto final. Essas exigências visam assegurar que o processo não cause impactos negativos à saúde pública ou ao meio ambiente. (Oliveira, 2021)

Portanto, o coprocessamento representa não apenas uma alternativa eficiente para o gerenciamento de resíduos, mas também uma prática estratégica para a indústria cimenteira. Ele promove a sustentabilidade ambiental, reduz custos operacionais e contribui para o cumprimento das exigências legais, ao oferecer uma destinação adequada e segura aos resíduos industriais e urbanos.

3.4.2 Tipos de resíduos utilizados

O coprocessamento na indústria cimenteira envolve a utilização de diversos tipos de resíduos e biomassas, incorporados ao processo produtivo do cimento como substitutos parciais de combustíveis fósseis e matérias-primas convencionais. Cada resíduo apresenta características específicas que o tornam adequado para essa aplicação, seja por seu valor energético, seja pelo potencial de substituição de componentes minerais. (Venâncio, 2022)

Entre os resíduos utilizados como combustíveis alternativos, destacam-se solventes, resíduos oleosos, têxteis, pneus inservíveis e lodos de tratamento industrial. Esses materiais, geralmente ricos em carbono, apresentam elevado poder calorífico e podem substituir com eficiência combustíveis fósseis tradicionais, como o coque de petróleo. Além de fornecerem energia aos fornos, esses resíduos permitem a destruição segura de substâncias inutilizáveis – como resíduos de borracha, óleos contaminados e medicamentos vencidos – que exigem destinação ambientalmente adequada. (ABCP, 2023)

Outros resíduos com aplicação energética incluem graxas, lamas de processos químicos e resíduos de borracha. Resíduos plásticos, serragem, papel e outros materiais de origem renovável também são valorizados por seu conteúdo energético, promovendo práticas mais sustentáveis no setor. Resíduos orgânicos, como lama de esgoto, ossos de animais e grãos vencidos, contribuem para a geração de energia e evitam o descarte em aterros sanitários (Amar, 2021). A Tabela 1 apresenta o poder calorífico inferior (PCI) de alguns dos resíduos utilizados como combustíveis alternativos no processo de coprocessamento.

Tabela 1 – Poder calorífico inferior (PCI) dos principais combustíveis utilizados em coprocessamento nas cimenteiras.

Combustível alternativo	PCI (kcal/kg)
Borracha	6.780
Plástico	6.300
Papel	4.030
Couro	3.630
Têxteis	3.480
Casca de Arroz	3.300
Maravalha	3.300
Pó de serra	3.200
Bagaço de Cana	3.130
Cavaco de madeira	3.100
Madeira picada	3.000
Madeira	2.520
Alimentos	1.310

Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2018) e ENGECASS (2025).

Resíduos do agronegócio também desempenham papel relevante, como é o caso do bagaço de cana-de-açúcar, que substitui parcialmente os combustíveis fósseis em função de seu valor energético. A biomassa, de modo geral, é uma fonte estratégica para o coprocessamento. O carvão vegetal, por exemplo, é uma alternativa renovável ao coque de petróleo, enquanto o cavaco de madeira não impregnada é valorizado pelo seu bom PCI e pelo potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa. Resíduos agrícolas e orgânicos como casca de arroz, casca de coco, casca de castanha e caroços de açaí também são aproveitados, oferecendo boa capacidade calorífica e sendo uma opção sustentável para a produção de clínquer. (Venâncio, 2022)

Além dos combustíveis, diversos tipos de resíduos são utilizados como matérias-primas alternativas. Lama com alto teor de alumina e refratários usados são empregados na substituição de matérias-primas ricas em alumínio, reduzindo a necessidade de extração mineral. Lamas siderúrgicas, por sua vez, são aproveitadas pela sua riqueza em ferro, substituindo o minério de ferro. Já resíduos como areia de fundição e terras de filtragem, ricos em sílica, podem substituir parcialmente a argila na composição da farinha crua. (ABCP, 2023)

Outros materiais, como gesso, cinzas e escórias, são incorporados ao clínquer ou adicionados durante a fase final de moagem, com o objetivo de ajustar a composição do cimento. Resíduos provenientes da perfuração de poços de petróleo e solos contaminados oriundos de postos de combustíveis, quando devidamente tratados, também podem ser coprocessados. Esses resíduos aproveitam seus componentes energéticos e minerais, ao mesmo tempo que evitam o descarte em aterros. (Belato, 2013)

A prática de utilizar resíduos e biomassas no coprocessamento contribui significativamente para a economia de recursos naturais, a redução de emissões de gases poluentes e a gestão sustentável de resíduos. Dessa forma, o coprocessamento se alinha aos princípios da economia circular, promovendo uma cadeia produtiva mais eficiente, limpa e sustentável na indústria do cimento. O coprocessamento apresenta benefícios ambientais, econômicos e sociais relevantes tanto para a indústria cimenteira quanto para a sociedade em geral, destacando-se como uma alternativa vantajosa em relação aos métodos convencionais de destinação de resíduos. (ABCP, 2023)

Um dos principais ganhos ambientais do coprocessamento é a preservação de recursos naturais. Ao utilizar resíduos como substitutos de matérias-primas e combustíveis fósseis, há uma redução na demanda por extração mineral e pelo consumo de insumos não renováveis. A substituição parcial do coque de petróleo por biomassas e resíduos industriais contribui para a

diminuição da exploração de matérias-primas virgens utilizadas na produção de cimento. (Mantegazza, 2004)

Outro aspecto relevante é a redução das emissões de gases de efeito estufa. De acordo com Apolinário (2023), a substituição de combustíveis fósseis por resíduos com baixo teor de carbono – como biomassa e Resíduos Sólidos Urbanos – pode reduzir as emissões em até 30,6 kg de CO₂ por tonelada de clínquer, quando comparado ao uso exclusivo de combustíveis convencionais. Além disso, o coprocessamento permite a destruição térmica segura de resíduos perigosos, como solventes e pneus, em temperaturas superiores a 1.400 °C, evitando a formação de subprodutos tóxicos.

O coprocessamento também contribui para a diminuição do passivo ambiental, ao oferecer uma destinação sustentável para resíduos que, de outra forma, seriam descartados em aterros sanitários. Nesses locais, muitos resíduos se decompõem lentamente, gerando metano, um potente gás de efeito estufa. Com o avanço da substituição térmica e da aplicação de tecnologias adequadas de destinação, o coprocessamento colabora para a redução da dependência dos aterros. (Paula, 2009)

Segundo o Panorama do Coprocessamento divulgado pela ABCP (2024), em 2023, aproximadamente 3,363 milhões de toneladas de CO₂ deixaram de ser emitidas na atmosfera em função do uso do coprocessamento. No mesmo período, cerca de 3,258 milhões de toneladas de resíduos e biomassa foram destinadas aos fornos de cimenteiras, sendo 3,132 milhões de toneladas empregadas especificamente como substitutos de combustíveis fósseis.

Ainda segundo o relatório, o ano de 2023 registrou o maior índice histórico de substituição térmica na indústria cimenteira brasileira, atingindo a média de 32% da energia térmica utilizada nos fornos. Esse percentual já se aproxima da meta projetada para 2030, que é de 35%. O avanço é notável quando se observa que, em 2014, a taxa de substituição térmica era de apenas 8%, o que evidencia uma quase quadruplicação em apenas nove anos. Esses dados demonstram o comprometimento do setor com a descarbonização e indicam que o Brasil está no caminho certo para alcançar a meta de 55% de substituição térmica até 2050, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Substituição térmica de 2014 a 2023.

Ano	Toneladas coprocessada	Combustíveis Alternativos (%)	Biomassa	Substituição térmica (%)
2023	3.258	14	18	32
2022	3.035	14	16	30
2021	2.408	13	13	26
2020	2.018	15	13	28
2019	1.466	12	11	23
2018	1.257	12	8	20
2017	1.172	10	8	18
2016	0.940	10,8	4,3	15,1
2015	1.070			9,7
2014	1,120			8,1

Fonte: Adaptado de ABCP (2024).

A prática do coprocessamento também gera benefícios sociais, como a criação de empregos diretos e indiretos, especialmente nas atividades de coleta, triagem e transporte de resíduos. Essa cadeia de valor pode favorecer a organização de cooperativas locais, promovendo inclusão social e contribuindo para o desenvolvimento econômico regional.

Além disso, ao reduzir a quantidade de resíduos descartados em lixões e aterros, o coprocessamento contribui para a erradicação de depósitos a céu aberto, impactando positivamente a saúde pública e a qualidade de vida, sobretudo em comunidades localizadas próximas a essas áreas. (ABCP, 2023)

Do ponto de vista econômico, o coprocessamento permite aumentar a vida útil dos aterros sanitários ao diminuir significativamente o volume de resíduos destinados a esses locais. Isso resulta em economia de espaço e postergação dos investimentos em novas unidades de disposição final.

Outro aspecto importante é a redução dos custos de energia térmica na produção de cimento. Ao substituir combustíveis fósseis por resíduos com valor energético, a indústria cimenteira consegue obter economias substanciais, tornando-se mais competitiva. Além disso, o setor pode oferecer o coprocessamento como um serviço ambiental para empresas geradoras de resíduos que exigem destinação específica. Um exemplo é a indústria farmacêutica, que precisa eliminar medicamentos vencidos de forma segura para evitar o risco de desenvolvimento de bactérias resistentes às medicações. (Calisto e Silva, 2016)

Comparado a outras formas de destinação, como a incineração convencional ou o depósito em aterros sanitários, o coprocessamento destaca-se como uma alternativa mais sustentável e econômica. Trata-se de uma solução integrada que combina a destruição térmica

segura dos resíduos com a valorização energética e a conservação de recursos naturais, consolidando-se como uma estratégia ambientalmente correta e economicamente viável para a gestão de resíduos industriais e urbanos. (ABCP, 2023)

3.5 Operação do coprocessamento na cimenteira

3.5.1 Fluxo de resíduos no processo produtivo

Os materiais destinados ao coprocessamento são recebidos na cimenteira por meio de caminhões, sendo a quantidade transportada determinada pela diferença entre as pesagens do veículo na entrada e na saída da unidade. Após o recebimento, os resíduos são encaminhados para uma área específica de armazenamento.

Resíduos como pneus triturados e biomassas podem ser armazenados em espaços sem impermeabilização. No entanto, materiais classificados como perigosos (classe 1) – como lodos de tratamento e resíduos industriais e urbanos – devem ser alocados em áreas com infraestrutura adequada, que impeça o contato direto ou indireto com o solo, evitando contaminações ambientais.

Após o descarregamento, os resíduos passam por uma triagem, com o objetivo de remover contaminantes e materiais indesejados, como sucatas metálicas, compostos ricos em cloro (ex: PVC) e itens perigosos, como recipientes pressurizados, que representam risco de explosão. Em seguida, os materiais com granulometria inadequada são submetidos à trituração, sendo o tamanho máximo recomendado de 50 mm para alimentação na torre de pré-calcinação.

Após a trituração, os resíduos são armazenados em um galpão exclusivo para materiais triturados, onde são misturados em proporções específicas, com base na densidade, características químicas e teor de cloro. O limite máximo de cloro na mistura deve ser inferior a 0,5% da massa total, a fim de evitar corrosão nos equipamentos e obstruções nas linhas de transporte e alimentação.

Com a mistura preparada, o material é alimentado em um piso móvel que o transfere para uma correia transportadora. Em seguida, o resíduo é conduzido por um elevador corrugado até um silo, o qual está conectado a roscas dosadoras que alimentam a torre de pré-calcinação, onde os resíduos são utilizados como combustíveis alternativos no processo de clínquerização.

3.5.2 Controle de qualidade dos resíduos

As análises dos resíduos coprocessados são essenciais para garantir a eficiência operacional, a qualidade do clínquer e a segurança ambiental do processo. Entre os principais parâmetros analisados estão: umidade, poder calorífico, teor de cinzas, composição química e presença de compostos indesejáveis, como cloro e metais pesados.

A determinação da umidade é fundamental, pois altos teores reduzem o poder calorífico efetivo do material, uma vez que parte da energia liberada durante a queima é consumida na evaporação da água.

A análise do poder calorífico inferior (PCI) indica a quantidade de energia disponível por unidade de massa. Em geral, resíduos utilizados como combustíveis alternativos devem apresentar PCI superior a 3.500 kcal/kg. No entanto, resíduos com PCI inferior ainda podem ser coprocessados — não como substitutos energéticos, mas como forma ambientalmente adequada de destinação final, como ocorre com resíduos da indústria farmacêutica e efluentes industriais.

A análise do teor de cinzas permite estimar o resíduo sólido que será incorporado ao clínquer, impactando sua composição mineralógica. O monitoramento da composição química é igualmente importante para evitar o excesso de componentes como ferro e alumínio, que podem alterar as propriedades do clínquer. Além disso, é necessário garantir que o teor de metais pesados — como chumbo — esteja dentro dos limites estabelecidos por normas ambientais.

O cloro é um elemento particularmente crítico no processo. Sua volatilidade em altas temperaturas pode gerar compostos que permanecem circulando no sistema e reagem com os álcalis presentes na matéria-prima, formando sais que cristalizam e se acumulam nas paredes internas dos ciclones e dutos da torre de pré-aquecimento. Esse acúmulo pode provocar obstruções, corrosões e perdas operacionais.

A padronização da composição dos resíduos é imprescindível para evitar variações que comprometam o desempenho do forno e a estabilidade do processo. Flutuações na composição química e no PCI dos resíduos podem alterar a reatividade na queima, exigindo ajustes constantes na operação e afetando a eficiência térmica. Por isso, é necessário estabelecer protocolos rigorosos de amostragem, análise e controle, assegurando que os resíduos estejam dentro dos padrões aceitáveis para o processo de coprocessamento.

A padronização e o controle de qualidade não apenas garantem a consistência do produto final, mas também contribuem para a redução das emissões, o prolongamento da vida útil dos equipamentos e a otimização do desempenho ambiental e energético da cimenteira.

4 METODOLOGIA

Este estudo teve como objetivo caracterizar as propriedades energéticas de quatro tipos principais de materiais utilizados como combustíveis alternativos em uma cimenteira, no contexto do coprocessamento. Para isso, foi realizada a coleta e análise de amostras durante o mês de julho de 2024, com foco na determinação do teor de umidade e do poder calorífico inferior (PCI) dos materiais.

4.1 Coleta e preparo das amostras

A coleta foi realizada em cinco datas distintas: 2, 10, 17, 24 e 31 de julho de 2024. Cada data foi associada a um conjunto de amostras, denominadas A, B, C, D e F, respectivamente. O planejamento amostral visou garantir representatividade da composição dos combustíveis utilizados ao longo do mês.

Em cada campanha de coleta, amostras foram obtidas em três diferentes pontos do processo, totalizando mais de 1 kg de material por tipo de combustível. As amostras foram inicialmente homogeneizadas e, em seguida, submetidas a trituração em triturador industrial, com o objetivo de padronizar a granulometria e favorecer a uniformização da composição.

4.2 Determinação do teor de umidade

Para a análise de umidade, alíquotas de aproximadamente 100 g foram separadas de cada amostra. As amostras foram secas em estufa a 110 °C por um período superior a duas horas, até a obtenção de massa constante, conforme norma ABNT NBR 16550 (2018). A umidade foi determinada com base na variação de massa, conforme a equação abaixo:

$$U = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que m_i e m_f são as massas inicial e final da amostra, respectivamente.

4.3 Determinação do poder calorífico inferior (PCI)

Após a determinação da umidade, alíquotas de aproximadamente 1 g de material seco foram utilizadas para a análise do poder calorífico inferior (PCI), realizada em bomba calorimétrica adiabática, conforme norma ABNT NBR 8633 (1984).

Essa etapa permitiu avaliar o teor energética dos combustíveis analisados, contribuindo para a identificação de materiais com maior potencial de substituição dos combustíveis fósseis no processo de clínquerização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Coprocessamento na cimenteira

A cimenteira analisada exemplifica de forma clara como o coprocessamento pode ser integrado ao processo de produção de cimento, contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência energética do setor. Em 2023, a empresa coprocessou um total de 31 mil toneladas de resíduos, o que resultou em uma substituição térmica de 14,9%, sendo 13% dessa substituição proveniente exclusivamente de biomassas. Os dados indicam que há espaço para ampliar a participação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), atualmente subutilizado.

Apesar do índice apresentado, o valor está significativamente abaixo da média nacional, que foi de 32% em 2023. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que a empresa iniciou a prática do coprocessamento apenas em 2019, estando ainda em fase de adaptação e desenvolvimento de sua estrutura operacional.

Entre os principais desafios enfrentados, destaca-se o controle de qualidade dos resíduos utilizados. O processo exige testes rigorosos e triagem criteriosa para garantir que apenas materiais adequados sejam utilizados como combustíveis. No entanto, a ausência de um sistema completamente estruturado de controle ainda limita a ampliação da substituição térmica no forno rotativo.

Mesmo com tais desafios, a empresa tem alcançado resultados positivos. Desde a adoção do coprocessamento, observou-se uma redução de mais de 2,5 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido. Além disso, a economia associada ao uso de resíduos como fonte de energia tem contribuído para o aumento da competitividade da empresa no mercado. (APODI, 2024)

Ao comparar esses números com os de outras indústrias do setor, percebe-se o potencial de crescimento. Por exemplo, a média de substituição térmica das fábricas do grupo Votorantim Cimentos no mundo foi de 30,9%, chegando a 34,3% nas unidades brasileiras (VOTORANTIM, 2024). Na Europa, essa taxa é ainda maior: a fábrica da Holcim em Čížkovice, na República Tcheca, já alcança 100% de substituição térmica, evitando a emissão de mais de 200 mil toneladas de CO₂ por ano. Outro exemplo notável é a unidade de Retznei, também da Holcim, que obteve o mesmo desempenho (CEMBUREAU, 2024). Esses resultados demonstram que, embora a cimenteira no Ceará esteja avançando, ainda há um extenso caminho a percorrer rumo às melhores práticas internacionais.

5.2 Poder calorífico dos resíduos coprocessados

A eficiência do coprocessamento depende diretamente do poder calorífico dos resíduos utilizados como combustíveis alternativos. O poder calorífico inferior (PCI) mede a quantidade de energia gerada durante a queima do material, sendo um parâmetro crucial para a estabilidade térmica do forno de clínquer.

A Tabela 3 apresenta os valores de PCI e umidade dos combustíveis alternativos analisados durante o mês de julho de 2024 – Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), cavaco de cajueiro, casca de castanha de caju e borra oleosa. O coque de petróleo, principal combustível da planta, possui um PCI médio de aproximadamente 7.750 kcal/kg. Em comparação, todos os combustíveis alternativos avaliados apresentam valores significativamente inferiores, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – PCI (kcal/kg) e umidade dos combustíveis alternativos avaliados.

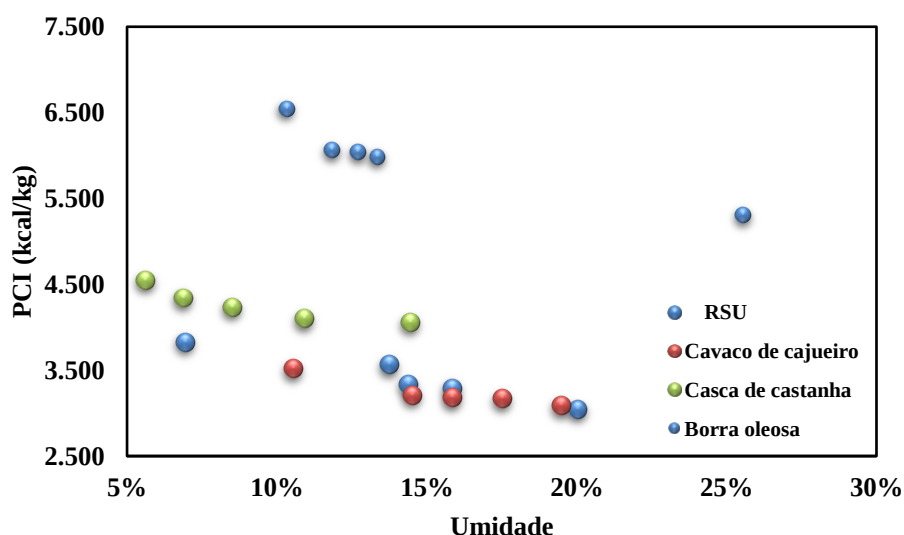
	RSU	Casca da castanha de caju	Cavaco do cajueiro	Borra oleosa
Amostra A				
PCI (kcal/kg)	3.824	3.209	4.054	6.066
Umidade (%)	6,92	14,51	14,43	11,81
Amostra B				
PCI (kcal/kg)	3.559	3.083	4.227	6.040
Umidade (%)	13,71	19,46	8,51	12,69
Amostra C				
PCI (kcal/kg)	3.289	3.513	4.094	5.309
Umidade (%)	15,82	10,54	10,91	25,53
Amostra D				
PCI (kcal/kg)	3.037	3.164	4.339	5.983
Umidade (%)	20,02	17,49	6,86	13,32
Amostra E				
PCI (kcal/kg)	3.330	3.175	4.544	6.546
Umidade (%)	14,38	15,83	5,60	10,30

Fonte: Autoria própria (2025).

Ao comparar os valores obtidos, observa-se que os resíduos analisados têm PCI inferiores ao coque, exigindo maior volume para atingir o mesmo desempenho energético. Isso impacta diretamente a logística, o armazenamento e a alimentação dos fornos. Além disso, nota-se grande variabilidade nos teores de umidade, especialmente no RSU e na borra oleosa, com diferenças superiores a 13% entre as amostras.

Como ilustrado na Figura 6, há uma correlação inversa entre umidade e PCI, ou seja, quanto maior a umidade, menor o aproveitamento energético. Isso ocorre porque parte da energia é consumida na evaporação da água presente no resíduo.

Figura 6 – PCI vs. Umidade dos combustíveis alternativos avaliados.



Fonte: Autoria própria (2025).

Entre os resíduos avaliados, destaca-se a borra oleosa, com PCI entre 5.309 e 6.546 kcal/kg, próxima ao valor do coque de petróleo. Apesar do alto teor de umidade e variabilidade entre amostras, esse resíduo apresenta alto potencial energético, tornando-se um dos mais promissores.

O cavaco de cajueiro, por outro lado, teve o menor desempenho energético, com PCI entre 3.083 e 3.513 kcal/kg. Apesar de contribuir para a redução de CO₂ e NO_x, sua utilização em grande escala pode ser limitada pela baixa densidade energética e pelo alto custo logístico.

Já a casca de castanha de caju demonstrou melhor desempenho, com PCI entre 4.054 e 4.544 kcal/kg, sendo uma alternativa viável. É importante mencionar que a indústria em questão está localizada próxima a regiões produtoras de caju.

Por fim, o RSU, composto por resíduos sólidos urbanos e industriais, apresentou PCI similar ao cavaco, mas destaca-se pela ampla disponibilidade e baixo custo. Ainda assim, sua variabilidade e teor de umidade exigem controles rigorosos para garantir estabilidade no processo de queima e conformidade com a legislação ambiental.

Em todos os casos, a substituição do coque por resíduos requer uma abordagem estratégica, com controle rigoroso de umidade, composição química e compatibilidade entre os materiais utilizados. Os dados obtidos reforçam que resíduos como a borra oleosa e a casca de castanha apresentam potencial significativo, desde que acompanhados de estratégias operacionais adequadas.

6 CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho foi avaliado o uso de combustíveis alternativos na indústria cimenteira, com foco em sua viabilidade técnica, eficiência energética e impactos ambientais. Os resultados confirmam que o coprocessamento é uma solução sustentável e eficaz para a destinação de resíduos, promovendo a economia circular e contribuindo significativamente para a redução das emissões de carbono no setor.

Em 2023, a cimenteira analisada coprocessou um total de 31 mil toneladas de resíduos, resultando em uma substituição térmica de 14,9%, sendo 13% exclusivamente de biomassa. Embora represente um avanço importante, esse índice ainda está abaixo da média nacional de 32%, revelando um potencial significativo para a ampliação do uso de resíduos sólidos urbanos (RSU) como fonte energética.

A análise das amostras destacou a influência direta do poder calorífico inferior (PCI) e da umidade dos resíduos na eficiência do coprocessamento. Amostras com maior umidade apresentaram menor valor energético, o que compromete o desempenho térmico no forno. Entre os combustíveis avaliados, a borra oleosa apresentou os melhores resultados, com PCI entre 5.309 e 6.546 kcal/kg, sendo, do ponto de vista energético, a alternativa mais eficiente para substituir o coque de petróleo. Em contraste, o cavaco de cajueiro demonstrou o menor desempenho energético, com PCI entre 3.083 e 3.513 kcal/kg, exigindo maior volume para suprir a mesma energia térmica. A casca de castanha de caju, com PCI entre 4.054 e 4.544 kcal/kg, revelou-se uma opção viável, principalmente pelo fato de a indústria analisada ser próxima a regiões produtoras de caju.

Além dos ganhos energéticos, o coprocessamento também contribuiu para a redução das emissões específicas líquidas de CO₂, com uma diminuição superior a 2,5 kg por tonelada de cimento produzido desde a adoção dessa prática. No entanto, obstáculos operacionais ainda limitam o avanço da substituição térmica, especialmente no que se refere ao controle de qualidade dos resíduos e à adaptação do processo produtivo para lidar com materiais de menor PCI.

Conclui-se, portanto, que o coprocessamento de resíduos na cimenteira analisada representa um avanço relevante rumo a uma produção mais sustentável. No entanto, para que a empresa atinja níveis mais elevados de eficiência energética e ambiental, será necessário investir continuamente em inovação, controle de qualidade dos resíduos e melhorias operacionais. A articulação entre setor industrial, governo e meio acadêmico será determinante

para consolidar o coprocessamento como uma solução viável, sustentável e alinhada às exigências das agendas climáticas globais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAR, Gabriela. **A indústria de cimento brasileira na transição para o baixo carbono**. 2021. Monografia (Graduação em Economia) – Departamento de Economia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.econ.puc-rio.br/uploads/adm/trabalhos/files/Gabriela_Amar_Mono_21.2.pdf. Acesso em: 5 abr. 2025.

ANDRADE, José André Gomes de. **Determinação da influência de dois fatores na resistência do Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI)**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/27866>. Acesso em: 5 abr. 2025.

APOLINÁRIO, Jéssica Beatriz Torres. **Impactos do uso de resíduos no coprocessamento e análise das emissões de CO₂ em uma indústria de cimento na região da Paraíba**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/31886>. Acesso em: 5 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Dia Mundial do Meio Ambiente: indústria brasileira do cimento é referência na redução de emissões dos gases de efeito estufa**. 2023. Disponível em: <https://abcp.org.br/dia-mundial-do-meio-ambiente-industria-brasileira-do-cimento-e-referencia-na-reducao-de-emissoes-dos-gases-de-efeito-estufa/#:~:text=O%20Dia%20Mundial%20do%20Meio,meio%20ambiente%20%C3%A0s%20futuras%20gera%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Panoramas do coprocessamento de 2015 a 2024**. São Paulo: ABCP, 2024. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/panorama-do-coprocessamento-brasil-2024-ano-base-2023/>. Acesso em: 15. fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Panoramas do coprocessamento de 2023**. São Paulo: ABCP, 2023. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/publicacoes/panorama-do-coprocessamento-brasil-2023-ano-base-2022-dez23/>. Acesso em: 15. fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLÁVEIS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/>. Acesso em: 08 nov. 2024.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. Associação Brasileira de Cimento Portland. 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>. Acesso em: 9 nov. 2024.

BELATO, Mariana Natale. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/795>. Acesso em: 5 abr. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA/MMA nº 499, de 6 de outubro de 2020**. Dispõe sobre critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de atividades de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 193, p. 88, 7 out. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>. Acesso em: 5 abr. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de usinas de coprocessamento de pneus inservíveis em fornos rotativos de produção de clínquer. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=597. Acesso em: 5 abr. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 5 abr. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022**. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm. Acesso em: 5 abr. 2025.

CALISTO, Ludmila Borges; SILVA, José Humberto da. A disposição final dos resíduos de medicamentos: um estudo na empresa Ecobar Meio Ambiente. **Qualia: a ciência em movimento**, v. 2, n. 2, p. 77-93, jul./dez. 2016. Disponível em: <https://revistas.unifan.edu.br/index.php/RevistaICSA/article/view/245>. Acesso em: 5 abr. 2025.

CEMBUREAU. **The European Cement Association**. Disponível em: <https://cembureau.eu/>. Acesso em: 5 abr. 2025.

CHAUDHURY, R. *et al.* Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 417, p. 137466, 2023.

CIMENTO APODI. **Sustentabilidade**. Disponível em: <https://cimentoapodi.com.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 15 out. 2024.

CRUZ, Maria Carolina Rego Gomes. **Coprocessamento na indústria de cimento portland: estado da arte**. 2023. 22f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/6108>. Acesso em: 10 jan. 2025.

DUDA, W. H. **Cement data book: international process engineering in the cement industry**. 3. ed. Berlin: Wiesbaden, 1985. 560 p.

ENGECASS. Poder calorífico inferior: por que avaliar ao escolher a biomassa? **Blog Engecass**, 21 jan. 2025. Disponível em: <https://blog.engecasscaldeiras.com.br/poder-calorifico-inferior/>. Acesso em: 5 abr. 2025.

GEBR. PFEIFFER SE. Disponível em: <https://www.gebr-pfeiffer.com/en/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **Cement Industry Net Zero Progress Report 2024/25**. Disponível em: <https://gccassociation.org/cement-industry-net-zero-progress-report-2024-25/>. Acesso em: 5 abr. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. Paris: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>. Acesso em: 06 nov. 2024.

LIMA, André Barbosa de. **O processo produtivo do cimento Portland**. 2011. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6HHC/1/monografia_processo_produtivo_cimento_portland.pdf. Acesso em: 5 abr. 2025.

MANTEGAZZA, Ezio. **Aspectos ambientais do co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer no estado de São Paulo**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001455437>. Acesso em: 5 abr. 2025.

MARQUES, Diego Machado. *et al.* A comprovação da relação volume x variância na homogeneização da sílica em minério de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 355–361, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000200021>.

MEDEIROS, José Alysson Dehon Moraes; TORRES, Sandro Marden. O cimento Portland do século XIX e as ruínas que testemunham o pioneirismo brasileiro na indústria cimenteira da América Latina. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA DA CONSTRUÇÃO LUSO-BRASILEIRA, 3., 2019, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2019. Disponível em: https://3cihclb.ufba.br/sites/3cihclb.ufba.br/files/artigos_aprovados_-_3cihclb_0.pdf. Acesso em: 5 abr. 2025.

MOCHIZUKI, Victória de Lima. **Balanço térmico do forno rotativo e do resfriador da fábrica Elizabeth Cimentos Ltda**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13534>. Acesso em: 5 abr. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 5 abr. 2025.

OLIVEIRA, Douglas Eldo Pereira de. *et al.* Análise do potencial da produção de energia a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos na cidade de São Paulo. **Interciencia**, v. 43, n. 11, p. 778–783, nov. 2018. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/339/33957918007/html/>. Acesso em: 5 abr. 2025.

OLIVEIRA, Josenaidy Mirelly Da. **Avaliação da utilização de resíduos no coprocessamento em fornos da indústria cimenteira Uma revisão de Literatura**. 2021. Monografia - Universidade Federal Da Paraíba.

PAULA, Luiz Gonzaga de. **Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de misturas de resíduos**. 2009. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1589>. Acesso em: 5 abr. 2025.

RIBEIRO, Milena Hellen Damasceno. **Processo produtivo e análise de desempenho do forno de clínquerização de uma cimenteira**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/0e3326be-6800-470e-be39-7286d3062603>. Acesso em: 5 abr. 2025.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; ESPÍRITO SANTO, Belinazir Costa do. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 16, n. 1, p. 23–32, mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000100003>.

SANTOS, Leandro Bruno. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. *Sociedade & Natureza*, v. 23, n. 1, p. 111-127, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132011000100007>.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. Sustainable cement production – present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, p. 642-650, jul. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>.

SILVA NETO, Francisco das Chagas. **Acompanhamento do processo produtivo do cimento Portland e avaliação da cogeração de energia na unidade fabril da Companhia Industrial de Cimento Apodi em Quixeré-CE**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/44919a9c-f9db-4af9-b715-29366dee53e4>. Acesso em: 5 abr. 2025.

SILVA, José Antônio da. **Estudo do comportamento químico durante a formação de anéis de clínquer em fornos rotativos de cimento**. 2001. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/1955>. Acesso em: 5 abr. 2025.

TORRES, Vitor Alvarenga; LANGE, Liséte Celina. Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valoração energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 1, p. 25-30, jan./fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210221>.

VENÂNCIO, Raoni Junio Martins. **Análise de resíduos industriais utilizados na produção de blends para o coprocessamento: uma visão sob o ponto de vista energético**. 2023. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/55417>. Acesso em: 5 abr. 2025.

VOTORANTIM. **Relatório Integrado 2023**. Votorantim Cimentos. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/relatorio-integrado/>. Acesso em 09. Nov 2024.

ZHANG, C. Y. *et al.* Accounting process-related CO₂ emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways. *Journal of Cleaner Production*, v. 184, p. 451-465, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.284>.

ZHANG, Shuang. *et al.* Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 400, 136680, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137466>.