

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Engenharia Ambiental

Guilherme Monteiro de Sá Rabêlo

REVISÃO E ANÁLISE DAS PESQUISAS RELACIONADAS À MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO SOBRE OS TEMAS “CLÍNQUER” E “CIMENTO PORTLAND” DA REDE RINCIMCI CYTED

Brasília
2025

Guilherme Monteiro de Sá Rabêlo

REVISÃO E ANÁLISE DAS PESQUISAS RELACIONADAS À MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO SOBRE OS TEMAS “CLÍNQUER” E “CIMENTO PORTLAND” DA REDE RINCIMCI CYTED

Projeto Final Parte II apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. João Henrique da Silva Rêgo;

Coorientador(a): Prof. Daniel da Silva Andrade;

Brasília

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

Mr

Monteiro de Sá Rabelo, Guilherme.
REVISÃO E ANÁLISE DAS PESQUISAS RELACIONADAS À MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO SOBRE OS TEMAS "CLÍNQUER" E "CIMENTO PORTLAND" DA REDE RINCIMCI CYTED / Guilherme Monteiro de Sá Rabelo;

Orientador: João Henrique da Silva Rêgo; co-orientador Daniel da Silva Andrade. -- Brasília, 2025.
67 f.

Monografia (Graduação - Engenharia Ambiental) -- Universidade de Brasília, 2025.

1. Clínquer. 2. Cimento. 3. Mitigação de carbono. 4. Revisão Bibliográfica. 5. RINCIMCI. I. da Silva Rêgo, João Henrique, orient. II. da Silva Andrade, Daniel, co-orient. III. Título.

REVISÃO E ANÁLISE DAS PESQUISAS RELACIONADAS À MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO SOBRE OS TEMAS "CLÍNQUER" E "CIMENTO PORTLAND" DA REDE RINCIMCI CYTED

Projeto Final Parte II apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

João Henrique da Silva Rêgo, Dsc (UNB)

Orientador

Daniel da Silva Andrade

Coorientador

Félix Alves da Silva Júnior

Examinador Interno

Yuri Sotero Bomfim Fraga

Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha eterna gratidão pela força, iluminação e por ser o meu alicerce em todos os projetos da minha vida, especialmente na realização desta dissertação. Sem Sua presença e orientação, este sonho não teria se concretizado.

Aos meus pais, João e Vângela, meu profundo agradecimento pelo suporte incondicional, pela orientação sempre precisa e, acima de tudo, por me proporcionarem a oportunidade e a permanência nos estudos da Universidade de Brasília. Vocês são a base de todas as minhas conquistas.

Ao meu irmão, Leandro, obrigado pelo apoio e motivação constantes durante toda a minha trajetória acadêmica.

A Fernanda, minha companheira, sou abertamente grato por seu suporte, por suas orientações e, principalmente, por estar ao meu lado em todos os momentos de desabafo e superação. Sua companhia foi fundamental.

Agradeço ao Prof. João Henrique, pela valiosa orientação durante todo o processo de elaboração desta dissertação. Suas orientações e insights foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Daniel Andrade, minha sincera gratidão pela coorientação, por disponibilizar materiais de pesquisa e me guiar ao longo de todo o projeto.

À Universidade de Brasília, da qual sempre me orgulhei em fazer parte, deixo meu reconhecimento e agradecimento por ter sido o ambiente onde cresci e me desenvolvi como profissional e como pessoa.

Aos amigos e colegas de curso das Engenharias Civil e Ambiental, que tornaram esta jornada acadêmica mais leve e compartilhada. Obrigado por cada momento de aprendizado e convivência.

A todos, meus agradecimentos sinceros.

AGRADECIMENTOS A CYTED/RINCIMCI

Agradeço imensamente à CYTED e à rede RINCIMCI pela oportunidade de desenvolver este projeto final e pelo acesso às pesquisas e colaborações que fundamentaram este trabalho. A iniciativa promovida por essa rede de pesquisa foi essencial para aprofundar o conhecimento sobre a mitigação das emissões de carbono na indústria cimenteira, permitindo não apenas a revisão das tecnologias existentes, mas também a identificação de novas oportunidades para avanços científicos e industriais.

Expresso minha profunda gratidão ao professor João Henrique da Silva Rêgo, orientador deste trabalho e líder da rede RINCIMCI no Brasil, cuja orientação, incentivo e conhecimento foram indispensáveis para a condução deste estudo. Seu compromisso com a pesquisa e a colaboração internacional foi uma inspiração ao longo de todo o processo. Agradeço também ao meu coorientador, Daniel da Silva Andrade, colaborador da rede RINCIMCI, pelo suporte técnico e científico, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições que enriqueceram esta pesquisa.

A experiência adquirida por meio deste projeto reforça a importância da cooperação acadêmica e tecnológica para o desenvolvimento sustentável do setor cimenteiro, e sou grato por ter feito parte dessa iniciativa.

RESUMO

A indústria cimenteira é um dos maiores emissores de dióxido de carbono (CO_2), devido ao uso intensivo de clínquer e combustíveis fósseis em seu processo produtivo. Com a crescente demanda por soluções sustentáveis, torna-se essencial a busca por estratégias eficazes de mitigação de carbono que possam viabilizar a transição para uma produção mais limpa e alinhada às metas globais de neutralidade carbônica até 2050. Este estudo consiste em uma revisão de pesquisas realizadas entre 2021 e 2023 por membros da rede RINCIMCI, com o objetivo de identificar tecnologias e estratégias promissoras para reduzir as emissões na fabricação de cimento e clínquer. A análise demonstrou que os cimentos com baixo teor de clínquer, especialmente aqueles que incorporam resíduos industriais, argilas calcinadas e pozolanas naturais, são as abordagens mais estudadas. Tecnologias emergentes, como a pirólise por spray de chama, a carbonatação mineral de resíduos de forno e os cimentos de sulfato de cálcio-alumínio, também se destacam pelo seu potencial de redução da pegada de carbono.Os resultados indicam que, embora avanços significativos tenham sido alcançados, há lacunas em temas como o uso de matérias-primas alternativas descarbonatadas, captura e armazenamento de carbono (CCUS) e eficiência térmica na produção de clínquer. Assim, este estudo reforça a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa e inovação, bem como da cooperação internacional, para impulsionar a indústria cimenteira rumo à neutralidade de carbono.

Palavras-chave: Clínquer. Cimento. Mitigação de carbono. Revisão bibliográfica. RINCIMCI.

ABSTRACT

The cement industry is one of the largest emitters of carbon dioxide (CO_2) due to its intensive use of clinker and fossil fuels in the production process. With the growing demand for sustainable solutions, it is essential to explore effective carbon mitigation strategies that enable the transition to a cleaner production model aligned with global carbon neutrality targets by 2050. This study consists of a review of research conducted between 2021 and 2023 by members of the RINCIMCI network, aiming to identify promising technologies and strategies to reduce emissions in cement and clinker manufacturing. The analysis showed that low-clinker cements, especially those incorporating industrial waste, calcined clays, and natural pozzolans, are the most studied approaches. Emerging technologies, such as flame spray pyrolysis, mineral carbonation of kiln residues, and calcium sulfoaluminate cements, also stand out for their potential in reducing the carbon footprint. The results indicate that, while significant progress has been made, gaps remain in areas such as the use of alternative decarbonated raw materials, carbon capture, utilization, and storage (CCUS), and thermal efficiency in clinker production. Thus, this study reinforces the need for continuous investment in research and innovation, as well as international cooperation, to drive the cement industry towards carbon neutrality.

Keywords: Clinker. Cement. Carbon mitigation. Literature review. RINCIMCI.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA 18

1.2. MOTIVAÇÃO DO TEMA 18

1.3. OBJETIVOS 19

1.3.1. Objetivos Gerais 19

1.3.2. Objetivos Específicos 19

1.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA 20

1.5. JUSTIFICATIVA 20

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO 21

2. REVISÃO DA LITERATURA 23

2.1. A EMISSÃO EXCESSIVA DE CO_2 E OS DESEQUILÍBRIOS AMBIENTAIS 23

2.2. A EMISSÃO DE CO_2 NA CADEIA PRODUTIVA DE CIMENTO PORTLAND 24

2.3. O PROGRAMA CYTED E A REDE RINCIMCI 27

2.4. ESTRATÉGIAS PARA A REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO_2 PELA CADEIA PRODUTIVA DE CIMENTO 28

2.4.1. Cimento Portland 29

2.4.2. Clínquer 35

2.5. DESAFIOS NA REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO_2 PELA CADEIA PRODUTIVA DE CIMENTO PORTLAND 38

3. METODOLOGIA 39

3.1. ESCOLHA DOS ARTIGOS 39

3.2. LEITURA E SÍNTESE DOS ARTIGOS 39

3.3. ANÁLISE E COMPILAÇÃO DAS PESQUISAS 40

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 41

4.1. CLÍNQUER 42

4.1.1. Novos tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes 42

4.1.2. Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) 45

4.2. CIMENTO 49

4.2.1. Cimentos com Baixo Teor de Clínquer 49

5. CONCLUSÃO 76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de produção cimento portland 25
Figura 2 - Países integrantes da rede RINCIMCI..... 28

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Países idealizadores do Tema: Novos tipos de Clínqueres de Cimento e utilização de Mineralizantes 43
Gráfico 2 - Países idealizadores do Tema: Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono 45
Gráfico 3 - Países idealizadores do tema Clínquer 48
Gráfico 4 - Quantidade de pesquisas por tema 48
Gráfico 5 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Resíduos Agroindustriais 49
Gráfico 6 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Pozolanas Naturais 52
Gráfico 7 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Resíduos Industriais 55
Gráfico 8 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Argila Calcinada 63
Gráfico 9 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Cimentos LC^3 66
Gráfico 10 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Modelagem 68
Gráfico 11 - Países idealizadores do Tema 4.2.2 Novos Cimentos 70
Gráfico 12 - Países idealizadores do Tema Cimentos 75
Gráfico 13 - Número de artigos publicados por tema 75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados das pesquisas relacionadas ao Tema 4.1.2:Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes 44
Quadro 2 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.1.3: Outros Temas 46
Quadro 3 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Res. AgroIndustriais..... 50
Quadro 4 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Pozolanas Naturais 53
Quadro 5 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Resíduos Industriais 56
Quadro 6 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Argilas Calcinadas 64
Quadro 7 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Cimentos LC^3 67
Quadro 8 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Modelagem..... 69
Quadro 9 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.2 Novos Cimentos..... 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos publicados sobre o Tema Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes por colaboradores.....47
Tabela 2 - Artigos publicados sobre o Tema Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) por colaboradores.....48
Tabela 3 - Número de artigos publicados sobre o Cimentos com baixo teor de clínquer da Rede 72
Tabela 4 - Numero de artigos publicados sobre resíduos agroindustriais por autor da Rede. 73
Tabela 5 - Numero de artigos publicados sobre pozolanas naturais por autor 73
Tabela 6 - Numero de artigos publicados sobre resíduos industriais por autor.....73
Tabela 7 - Numero de artigos publicados sobre argila calcinada por autor.....74
Tabela 8 - Numero de artigos publicados sobre Cimentos LC^3 por autor 74
Tabela 9 - Numero de artigos publicados sobre modelagem por autor 74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
CCUS	*Carbon Capture, Utilization and Storage*
CEMBUREAU	Associação Europeia de Cimento
CO_2	Dióxido de Carbono; Gás Carbônico
CYTED	Programa Ibero-americano de Ciência e Tecnologia para Desenvolvimento
FSP	Pirólise por Spray de Chama (*Flame Spray Pirolisys*)
GEE	Gases do Efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas
LC^3	Cimento de Calcário Calcinado (*Limestone Calcined Clay Cement*)
MCS	Material Cimentício Suplementar
NOAA	*National Oceanic and Atmospheric Administration*
RINCIMCI	Rede Ibero-americana para Neutralidade Carbônica da Indústria de Materiais Cimentícios
SCM	*Supplementary Cementous Materials*
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UNB	Universidade de Brasília
WBCSD	*World Business Council for Sustainable Development*
5C	Clínquer, Cimento, Concreto, Construção e (Re)Carbonatação

1. INTRODUÇÃO

O cimento é um material inorgânico de pequena granulometria que desempenha um papel crucial na construção civil, sendo o principal componente do concreto, utilizado na construção de uma variedade de estruturas. A formulação do concreto envolve a mistura de cimento com agregados (areia e brita) e água, resultando em uma pasta que endurece com o tempo. O cimento confere ao concreto suas propriedades de ligação, essenciais para sua resistência e durabilidade. A produção do cimento envolve diversas etapas complexas, cada uma delas desempenhando um papel fundamental na qualidade final do produto (Worrell *et al*., 2001).

O processo de fabricação do cimento inicia-se com a extração e o processamento das matérias-primas, como calcário (carbonato de cálcio, $CaCO_3$), argila (silicatos de alumínio), óxido de sílica e minério de ferro. Essas matérias-primas são trituradas e moídas, formando uma mistura homogênea conhecida como "farinha crua". A uniformidade e a finura dessa mistura são fatores essenciais para garantir a eficiência das etapas seguintes, pois influenciam diretamente a reatividade química na fase de calcinação. Nessa etapa, a farinha crua é submetida a temperaturas elevadas em fornos rotativos, provocando reações químicas que levam à formação de um material granulado de alta resistência mecânica e propriedades hidráulicas essenciais para a produção do cimento, conhecido como clínquer. (WBSCD, 2012).

Após a obtenção da farinha crua, esta é calcinada em um forno rotativo a temperaturas que atingem aproximadamente 1450°C, causando a queima das matérias-primas (CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, entre outros). Durante essa etapa, ocorre a decomposição térmica do $CaCO_3$, que libera dióxido de carbono (CO_2) e forma óxido de cálcio (CaO). Em seguida, o CaO reage com sílica, alumina e óxidos de ferro, resultando na formação dos principais componentes do clínquer, como os silicatos, aluminatos e ferritos de cálcio. A clinquerização é um processo crítico, pois a formação adequada desses compostos é essencial para garantir as propriedades desejadas no cimento final (Van Oss, 2002).

O principal fator responsável pela emissão de dióxido de carbono no processo de fabricação de cimento Portland é a calcinação do calcário. A cada 1.000 kg de calcita ($CaCO_3$) calcinada, são gerados 560 kg de CaO e 440 kg de CO_2. A reação química de calcinação é responsável por aproximadamente 52% das emissões de CO_2 no processo de fabricação do clínquer, enquanto o consumo de energia responde pelo restante. Considerando o consumo

energético, tem-se que, a cada 1.000 kg de clínquer fabricados, gera-se em média aproximadamente 815 kg de CO_2 (Moisés Frías *et al*., 2021).

Após a clinquerização, o clínquer é resfriado rapidamente em um resfriador, o que não só melhora sua qualidade, evitando a formação de fases indesejadas, como também permite a recuperação de parte do calor gerado durante o processo, contribuindo para a eficiência energética da planta de produção. Esse resfriamento rápido é fundamental para estabilizar a estrutura mineralógica do clínquer e preparar o material para as etapas subsequentes de moagem.

O clínquer resfriado é, então, moído juntamente com gesso, que controla o tempo de pega do cimento. Em alguns casos, outros materiais, como calcário, cinzas volantes ou escória de alto-forno, são adicionados durante a moagem final. Esses materiais possuem propriedades hidráulicas que podem contribuir para a sustentabilidade do cimento, reduzindo a necessidade de clínquer, que é a etapa mais intensiva em carbono do processo de produção. O produto final, conhecido como cimento Portland ou outros tipos de cimentos compostos, é armazenado em silos e distribuído para o mercado em sacos ou a granel, atendendo às diversas demandas da construção civil (Rosa *et al*., 2020).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) aponta que as atividades humanas são as principais responsáveis pelo aquecimento global dos últimos 50 anos, sendo a indústria do cimento uma das grandes contribuidoras para as emissões de CO_2. Estima-se que o processo de fabricação do cimento seja responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO_2, com a produção de clínquer representando entre 86,6% e 92,2% dessas emissões (IPCC, 2022).

A demanda crescente por cimento, impulsionada pelo desenvolvimento urbano e pela expansão da infraestrutura em todo o mundo, tem resultado em um aumento significativo nas emissões de carbono. Somente em 2021, a produção global de cimento gerou aproximadamente 2,9 bilhões de toneladas de CO_2. Diante dessa realidade, a redução das emissões de carbono na indústria cimenteira tornou-se uma prioridade, especialmente em vista das metas de emissão líquida zero até 2050 (GCCA, 2022).

Para enfrentar esse desafio, diversas estratégias estão sendo exploradas para mitigar as emissões de carbono na produção de cimento. Entre essas estratégias estão o uso de combustíveis alternativos, que substituem os combustíveis fósseis tradicionais por fontes mais sustentáveis, e a redução da proporção de clínquer no cimento, uma vez que o clínquer é a fase

mais intensiva em carbono do processo de fabricação. Além disso, a otimização do consumo de energia nas plantas de produção é essencial para melhorar a eficiência e reduzir as emissões.

Outra abordagem significativa envolve a aplicação de técnicas avançadas de captura e armazenamento de carbono (CCS), que visam capturar o CO_2 emitido durante a produção e armazená-lo de forma segura, evitando sua liberação na atmosfera. Processos de recarbonatação natural também estão sendo considerados, onde o carbono é reintegrado ao ciclo natural, reduzindo assim o impacto ambiental do cimento (CEMBUREAU, 2020).

Essas abordagens inovadoras são fundamentais para alcançar um futuro sustentável, garantindo que as necessidades das gerações futuras sejam atendidas sem comprometer o equilíbrio climático do planeta. A colaboração entre governos, indústrias e instituições de pesquisa é vital para o desenvolvimento e a implementação dessas estratégias em larga escala, possibilitando uma transição bem-sucedida para uma economia de baixo (WBCSD, 2012).

Dentro desse contexto, o CYTED (Programa Ibero-Americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento) desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Criado em 1984, o CYTED promove a cooperação científica e tecnológica entre os países ibero-americanos, facilitando a criação de redes de especialistas e a transferência de tecnologia em diversas áreas, incluindo a mitigação das emissões de carbono na indústria do cimento (CYTED, 2021). Uma iniciativa notável do CYTED é a RINCIMCI (Rede Ibero-americana para Neutralidade Carbônica da Indústria de Materiais Cimentícios), que alinha suas atividades com as metas estabelecidas em roteiros globais, como o "RoadMap to NetZero 2050" da CEMBUREAU e o "RoadMap to 2050" da *Global Cement and Concrete Association*. Esses roteiros propõem a neutralidade carbônica na indústria cimenteira até 2050, abordando todas as etapas da cadeia de valor da construção, do clínquer ao concreto, até o ciclo de vida do carbono (GCCA, 2022).

Este Projeto Final em Engenharia Ambiental, portanto, realiza um levantamento detalhado, baseado em uma revisão literária de estudos recentes conduzidos no âmbito da RINCIMCI no período delimitado de três anos. Esse período foi estabelecido pelo professor João Henrique da Silva Rego, coordenador da rede no Brasil, visando auxiliar a elaboração do projeto e limitar a quantidade de pesquisas para cada projeto associado a RINCIMCI. Esses estudos exploram os desafios e as oportunidades na redução das emissões de carbono na produção de cimento, destinando seu foco nas etapas de produção de cimento e clínquer, com

o objetivo de identificar lacunas e propor novas estratégias de mitigação em colaboração com os países participantes do programa CYTED.

1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA

A importância deste projeto está diretamente relacionada aos desafios ambientais causados pela emissão de carbono na indústria do cimento, uma das principais responsáveis pelo aquecimento global. O setor cimenteiro emite grandes quantidades de CO_2 devido ao processo de fabricação do clínquer, essencial para a produção do cimento, e ao uso intensivo de combustíveis fósseis. Essas emissões contribuem significativamente para o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, agravando problemas como mudanças climáticas, elevação da temperatura global e eventos climáticos extremos, que afetam ecossistemas, recursos hídricos e a qualidade de vida da população.

Diante desse cenário, a busca por alternativas para reduzir o impacto ambiental da produção de cimento tornou-se uma necessidade urgente. Tecnologias sustentáveis vêm sendo desenvolvidas para minimizar as emissões e tornar o setor mais eficiente, como a substituição de matérias-primas convencionais por resíduos recicláveis e o uso de fontes de energia menos poluentes. No entanto, para que essas soluções sejam amplamente adotadas, é fundamental que haja cooperação entre pesquisadores, universidades e indústrias.

Este projeto, baseado na revisão das pesquisas da rede RINCIMCI, desempenha um papel essencial nesse contexto, pois reúne estudos recentes sobre alternativas para mitigar as emissões da indústria cimenteira. Além de contribuir para a evolução científica e tecnológica do setor, ele reforça a importância da colaboração internacional para o enfrentamento das mudanças climáticas.

1.2. MOTIVAÇÃO DO TEMA

A escolha deste tema é motivada pela crescente percepção da necessidade de reduzir as emissões de carbono em escala planetária, especialmente em setores industriais de alta

intensidade energética, como a fabricação de cimento. Este setor, sendo responsável por uma fração substancial das emissões globais de CO_2, aproximadamente 7% do total, coloca a indústria cimenteira no centro das discussões sobre mitigação climática.

O desejo de contribuir para a meta global de alcançar a neutralidade de carbono até 2050 alimenta a busca incessante por novas soluções e inovações no processo de produção de cimento. A possibilidade de explorar e fomentar tecnologias emergentes e práticas sustentáveis, como a utilização de combustíveis alternativos e a otimização do consumo energético, constitui uma força motriz essencial para este estudo. Além disso, a oportunidade de colaborar com iniciativas internacionais, como aquelas promovidas pela CYTED e pela rede RINCIMCI, reforça o compromisso em participar ativamente na construção de um futuro mais sustentável.

A seleção deste tema também reflete a necessidade de enfrentar obstáculos da engenharia e de identificar oportunidades de aprimoramento na cadeia produtiva do cimento, contribuindo, assim, para a evolução das práticas industriais e para a mitigação dos impactos ambientais em um cenário global de mudanças climáticas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é realizar a revisão das pesquisas desenvolvidas por colaboradores da rede RINCIMCI na área de mitigação de carbono a partir de novas tecnologias na produção de clínquer e cimento, afim de contribuir com a integração entre os pesquisadores e da rede RINCIMCI

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar os desafios e limitações para a redução das emissões de CO_2 na cadeia produtiva do cimento, considerando os impactos ambientais, tecnológicos e econômicos associados ao setor;

- Mapear os principais temas pesquisados na rede RINCIMCI nos anos 2021 a 2023, identificando tendências, avanços tecnológicos e abordagens mais promissoras para a mitigação do carbono;
- Facilitar a identificação de oportunidades de colaboração entre pesquisadores e instituições da rede RINCIMCI, promovendo a integração entre especialistas com interesses convergentes e oferecendo uma base de conhecimento que auxilie aqueles que desejam contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis.
- Avaliar a aplicabilidade industrial das principais estratégias de mitigação de carbono estudadas, destacando tecnologias com maior viabilidade para implementação na produção de cimento e clínquer;
- Identificar lacunas de pesquisa e oportunidades para inovação, apontando áreas pouco exploradas que possam contribuir na sustentabilidade da indústria cimenteira.

1.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esse Projeto Final atende as limitações delimitadas pela rede RINCIMCI, onde todas as pesquisas revisadas para a sua elaboração foram realizadas por colaboradores e parceiros da rede, seguindo o tema de mitigação de carbono através de estudos sobre cimento e clínquer. A revisão obedeceu a um prazo estipulado de três anos para as datas de publicações das pesquisas, sendo de 2021 a 2023, devido a grande quantidade de estudos disponíveis.

1.5. JUSTIFICATIVA

A necessidade crescente de compreender e enfrentar os desafios da redução das emissões de carbono na cadeia produtiva do cimento até 2050 impulsionou a elaboração deste projeto de revisão literária, baseado nos estudos fornecidos pela rede RINCIMCI. Considerando o impacto significativo da indústria cimenteira nas emissões globais de CO_2 e sua contribuição direta para o aquecimento global, torna-se crucial explorar e adotar alternativas sustentáveis e inovadoras que reduzam os danos ambientais causados por esse setor. Diante da abundância de

matérias-primas e da constante demanda por cimento, é imperativo implementar ações que promovam mudanças positivas nesse setor estratégico da economia global. Por meio da revisão da literatura disponível na rede RINCIMCI, este projeto visa não apenas identificar as melhores práticas, tecnologias e estratégias, mas também apontar direções concretas para a mitigação dos impactos ambientais e para a promoção de um futuro mais sustentável.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

A primeira parte do trabalho apresenta o contexto e a relevância do estudo, abordando os impactos das atividades humanas no aquecimento global, com ênfase na fabricação de cimento, um dos grandes emissores de CO_2. Além disso, destaca a urgência de alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Nessa seção, também é introduzida a rede RINCIMCI, originada pela CYTED, que visa apoiar a descarbonização do setor cimenteiro, e são definidos os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

Em seguida, a revisão reúne e sintetiza os estudos, teorias e práticas existentes relacionados ao tema, com foco em pesquisas recentes disponibilizadas pela rede RINCIMCI, realizadas nos últimos três anos. Essa etapa foi elaborada a partir da leitura e categorização dos artigos, permitindo identificar as principais estratégias para a redução ou substituição do clínquer, evidenciando avanços tecnológicos, tendências emergentes e lacunas no conhecimento.

A metodologia descreve de forma detalhada os procedimentos adotados para a coleta, seleção, análise e segmentação dos dados. Ela foi estruturada em três etapas principais: a seleção dos artigos, com base em critérios definidos (publicações entre 2021 e 2023); a leitura e síntese das informações relevantes, organizadas em uma tabela comparativa; e, por fim, a análise e segmentação dos artigos, que foram agrupados por tópicos conforme seus objetivos, metodologias, tecnologias empregadas e resultados alcançados. Essa abordagem sistemática permitiu identificar padrões e desafios na mitigação das emissões de carbono na cadeia produtiva do cimento.

Na seção de resultados e discussão, os dados obtidos são apresentados e interpretados, evidenciando as áreas com maior concentração de pesquisas, as inovações mais promissoras e os desafios técnicos e econômicos que ainda impedem a implementação em larga escala de soluções sustentáveis. Essa parte compara os achados com a literatura existente, ressaltando a

importância de integrar diferentes áreas do conhecimento e fomentar a colaboração entre pesquisadores para superar as barreiras identificadas.

Por fim, a conclusão sintetiza os principais pontos do trabalho, reafirmando a relevância dos resultados e sugerindo caminhos para futuras pesquisas. São destacados os avanços tecnológicos promissores, as lacunas de pesquisa e a necessidade de continuidade dos estudos, reforçando que o desenvolvimento de estratégias sustentáveis é fundamental para que o setor cimenteiro contribua efetivamente para a meta de neutralidade de carbono até 2050.

Dessa forma, cada tópico foi elaborado de maneira interligada, proporcionando uma compreensão abrangente dos desafios e oportunidades na mitigação das emissões de carbono na indústria do cimento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Para estruturar o embasamento teórico da pesquisa, este capítulo apresenta uma análise detalhada dos principais aspectos e desafios relacionados à indústria do cimento, com foco nos parâmetros que causam maior impacto ambiental ao longo do processo produtivo. Essa análise abrange desde a extração de matérias-primas até o processamento industrial, explorando soluções e técnicas sustentáveis que têm sido aplicadas no cenário global.

O aspecto central dessa análise é a mitigação das emissões de CO_2 nas etapas de produção de clínquer e cimento, fazendo com que nessa revisão se desenvolva uma base sólida para a compreensão dos impactos ambientais na cadeia de cimento, as inovações tecnológicas, as substituições de materiais cimentícios suplementares, assim como as possíveis lacunas de pesquisas.

2.1. A EMISSÃO EXCESSIVA DE CO_2 E OS DESEQUILÍBRIOS AMBIENTAIS

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera tem apresentado um aumento significativo nos últimos dois séculos, impulsionada pela queima de combustíveis fósseis iniciada durante a Primeira Revolução Industrial. Esse aumento é alarmante, com um incremento de 27% nas concentrações de CO_2, sendo que aproximadamente metade desse crescimento ocorreu apenas nos últimos 30 anos. Em termos históricos, as concentrações de CO_2 passaram de cerca de 272 ppm em épocas pré-industriais para 346 ppm em 1986 (Hall, 1989). De acordo com *a National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), a concentração média de CO_2 na atmosfera para o ano de 2024 está estimada em 426 ppm, o que representa a maior concentração registrada nos últimos 16 milhões de anos.

Esse aumento nas concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE), como o CO_2, compromete a capacidade da atmosfera de irradiar calor para o espaço, intensificando o fenômeno do aquecimento global. As atividades humanas, incluindo desmatamento, queimadas e a contínua combustão de combustíveis fósseis, exacerbam esse efeito, resultando em mudanças substanciais no ciclo hidrológico global. A poluição do ar e a formação de chuvas ácidas são consequências diretas do aumento das concentrações de CO_2, o que, por sua vez, agrava o efeito estufa.

O aumento da temperatura global está diretamente relacionado a eventos como mudanças climáticas severas, o derretimento das calotas polares e a consequente elevação do nível do mar. Esses fenômenos têm consequências devastadoras para o meio ambiente, incluindo a degradação de ecossistemas, a destruição de paisagens naturais e efeitos na saúde humana, como o aumento de doenças respiratórias e problemas relacionados à qualidade da atmosfera (IPCC, 2022; GCCA, 2022).

2.2. A EMISSÃO DE CO_2 NA CADEIA PRODUTIVA DE CIMENTO PORTLAND

A indústria de produção de cimento é uma das mais intensivas em carbono, contribuindo significativamente para as emissões globais de CO_2 e representando um grande desafio ambiental. Anualmente, essa indústria é responsável por cerca de 2,8 bilhões de toneladas de CO_2, o que equivale a aproximadamente 8% das emissões globais de gases de efeito estufa, sendo a terceira maior emissora, atrás apenas da geração de energia e do setor de transporte. Esse impacto ambiental se deve, principalmente, ao processo de calcinação do calcário, que libera grandes quantidades de CO_2, além do alto consumo energético necessário para a fabricação do clínquer, principal componente do cimento.

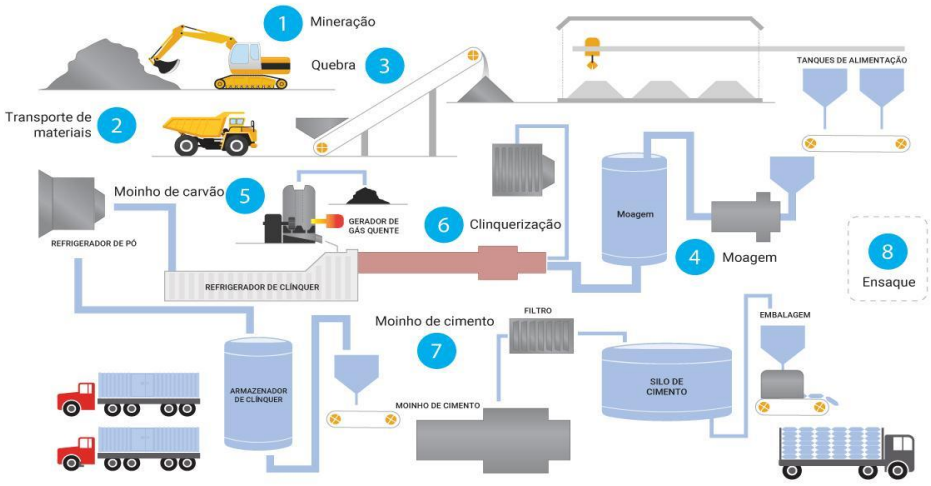
O clínquer, produto intermediário essencial na produção de cimento Portland, é obtido por meio da calcinação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) a temperaturas superiores a 1450°C, o que provoca a decomposição térmica do calcário, liberando CO_2. Esse processo é responsável por aproximadamente 60% das emissões totais da indústria cimenteira, enquanto o consumo energético representa os 40% restantes. Além disso, a queima de combustíveis fósseis, como carvão e coque de petróleo, nas plantas industriais agrava ainda mais o impacto ambiental do setor.

Esse problema é ainda mais significativo na China, o maior produtor mundial de cimento, responsável por mais de 50% da produção global. Com um volume superior a 2,3 bilhões de toneladas de cimento por ano, a China apresenta uma elevada intensidade de carbono, com cerca de 848 kg de CO_2 emitidos por tonelada de cimento produzido, em grande parte devido ao uso intensivo de carvão como fonte de energia nas plantas de produção. Outros países também enfrentam desafios semelhantes, com a Índia e os Estados Unidos figurando entre os

maiores emissores do setor. A Índia, segundo maior produtor mundial, fabrica aproximadamente 380 milhões de toneladas anuais, com um fator de emissão de cerca de 720 kg de CO_2 por tonelada de cimento. Já os Estados Unidos, quarto maior produtor global, fabricam cerca de 90 milhões de toneladas anuais, com um fator de emissão reduzido devido ao uso de tecnologias mais eficientes e combustíveis alternativos. Na União Europeia, as emissões são relativamente mais baixas, variando entre 600 e 700 kg de CO_2 por tonelada de cimento, devido a regulamentações ambientais rigorosas e ao uso de materiais cimentícios suplementares. O Brasil, maior produtor de cimento da América Latina, fabrica cerca de 60 milhões de toneladas anuais, adotando progressivamente práticas de sustentabilidade para mitigar as emissões. Apesar das crescentes iniciativas globais para reduzir a pegada de carbono da indústria, a dependência de combustíveis fósseis e a dificuldade de implementação de novas tecnologias ainda representam obstáculos significativos para a descarbonização do setor (World Economic Forum, 2021).

A Figura 1 ilustra de forma resumida a cadeia produtiva do cimento Portland, exemplificando suas etapas principais e o fluxo de produção, destacando os pontos críticos para a geração de emissões de CO_2.

Figura 1 - Processo de produção cimento portland



Adaptado de: CEMBUREAU, 2020.

Na China, maior produtora mundial de cimento, as emissões de CO_2 são particularmente elevadas devido à dependência do carvão como principal fonte de energia para os fornos de clínquer. O país responde por mais de 50% da produção global de cimento, o que representa um grande desafio para a redução da pegada de carbono do setor. Por outro lado, na União Europeia, as emissões são relativamente mais baixas, variando entre 600 e 700 kg de CO_2 por tonelada de cimento. Isso se deve principalmente às regulamentações ambientais rigorosas, que incentivam o uso de combustíveis alternativos e a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes e escória de alto-forno. Essas abordagens não só reduzem as emissões, mas também contribuem para a economia circular e para o desenvolvimento sustentável da indústria de cimento (World Economic Forum, 2021).

O tipo de combustível utilizado nos fornos de clínquer tem um papel crucial nas emissões de CO_2. Combustíveis fósseis, como carvão e óleo, são os mais intensivos em carbono, mas alguns países têm adotado a co-incineração de resíduos e biomassa, o que pode reduzir as emissões em até 18% em comparação ao uso exclusivo de combustíveis fósseis (Worrell *et al*, 2001). Para mitigar o impacto ambiental, a indústria tem explorado tecnologias alternativas, como a produção de cimento de baixa emissão, que utiliza misturas de clínquer com materiais suplementares, como escórias e cinzas volantes, reduzindo significativamente as emissões. Além disso, a adoção de fornos de alta eficiência energética diminui a necessidade de combustíveis e, consequentemente, as emissões.

A substituição de parte do clínquer por materiais como pozolana, escória de alto-forno ou cinzas volantes é uma estratégia eficaz que pode reduzir o fator de emissão em até 25 a 30%. Outra solução promissora é o desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS), capazes de capturar até 90% das emissões de CO_2 das fábricas de cimento. Contudo, essas tecnologias ainda estão em desenvolvimento e enfrentam desafios econômicos e de infraestrutura significativos. Diante desse cenário, redes de pesquisa como a CYTED e a RINCIMCI desempenham um papel essencial ao promover a cooperação científica e tecnológica entre pesquisadores ibero-americanos, impulsionando a implementação dessas estratégias sustentáveis.

2.3. O PROGRAMA CYTED E A REDE RINCIMCI

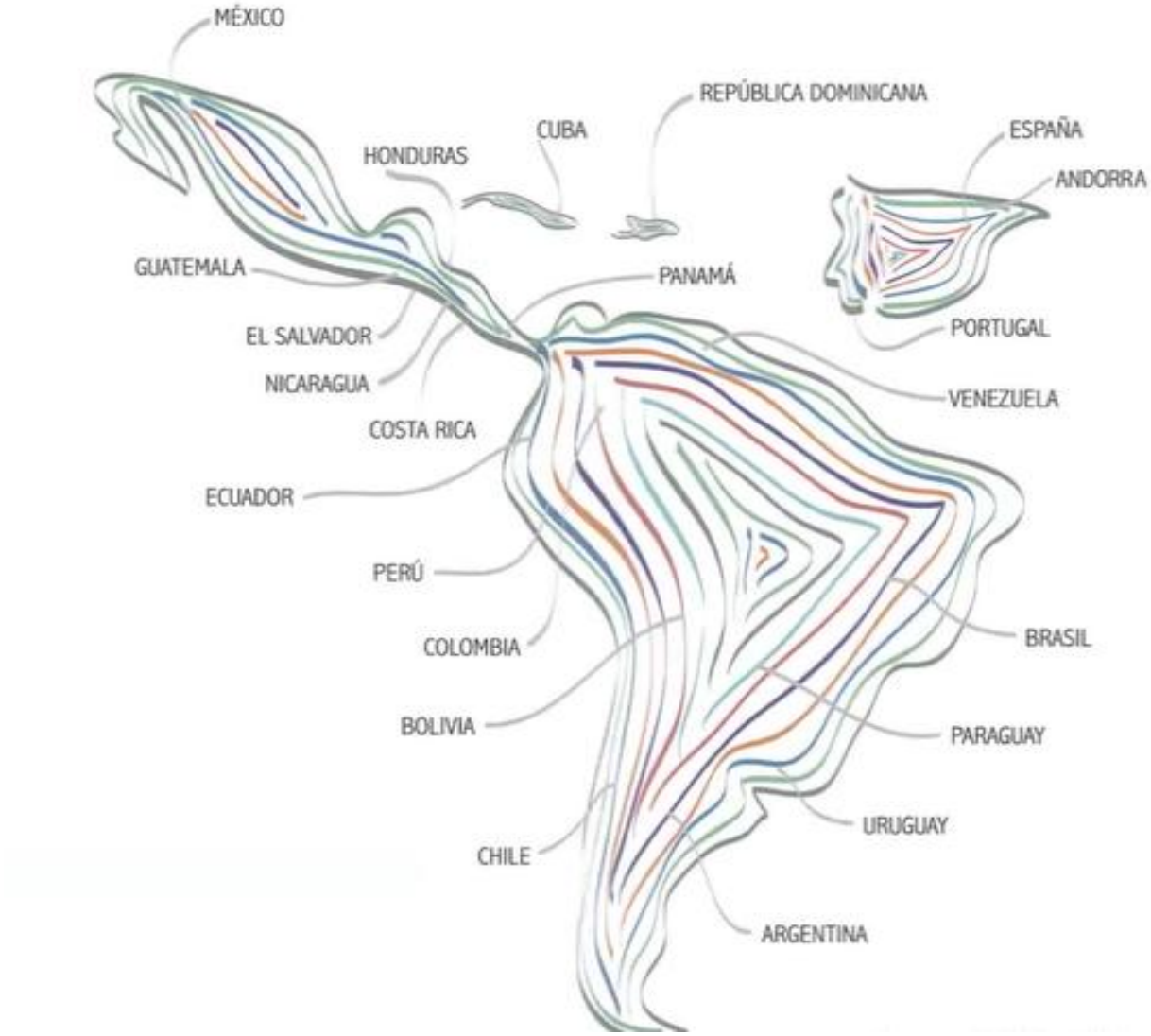
O CYTED (Programa Ibero-Americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento) é uma iniciativa voltada para o fortalecimento da cooperação científica e tecnológica entre os países ibero-americanos, promovendo o desenvolvimento regional e o avanço do conhecimento em diversas áreas. Criado em 1984, o programa surgiu como uma resposta à necessidade de estimular a colaboração entre os países da região.

Dentro desse contexto, a RINCIMCI destaca-se como uma iniciativa específica do CYTED. A rede concentra-se em abordar os desafios relacionados às emissões de carbono na indústria de materiais cimentícios na região ibero-americana, visando o cumprimento das metas climáticas de redução de emissões até 2050, em conformidade com os compromissos internacionais de combate às mudanças climáticas.

A RINCIMCI foi estabelecida por meio da colaboração entre instituições de pesquisa, universidades, empresas e governos dos países participantes do programa CYTED, com o objetivo de desenvolver e implementar estratégias, tecnologias e práticas sustentáveis na indústria de materiais cimentícios. A rede visa promover processos de produção mais eficientes e limpos, incentivar o uso de tecnologias de baixo carbono e fomentar a pesquisa de novos materiais alternativos. Além disso, a RINCIMCI se dedica à disseminação de conhecimento, contribuindo para a redução das emissões de carbono na produção de materiais cimentícios. A iniciativa também se alinha aos esforços globais de mitigação das mudanças climáticas e ao desenvolvimento sustentável da região ibero-americana.

Os países participantes da RINCIMCI são Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Espanha, Peru e Portugal. No Brasil, destacam-se como membros a Universidade de Brasília (UNB), a Universidade de São Paulo (USP), além das empresas Votorantim e Ciplan. No contexto da RINCIMCI, foi criado um grupo de pesquisa na UNB, liderado pelo professor João Henrique da Silva Rêgo, que também coordena a rede no Brasil. O grupo, composto por professores, alunos de graduação e pós-graduação, assim como parceiros de outras universidades, possui um compromisso de participação até 2028. A Figura 2 ilustra os países integrantes do CYTED:

Figura 2 - Países integrantes da rede RINCIMCI



Fonte: CYTED, 2024.

2.4. ESTRATÉGIAS PARA A REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO_2 PELA CADEIA PRODUTIVA DE CIMENTO

A indústria de cimento é reconhecida como uma das principais fontes de emissão de dióxido de carbono (CO_2) em todo o mundo, representando uma significativa parcela das emissões globais. Como resultado, a busca por estratégias eficazes de redução de emissões dentro da cadeia produtiva de cimento tornou-se uma prioridade crítica para enfrentar os desafios ambientais e climáticos emergentes (WBCSD, 2012).

O cimento é um componente fundamental na construção civil e infraestrutura, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento econômico e social. No entanto, sua produção tradicionalmente envolve processos intensivos em energia e emissões, contribuindo significativamente para o aquecimento global e outras formas de degradação ambiental.

Diante desse cenário, a rede RINCIMCI está elaborando diversas estratégias viáveis junto a seu grupo de pesquisa, visando diminuir os impactos ao longo da cadeia produtiva. Esse projeto buscará integrar os estudos associados ao clínquer e cimento, apresentando as estratégias de mitigação relacionadas por temas.

2.4.1. Cimento Portland

2.4.1.1. Cimento Com Baixo Teor de Clínquer

O cimento Portland comum é composto predominantemente por clínquer, representando de 95% a 100% de sua composição, juntamente com sulfatos de cálcio (como o gesso) e uma pequena porcentagem de adições, que pode variar de 0% a 5%. Essas adições podem incluir escória granulada de alto-forno, material pozolânico ou material carbonático. Em geral, o cimento Portland padrão contém de 95% a 97% de clínquer e 3% a 5% de gesso. No entanto, a quantidade de clínquer utilizada na produção do cimento pode ser reduzida pela incorporação de materiais alternativos. Globalmente, o cimento produzido com materiais alternativos contém, em média, 78% de clínquer, embora essa porcentagem possa variar significativamente de uma região para outra (WBCSD, 2012). Os principais materiais adicionados ao cimento em substituição ao clínquer são escória de alto-forno, cinzas volantes, pozolanas, ganga, calcário e cinzas vulcânicas. A disponibilidade desses materiais alternativos varia significativamente. Por exemplo, regiões com alta produção de ferro gusa oferecem grande quantidade de escória, enquanto as cinzas volantes são mais facilmente encontradas em áreas próximas a usinas de energia a carvão. A substituição do clínquer por esses materiais é crucial, pois o clínquer é a etapa mais intensiva em carbono no processo de produção de cimento, sendo responsável por cerca de 60 a 70% das emissões totais de CO_2 na fabricação do cimento (CEMBUREAU, 2013).

A substituição do clínquer por outros materiais no cimento pode resultar em uma significativa redução das emissões de CO_2 por tonelada de cimento, devido ao menor percentual de clínquer na composição. Estima-se que uma redução para 70% do clínquer no cimento pode

diminuir essas emissões em cerca de 4%. Além disso, estudos mostram que cimentos com baixo teor de clínquer podem conter até 50% menos clínquer, com a adição de materiais cimentícios suplementares (MCS). Isso não apenas reduz as emissões de carbono, mas também melhora propriedades do cimento, como durabilidade, resistência química e trabalhabilidade (WBCSD, 2012).

A. Materiais Cimentícios Suplementares

I. Resíduos Agroindustriais

O uso de resíduos agroindustriais tem se tornado um tema de crescente interesse, sendo objeto de inúmeras pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis. Grande parte desses resíduos possuem altos teores de sílica e/ou alumina, características que os tornam excelentes adições pozolânicas no cimento Portland. Essas adições promovem reações que formam fases hidratadas no concreto, melhorando significativamente seu desempenho, como a durabilidade e resistência mecânica. (Azevedo *et al.*, 2021)

A utilização de resíduos agrícolas e industriais na produção de concreto é uma prática global, motivada tanto pela necessidade de encontrar soluções para a gestão de resíduos quanto pela busca por alternativas sustentáveis na construção civil. A geração contínua e em grande escala desses resíduos representa um desafio ambiental sério, não apenas pela poluição que causam, mas também pela crescente necessidade de espaço para disposição. Isso impõe um desafio tanto para as indústrias quanto para as empresas agrícolas, que precisam lidar com os resíduos de forma eficaz e sustentável.

Nesse contexto, a avaliação da reatividade pozolânica de materiais para uso como aditivos no cimento tornou-se cada vez mais importante. A incorporação desses materiais não só contribui para a sustentabilidade da produção de cimento, mas também oferece vantagens econômicas e tecnológicas, como a redução do consumo de clínquer, menor emissão de CO_2 e o melhoramento das propriedades do concreto.

Um exemplo significativo de resíduo sólido com potencial para aplicação na construção civil é a borracha de pneus. Gerado em grandes quantidades ao redor do mundo, este resíduo é amplamente estudado para diversas aplicações, como em revestimentos asfálticos, impermeabilizações e enchimentos em argamassas para alvenaria. Estudos recentes

demonstram que a incorporação de cinzas volantes e resíduos de borracha de pneus em argamassas à base de cimento Portland pode resultar em misturas com propriedades tecnológicas adequadas para o uso em alvenaria. Concretos que incluem 10% de cimento Portland, 60-70% de cinzas volantes e 20-30% de partículas de borracha de pneus têm se mostrado promissores, não apenas em termos de sustentabilidade, mas também em desempenho técnico, contribuindo assim para a redução dos impactos ambientais e para a economia circular.

II. *Pozolanas Naturais*

As pozolanas podem proporcionar uma economia de até 40% no consumo de combustível, além de reduzir significativamente a emissão de CO_2, sem comprometer a qualidade do cimento. Adicionalmente, as pozolanas oferecem vantagens como a prevenção da expansão causada pelo ataque de sulfatos, a diminuição do calor de hidratação e, em alguns casos, uma resistência à compressão superior à do cimento Portland comum (Sanjuán *et al*., 2023).

Atualmente, a maior parte do cimento produzido globalmente é misturado com Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), como as pozolanas. O efeito da incorporação dessas pozolanas naturais em argamassas e concretos depende de vários fatores, incluindo a natureza, a finura e o teor da pozolana utilizada, entre outros parâmetros. Pesquisas indicam que os cimentos misturados não apenas melhoram a durabilidade, mas também aumentam a resistência ao ataque de sulfatos, prolongam o tempo de pega, reduzem a permeabilidade à água e diminuem o calor de hidratação (KHAN; ALHOZAIMY, 2011).

No que diz respeito à resistência mecânica, os resultados encontrados na literatura são variados, visto que essa característica depende de uma série de fatores. Por exemplo, estudos demonstram que concretos contendo até 15% de pozolana natural como substituto parcial do cimento apresentam desempenhos comparáveis ao concreto contendo 20% de cinza volante, o que se aproxima muito do desempenho do concreto convencional. Além disso, foi relatado que o concreto autoadensável, onde uma alta porcentagem de cimento Portland foi substituída por cinza vulcânica, exibiu boa trabalhabilidade, resistência à penetração de cloretos e propriedades adequadas de resistência à compressão (Khan; Alzhoaimy, 2011).

III. *Resíduos Industriais*

Os resíduos industriais e de construção referem-se aos materiais sólidos gerados em canteiros de obras e durante a demolição total ou parcial de edificações e infraestruturas. Esses resíduos são frequentemente resultado do excesso de materiais encomendados ou do manuseio inadequado durante a construção, enquanto na demolição, surgem da remoção de estruturas antigas para dar lugar as novas construções. Desastres naturais também podem contribuir significativamente para a geração desses resíduos.

Infelizmente, grande parte desses resíduos é descartada de maneira inadequada, sendo direcionada para aterros ou simplesmente despejada de forma irregular. Esse descarte inadequado acarreta uma série de problemas sociais e ambientais, como riscos à segurança, contaminação do solo e das fontes de água. Para mitigar esses impactos, tecnologias de reciclagem para resíduos de construção e demolição (C&DW) têm sido desenvolvidas, permitindo que esses materiais sejam reciclados e reutilizados, especialmente na produção de concreto com agregados reciclados. (Al Saheen *et al*., 2022).

As propriedades do concreto produzido com agregados reciclados são, em muitos casos, comparáveis às do concreto tradicional, feito com agregados naturais, o que o torna uma alternativa viável na construção. No entanto, a utilização de agregados provenientes de resíduos de construção é limitada, principalmente devido à alta absorção de água desses materiais. Isso exige o desenvolvimento de métodos eficazes para o manejo desses resíduos, a fim de minimizar seu impacto ambiental (Al Saheen *et al*., 2022).

Resíduos de construção possuem um carbono incorporado mais elevado (0,213 kg CO_2/kg) em comparação com os agregados naturais (0,0075 kg CO_2/kg), o que limita os benefícios ambientais da substituição de agregados naturais por resíduos de construção. Entretanto, uma alternativa viável para reduzir o impacto ambiental da construção é o uso do pó de resíduos de construção como Material Cimentício Suplementar (SCM), substituindo parcialmente o cimento Portland, que tem uma pegada de carbono significativamente maior (0,912 kg /kg). Essa abordagem contribui para uma construção mais sustentável e para a redução das emissões de CO_2 (Zito; Irassar; Rahhal, 2023).

IV. *Argila Calcinada*

As argilas calcinadas são classificadas como aditivos mineralógicos de grande importância para a produção de concreto. Sua rápida reação pozolânica promove um desenvolvimento microestrutural acelerado, o que resulta em melhorias significativas no desempenho mecânico do concreto desde os estágios iniciais de cura. Esse potencial tem sido explorado em projetos de cimentos de baixo carbono, onde as argilas calcinadas atuam como Materiais Cimentícios Suplementares (SCM), substituindo parte do clínquer, o que contribui para a redução das emissões de CO_2. (Dhandapani *et al*., 2022)

Os avanços na análise mineralógica das argilas, inicialmente impulsionados pelas indústrias extrativas, como a exploração de petróleo e gás, revelaram a complexidade dessas argilas. Na indústria de petróleo, a mineralogia das argilas é utilizada para decodificar sequências de rochas de reservatório ou avaliar a maturidade das rochas fonte de hidrocarbonetos. Já em outras indústrias, como a da construção civil, características mais acessíveis, como a composição química e a cor, têm sido usadas para definir critérios de aceitação das argilas. (Juenger; Snellings; Bernal, 2019).

Estudos recentes indicam que a reatividade e o desempenho das argilas calcinadas como MCS estão fortemente ligados à composição mineralógica da argila bruta. Argilas kaoliniticas de baixo grau, contendo entre 30-40% de caulinita em peso, assim como outras argilas comuns e impuras, podem apresentar propriedades cimentícias aceitáveis após a calcinação. Tipos de argilas como caulinita, illita, montmorilonita, bentonita e esmectita, disponíveis tanto em formas puras quanto mistas, têm mostrado grande potencial quando calcinadas e adicionadas ao cimento Portland. (Snellings *et al*., 2022)

A inclusão dessas argilas no cimento Portland altera significativamente os produtos de hidratação, o que influencia diretamente na durabilidade do concreto produzido com esses cimentos. A combinação das alterações químicas resultantes da reação pozolânica e da formação de carboaluminato, associada à modificação microestrutural, gera características de desempenho bastante interessantes no concreto. Esse efeito é observado tanto quando as argilas calcinadas são utilizadas como substituição única quanto em combinação com calcário, mostrando-se uma estratégia promissora para a produção de cimentos mais sustentáveis e duráveis.

V. *Cimentos LC³*

O Cimento de Calcário Calcinado (LC³), desenvolvido por Karen Scrivener em parceria com instituições da Suíça, Índia e Cuba, é composto por clínquer, gesso, metacaulim (argila calcinada) e fíler calcário. Ele pode substituir até 50% do clínquer sem perder resistência à compressão.

Assim como o cimento CP IV (Portland Pozolânico), que utiliza pozolanas para reduzir o teor de clínquer, o LC³ emprega materiais acessíveis, como argila calcinada e calcário, para diminuir as emissões de CO_2 e o consumo de energia. Ambos os cimentos combinam sustentabilidade, durabilidade e desempenho mecânico, sendo alternativas promissoras para a construção civil (Scrivener et al., 2018).

B. Energia Elétrica

Na fabricação de cimento, além das emissões de gases de efeito estufa, o consumo energético é um fator crítico. O consumo global de energia para a produção de cimento está estimado entre 7 e 10 bilhões de GJ/ano, e as emissões de CO_2 correspondem a aproximadamente 6-7% da geração mundial (Mehta & Monteiro, 2006). Dentre os principais consumidores de energia elétrica na fabricação de cimento, destacam-se os moinhos de cimento, matérias-primas e carvão, além dos ventiladores, particularmente no sistema do forno e nos moinhos de cimento. O consumo específico de energia elétrica nesse processo normalmente varia entre 90 e 130 kWh por tonelada de cimento. (Mehta Monteiro, 2006).

A indústria cimenteira possui um consumo energético elevado, representando entre 25% e 35% dos custos diretos totais de produção. Esse alto consumo sublinha a necessidade urgente de aprimorar a eficiência energética, tanto para reduzir custos, quanto para diminuir as emissões de carbono. De acordo com a base de dados do CSI, em 2012, a indústria cimenteira brasileira registrou um consumo de energia elétrica de 73 kWh por tonelada de clínquer produzido e 103 kWh por tonelada de cimento.

Além do consumo de energia elétrica, os custos com energia térmica também são significativos e variam conforme o tipo de processo adotado pela fábrica. No Brasil, o “processo por via seca” é amplamente utilizado, com sistemas de pré-aquecimento e pré-calcinação. O

consumo específico de energia térmica no país gira em torno de 3300 MJ por tonelada de clínquer (ABCP, 2014).

Dados do SNIC (2010) revelam que praticamente toda a capacidade instalada no Brasil utiliza a rota seca, resultando em uma expressiva redução no uso de combustíveis quando comparado a processos menos eficientes. Os sistemas de pré-aquecedores e pré-calcinadores, amplamente implementados, reaproveitam os gases quentes para pré-aquecer a matéria-prima antes de sua entrada no forno, reduzindo ainda mais o consumo de combustíveis. No Brasil, cerca de 99% da produção de cimento é realizada em fornos via seca com pré-aquecedores e pré-calcinadores, superando a média mundial, onde esses tipos de fornos representam 87% da produção, segundo levantamento da CSI (ABCP, 2014).

2.4.2. Clínquer

2.4.2.1. Matérias Primas Alternativas Descarbonatadas

Na produção de clínquer, que é o principal componente do cimento, o processo tradicional envolve a calcinação de calcário (carbonato de cálcio, $CaCO_3$) em altas temperaturas, o que resulta na liberação de aproximadamente 0,53 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) por tonelada de clínquer produzido. Esse processo é uma das principais fontes de emissões de CO_2 na indústria de cimento, uma vez que o calcário é uma matéria-prima carbonatada.

Matérias-primas descarbonatadas, por outro lado, são materiais que não contêm carbonatos e, portanto, não liberam CO_2 durante a calcinação. Exemplos dessas matérias-primas incluem argilas calcinadas, escórias de alto-forno, cinzas volantes e outros subprodutos industriais. Quando essas matérias-primas são utilizadas na produção de clínquer ou como substitutos parciais do clínquer no cimento, o processo de produção se torna menos intensivo em carbono. De acordo com estudos recentes, a substituição de 30% do clínquer por argilas calcinadas pode reduzir as emissões de CO_2 em até 40% (Batis *et al.*, 2005)

Ao substituir parcialmente o clínquer por materiais descarbonatados, como as argilas calcinadas (por exemplo, o metacaulim), é possível reduzir significativamente as emissões de CO_2 associadas à produção de cimento. Além disso, o uso dessas matérias-primas pode melhorar algumas propriedades do cimento, como a durabilidade e a resistência química.

Estudos indicam que o uso de metacaulim como substituto pode aumentar a durabilidade do concreto em até 15%, ao melhorar a resistência à penetração de cloretos (Batis *et al*., 2005).

A. Substituição de Combustíveis e Emissões Zero

O principal componente do cimento Portland (CP) comercial é o silicato tricálcico (alita), que, juntamente com o silicato dicálcico (belita), confere ao cimento suas propriedades mecânicas. O Ca_3SiO_5 (alita) desenvolve resistência à compressão em idades iniciais (cerca de 1 mês), enquanto o Ca_2SiO_4 (belita) contribui para a resistência em idades mais avançadas (cerca de 1 ano) devido à sua reatividade lenta. Cimentos alternativos que têm o silicato dicálcico (Ca_2SiO_4) como seu principal componente oferecem algumas vantagens, como menor demanda de energia e de material de óxido de cálcio em comparação com o silicato tricálcico, além de menores emissões de dióxido de carbono durante a decomposição do calcário (Bentacur-Granados *et al*., 2023)

Para a produção em massa desses cimentos alternativos, métodos como a pirólise por spray de chama (FSP) são altamente eficientes para a formação de nanopartículas de Ca_2SiO_4. O FSP é considerado um dos processos de produção mais viáveis devido à sua alta eficiência e baixo impacto ambiental em comparação com outros métodos. No entanto, para garantir a produção bem-sucedida das fases de belita, é crucial compreender o efeito das condições do processo sobre características como mineralogia e reatividade, uma vez que o ambiente de combustão pode influenciar significativamente o sistema.

B. Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes

Tradicionalmente, o clínquer de cimento é produzido através da calcinação de uma mistura de calcário (principalmente $CaCO_3$) e outros materiais, como argila, a uma temperatura aproximada de 1450°C. No entanto, a produção desse clínquer é altamente intensiva em energia e gera emissões significativas de CO_2 (Batis *et al*., 2005). Com o objetivo de reduzir essa demanda energética e minimizar as emissões de carbono, novos tipos de clínquer estão sendo desenvolvidos, incluindo a substituição parcial de matérias-primas tradicionais por resíduos industriais, como cinzas volantes ou escória de alto-forno, que são subprodutos de outras

indústrias. Além disso, pesquisas têm sido direcionadas para a redução da temperatura de calcinação, o que pode ser alcançado pela modificação da composição química das matérias-primas. Os mineralizantes, substâncias que quando adicionadas ao processo de fabricação do clínquer, podem reduzir a temperatura necessária para a formação das fases desejadas, como o silicato tricálcico (C_3S), principal componente responsável pela resistência do cimento, permitindo assim a redução do consumo de energia e das emissões de CO_2 durante a produção.

Nesse contexto, um dos exemplos pesquisados são os cimentos de sulfato de cálcio-alumínio (CSA) que tem sido amplamente estudados por cientistas e produtores industriais de cimento desde a década de. Particularmente, na última década, os estudos se tornaram mais profundos e especializados em aspectos como a estrutura cristalina, a cinética de hidratação e outras características químicas, físicas e mineralógicas do CSA. Os cimentos CSA destacam-se por exigirem menor energia para sua produção e por emitirem aproximadamente 35% menos CO_2 em comparação ao Cimento Portland (CP), além de apresentarem boa adaptabilidade ao processo moderno de produção industrial de cimento.

Devido a esses benefícios e vantagens, o cimento CSA tem sido considerado um cimento de baixo CO_2 e foi incluído no portfólio de diferentes produtores industriais, despertando grande interesse pelos impactos tanto do ponto de vista ambiental quanto funcional. Por essas características, o cimento CSA tem sido conhecido sob o nome genérico de "terceira série de cimento", sendo visto como uma alternativa promissora ao Cimento Portland (Berrio; Tobón; De La Torre, 2022).

C. Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)

Os conceitos de captura, armazenamento e utilização de CO_2 (Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS) são frequentemente aplicados na gestão de carbono e nas mudanças climáticas. Eles podem ser divididos em duas categorias principais: captura e armazenamento de CO_2 (Carbon Capture and Storage - CCS) e captura e utilização de CO_2 (Carbon Capture and Utilization - CCU). O CCS envolve a captura do dióxido de carbono gerado durante processos industriais ou de combustão, seguido por seu transporte e armazenamento em locais geológicos seguros, como reservatórios subterrâneos, evitando sua liberação na atmosfera. Já o CCU, por outro lado, vai além do simples armazenamento, buscando transformar o CO_2 capturado em novos produtos úteis, como combustíveis sintéticos,

materiais de construção e produtos químicos, promovendo assim a economia circular e reduzindo a dependência de recursos fósseis (CEMBUREAU, 2020).

Ambas as abordagens são essenciais na transição para uma economia de baixo carbono, sendo o CCS visto como uma solução de curto a médio prazo para a mitigação das emissões, enquanto o CCU oferece potencial para aplicações mais sustentáveis a longo prazo.

2.5. DESAFIOS NA REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO_2 PELA CADEIA PRODUTIVA DE CIMENTO PORTLAND

A crescente conscientização sobre as mudanças climáticas trouxe a redução das emissões de carbono para o centro das discussões globais. Nesse contexto, a indústria do cimento se destaca por ser responsável por uma parcela significativa dessas emissões, o que exige uma atenção especial. Esse impacto é principalmente decorrente das emissões diretas que ocorrem durante a calcinação do calcário e a queima de combustíveis fósseis nos fornos, processos que respondem pela maior parte do CO_2 liberado na produção de cimento.

O cimento Portland, em particular, libera grandes quantidades de CO_2, especialmente durante a calcinação do calcário, quando o carbonato de cálcio é aquecido e se decompõe, liberando dióxido de carbono. Embora a produção de cimento seja uma das principais fontes industriais de emissões de CO_2, ela é superada apenas pela geração de eletricidade e pela indústria de transportes, o que evidencia a necessidade de intervenções urgentes para mitigar esses impactos.

No entanto, a adoção de tecnologias sustentáveis para reduzir essas emissões muitas vezes envolve custos iniciais elevados, o que pode ser um grande obstáculo para muitas empresas, especialmente em mercados altamente competitivos. Além disso, a resistência à mudança é um desafio comum em qualquer setor. Na indústria do cimento, essa resistência pode ser ainda maior devido a preocupações sobre a qualidade do produto final e a viabilidade econômica das novas tecnologias. Esses fatores complicam ainda mais o caminho para uma produção de cimento mais sustentável, mas também ressaltam a importância de políticas públicas e incentivos que possam facilitar essa transição.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho tem por objetivo reunir estruturas de mitigação da emissão de carbono na cadeia produtiva do cimento, através de processos mais eficazes na produção do cimento e clínquer. Primeiramente, foram estabelecidas as etapas de estudo, começando pela seleção dos artigos, seguida da leitura detalhada e, posteriormente, da análise e compilação das pesquisas.

Os artigos foram escolhidos com base na delimitação de tempo imposta pelo professor João Henrique da Silva Rêgo, no período de 2021 a 2023. Além disso, a seleção incluiu exclusivamente estudos conduzidos por colaboradores da rede RINCIMCI. Todos os artigos selecionados foram lidos e analisados, sendo então classificados em uma tabela de temas. Essa classificação permitiu uma compreensão mais clara dos resultados para cada tema abordado, facilitando a identificação de estratégias mais eficazes para a redução das emissões de carbono na produção de cimento.

3.1. ESCOLHA DOS ARTIGOS

O primeiro passo consistiu no acesso à base de dados da rede RINCIMCI, que reúne estudos dos colaboradores e parceiros, escolhendo os artigos relacionados a mitigação de carbono na cadeia de produção do cimento a partir dos temas de cimento e clínquer.

Utilizando as bases de colaboradores disponíveis no sistema CYTED, foi aplicada uma filtragem temporal, restringindo a busca a estudos publicados entre 2021 e 2023. Essa delimitação assegurou que os artigos selecionados fossem recentes e estivessem em consonância com as inovações e desafios atuais do setor.

Assim, o conjunto de artigos escolhido foi aquele que oferece uma base sólida para a identificação de lacunas e o desenvolvimento de novas estratégias para a mitigação de carbono na indústria cimenteira.

3.2. LEITURA E SÍNTESE DOS ARTIGOS

Após a seleção dos artigos, o próximo passo na metodologia deste Projeto Final envolveu a leitura detalhada e a análise crítica das pesquisas escolhidas. A partir das

informações coletadas, cada artigo foi analisado de forma a extrair os dados mais relevantes, que estão organizados por temas de pesquisa na tabela anexada ao final do projeto, e também exemplificada na etapa de resultados e discussão.

Essa tabela foi uma ferramenta fundamental para a sistematização das informações, permitindo uma visão focada para cada pesquisa, assim como o potencial de cada tema. Ela inclui os campos específicos como título do artigo, nomes dos autores pertencentes a RINCIMCI, periódico que foi publicado e ano da publicação, assim como uma breve síntese de seus resultados.

A organização dos estudos facilita a comparação entre as pesquisas, permitindo a identificação das tecnologias mais eficazes e inovadoras para a mitigação do carbono na produção de cimento. Além disso, a divisão em blocos temáticos possibilita uma análise estruturada dos avanços e desafios do setor. Essa abordagem também foi essencial para identificar lacunas nas pesquisas atuais e mapear os países que necessitam de maior desenvolvimento em áreas ainda pouco exploradas, contribuindo para direcionar esforços e investimentos em inovação, resultando em um avanço significativo para a indústria cimenteira.

3.3. ANÁLISE E COMPILAÇÃO DAS PESQUISAS

Com a tabela elaborada contendo as informações detalhadas de cada artigo, a próxima etapa consistiu na compilação e análise das pesquisas. Nesse processo, os artigos foram organizados em tópicos de pesquisa, divididos conforme o intuito de cada estudo, a metodologia empregada, as tecnologias utilizadas e os resultados alcançados. Essa divisão permitiu a criação de blocos de temas específicos, facilitando uma análise mais aprofundada e comparativa entre os diferentes estudos.

Ao segmentar os artigos dessa forma, foi possível identificar padrões e tendências nas abordagens de mitigação de carbono, bem como avaliar a eficácia das diversas tecnologias aplicadas. Além disso, essa organização contribuiu para uma compreensão mais clara das áreas que necessitam de maior atenção ou onde existem lacunas significativas, orientando, assim, futuras pesquisas e inovações no campo da produção sustentável de cimento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e analisados os principais resultados obtidos a partir da revisão das pesquisas desenvolvidas no âmbito da rede RINCIMCI, com foco na mitigação das emissões de carbono na produção de clínquer e cimento. A análise realizada buscou identificar as principais estratégias adotadas para a descarbonização da indústria cimenteira, reunindo informações sobre os avanços nas pesquisas em relação a cada colaborador da rede e quais temas vêm sendo mais aprofundados.

Os estudos analisados foram categorizados em diferentes abordagens tecnológicas para a mitigação das emissões, destacando-se as seguintes frentes de pesquisa:

Redução da Proporção de Clínquer no Cimento: O uso de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), como pozolanas naturais, escória de alto-forno, cinzas volantes e argilas calcinadas, tem sido amplamente estudado. Esses materiais permitem reduzir a intensidade de carbono do cimento sem comprometer suas propriedades mecânicas, além de contribuir para a economia circular ao reaproveitar resíduos industriais e agroindustriais.

Substituição de Combustíveis Fósseis**:** A queima de combustíveis fósseis nos fornos de clínquer é responsável por uma parcela significativa das emissões da indústria cimenteira. Alternativas como a biomassa, resíduos agroindustriais e combustíveis derivados de resíduos urbanos vêm sendo avaliadas como fontes energéticas menos intensivas em carbono, com potencial para reduzir em até 18% as emissões relacionadas ao processo de fabricação.

Matérias-Primas Descarbonatadas: A substituição parcial do calcário por materiais descarbonatados, como argilas calcinadas e subprodutos industriais, tem se mostrado uma alternativa promissora para reduzir as emissões diretas associadas à calcinação. Além disso, novos tipos de clínquer, como os baseados em silicato dicálcico (belita), apresentam menor demanda energética para produção e menor pegada de carbono.

Tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS): Algumas pesquisas analisadas exploram soluções para capturar e reutilizar o CO_2 gerado na produção de cimento. O armazenamento geológico e a conversão do CO_2 em novos produtos, como materiais de construção, estão entre as estratégias mais promissoras.

Eficiência Energética na Produção: O consumo de energia na indústria cimenteira representa um fator crítico tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. A modernização dos processos produtivos, como a otimização de fornos e a recuperação de calor

residual, tem sido investigada como meio de reduzir a demanda energética e, consequentemente, as emissões associadas.

A análise dos estudos revisados permitiu mapear as tendências mais relevantes na busca por uma indústria cimenteira mais sustentável, bem como identificar lacunas de pesquisa que precisam ser preenchidas para viabilizar a transição para uma produção de cimento de baixo carbono. Além disso, a colaboração entre os países membros da rede RINCIMCI se mostrou fundamental para o avanço das pesquisas, promovendo o intercâmbio de conhecimentos e tecnologias que podem acelerar a implementação dessas estratégias.

Nos tópicos subsequentes, os principais achados das pesquisas serão discutidos em maior detalhe, destacando os impactos resultados de cada abordagem, as lacunas que ainda precisam ser preenchidas ou que precisem de mais desenvolvimento, a participação dos colaboradores da rede de pesquisa em relação aos temas, assim como uma breve síntese de todas as pesquisas resumindo de forma simplificada os resultados e abordagens de cada pesquisa. É importante ressaltar também, que o levantamento dos colaboradores da RINCIMCI é fundamente para que haja uma maior integração entre países e grupos de pesquisa, permitindo alavancar o potencial de desenvolvimento dos temas e participação da rede de forma ativa na indústria de produção do cimento.

4.1. CLÍNQUER

4.1.1. Novos tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes

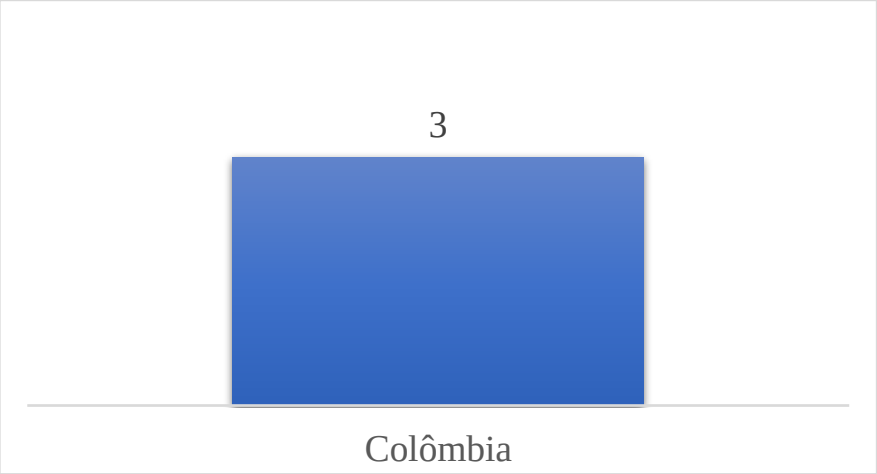
Nesta seção, foram analisados três artigos que investigam a substituição de combustíveis e materiais na produção de clínquer, com foco na redução da demanda energética e na minimização das emissões de carbono. Os artigos, publicados entre 2021 e 2023, apresentam os principais avanços e desafios relacionados ao desenvolvimento de novos tipos de clínquer e cimentos de baixo impacto ambiental.

Em relação à RINCIMCI, nota-se a relevante participação do membro do grupo de trabalho o **Prof. Jorge Iván Tobón**, da UNC/Colômbia, autor dos três artigos

Os cimentos de sulfato de cálcio-alumínio (CSA) apresentam vantagens significativas, como a redução de 35% nas emissões de CO_2 e menor consumo energético em comparação ao Cimento Portland (CP) (BERRIO; TOBÓN; DE LA TORRE, 2022). Estudos também destacam

um aglomerante de escória de aço curado com CO_2, que atingiu resistência à compressão 76% superior ao CP, com condições ótimas de carbonatação (finura de 529 m²/kg, 60°C e 2,5 bar). Além disso, a pirólise de spray de chama para clínqueres de belita, utilizando precursores metálicos, promoveu maior reatividade e formação rápida de C-S-H, indicando alternativas sustentáveis para a produção de cimento (Batis et al., 2005).

Gráfico 1 - Países idealizadores do Tema: Novos tipos de Clínqueres de Cimento e utilização de Mineralizantes



Fonte: O autor, 2025.

Quadro 1 - Dados das pesquisas relacionadas ao Tema 4.1.2:Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
Clinker-free CO2 cured steel slag-based binder: Optimal conditions and potential applications.	P.S. Humberta; J.P. Castro-Gomes; **H. Savastano Jr.**	Construction and Building Materials, 2019	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169	O artigo investiga um aglomerante produzido a partir de escória de aço e curado com CO_2. É identificado condições ótimas de carbonatação, como finura, temperatura e pressão parcial, alcançando resistência à compressão superior ao cimento Portland nas mesmas condições.
Kinetic model for ye'elimite polymorphs formation during clinkering production of CSA cement.	Ariel Berrio; **Jorge I. Tobón**; A.G. De la Torre.	Construction and Building Materials, 2022	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126336	O estudo desenvolveu um modelo cinético baseado na difusão geométrica para descrever a formação dos polimorfos de ye'elimita durante a produção de cimento CSA. O modelo permite controlar a proporção OY/CY no cimento, influenciando suas propriedades hidráulicas.
Influence of metallic precursors in the mineralogy and reactivity of belite cement clinkers obtained by flame spray pyrolysis.	Natalia B.; Jarol E. Molina; **Jorge I. Tobón.**	Materials Today Communications, 2022	https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101917	O artigo investiga a influência de precursores metálicos na mineralogia e reatividade de clínqueres de cimento belita obtidos por pirólise de spray de chama. Os resultados mostram que o uso de precursores de cálcio resulta em materiais amorfos com alta reatividade.

4.1.2. Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)

Nesta seção, foi analisado 1 estudo que aborda a redução de carbono na produção de cimento, incluindo o uso de carbonatação mineral de resíduos de forno (CKD), o gerenciamento de poeira em pedreiras, a reatividade álcali-sílica (ASR) em materiais cimentícios e iniciativas para aprimorar a sustentabilidade na cadeia do clínquer.

No contexto da RINCIMCI, observa-se a significativa contribuição do integrante do grupo de trabalho da Rede. Esse pesquisador está identificado em **negrito e sublinhado** no Quadro 3. Sendo ele, o **Prof. Jorge Iván Tobón**, da UNC/Colômbia, com um artigo.

A indústria do cimento, responsável por 7% das emissões globais de CO_2, pode reduzir seu impacto utilizando gases de exaustão e pó de forno de cimento (CKD) para produzir carbonatos minerais. O estudo avalia a carbonatação mineral do CKD (MCCKD) em uma planta convencional, comparando cenários com e sem abatimento total de emissões, usando matrizes energéticas fósseis e renováveis. Os resultados indicam que o MCCKD aumenta o custo de produção em até 30% para uma redução de 7–8% das emissões no cenário sem abatimento total, mas reduz custos em até 14% no cenário com abatimento total. O processo se mostra economicamente viável, especialmente quando associado a fontes renováveis, reduzindo custos de captura de CO_2 para 37,2–43,9 USD/t.

Gráfico 2 - Países idealizadores do Tema: Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono



Fonte: O autor, 2025.

Quadro 2 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.1.3: Outros Temas

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
On the road to net zero-emission cement: Integrated assessment of mineral carbonation of cement kiln dust	J. Pedraza; A. Zimmermann; **J. Tobón**; R.Schomäcker; N. Rojas.	Chemical Engineering Journal, 2021	https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127346	O artigo analisa a viabilidade do processo de carbonatação mineral de resíduos de forno de cimento (CKD) como uma solução para reduzir as emissões de CO2 na indústria de cimento. Os resultados indicam que o processo MCCKD pode reduzir em até 14% o custo de produção de cimento e diminuir as emissões de CO2 em aproximadamente 0,05 t CO2-eq/t de cimento em comparação com métodos convencionais.

Foram observados 4 artigos relacionados ao tema “Clínquer” com autoria de membros do RINCIMCI entre os anos de 2021 e 2023. Os artigos estão divididos nos tópicos referentes ao tema Clínquer de acordo com o ROADMAP CEMBUREAU (2021) da seguinte forma:

- Matérias-Primas Alternativas Descarbonatadas: 0 artigo publicado;
- Substituição de Combustíveis e Emissões Zero de Combustíveis: 0 artigo publicado;
- Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes: 3 artigos publicados;
- Eficiência térmica: 0 artigo publicado;
- Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS): 1 artigo publicado;

Observa-se que não foram encontrados artigos referentes aos temas “Matérias-Primas Alternativas Descarbonatadas”, “Substituição de Combustíveis e Emissões Zero de Combustíveis” e “Eficiência térmica”. Isso indica uma lacuna nos tópicos de pesquisa desenvolvida dentro da Rede RINCIMCI e que podem servir como oportunidades a serem aproveitadas. Já os temas “Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes” e “Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)” apresentaram respectivamente 3 e 1 artigos.

A seguir é apresentado a Tabela 1 com o número de artigos publicados pelos participantes da Rede RINCIMCI sobre o tema Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes entre 2021 e 2023.

Tabela 1 - Artigos publicados sobre o Tema Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes por colaboradores

Autor	**Pesquisas**
Jorge I. Tobón (UNC/Colômbia)	3

O pesquisador com maior número de publicações sobre o tema “Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes” foi o Prof. Jorge I. Tobón (UNC/Colômbia) com 3 artigos. Observa-se que não existiu parceria entre participantes da Rede RINCIMCI neste tema.

A seguir é apresentado a Tabela 2 com o número de artigos publicados pelos participantes da Rede RINCIMCI sobre o tema Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) entre 2021 e 2023.

Tabela 2 - Artigos publicados sobre o Tema Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) por colaboradores

Autor	Pesquisas
Jorge I. Tobón (UNC/Colômbia)	1

O pesquisador com maior número de publicações sobre o tema "Novos Tipos de Clínqueres de Cimento e Utilização de Mineralizantes" foi o Prof. Jorge I. Tobón (UNC/Colômbia) com 1 artigo. Observa-se que não existiu parceria entre participantes da Rede.

Gráfico 3 - Países idealizadores do tema Clínquer

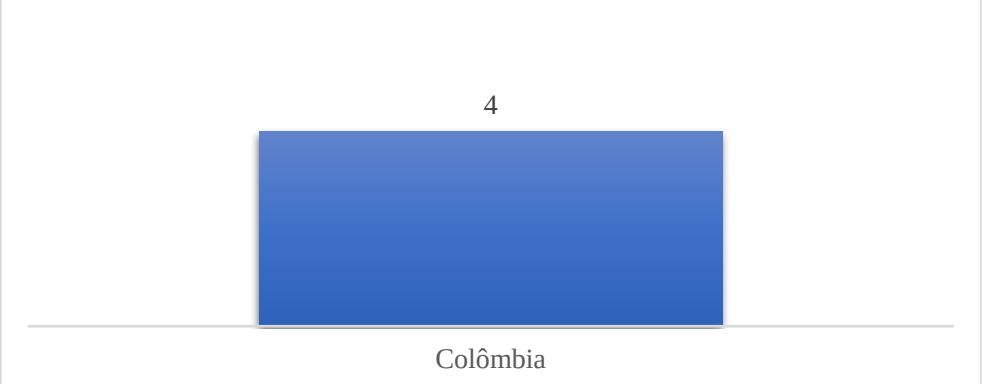
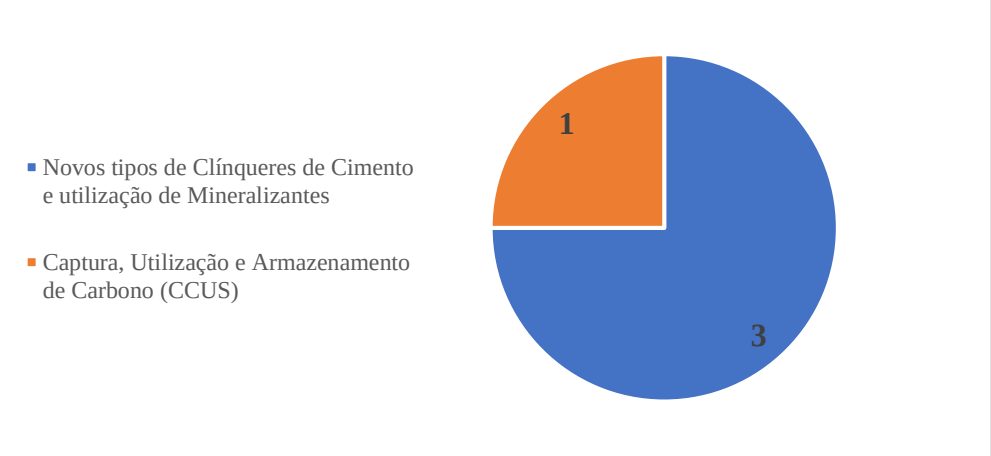


Gráfico 4 - Quantidade de pesquisas por tema



4.2. CIMENTO

4.2.1. Cimentos com Baixo Teor de Clínquer

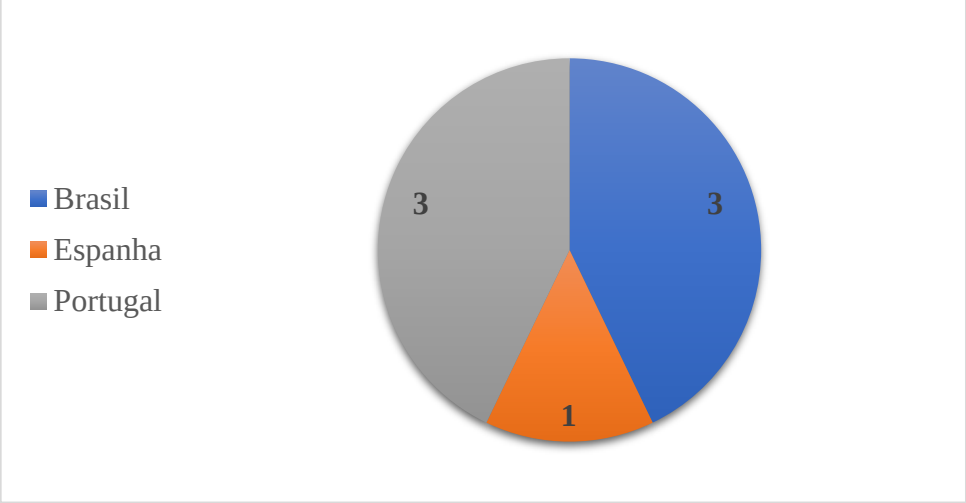
A. Resíduos Agroindustriais

Nesta seção, foram analisados seis artigos que investigam a redução do teor de clínquer no cimento Portland por meio da utilização de resíduos agroindustriais. Esses estudos destacam soluções inovadoras para mitigar as emissões de carbono e melhorar a eficiência da cadeia produtiva do cimento, promovendo alternativas mais sustentáveis na construção civil.

No contexto da RINCIMCI, observa-se a significativa contribuição de seus integrantes com mais pesquisas relacionadas, o **Prof. Holmer Savastano** da USP/Brasil, com três pesquisas e **Prof. Jorge de Brito** do IST/Portugal, com dois trabalhos, e **Prof. Moisés Frías** da IETCC/Espanha, com mais um trabalho.

É notável nas pesquisas que os resultados destacam o potencial dos resíduos agroindustriais como adições pozolânicas em substituição parcial ao clínquer. A incorporação de materiais como cinzas de ichu, palha e bagaço de cana-de-açúcar, casca de aveia, fibras de açaí e misturas ternárias com nanosílica melhorou propriedades como resistência mecânica, microestrutura e durabilidade, além de reduzir a emissão de CO_2 e o consumo de clínquer. Exemplos incluem o uso de cinza de ichu, que reduziu em 60% o coeficiente de difusão de cloretos (Frías et al., 2021), e cinzas de palha de cana, que aumentaram a fixação de cal em até 85% (De Brito et al., 2023).

Gráfico 5 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Resíduos Agroindustriais



Fonte: O autor, 2025.

Quadro 3 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Resíduos AgroIndustriais

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
Durability of eco-efficient binary cement mortars based on ichu ash: Effect on carbonation and chloride resistance, Cement and Concrete Composites	Caneda-Martínez, L.; **Frías, M**.; Sánchez, J.; Rebolledo, N.; Flores, E.; Medina, C.	Cement and Concrete Composites, 2022.	https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104608	O artigo investiga argamassas de cimento binário com 6% e 10% de cinza de ichu. Embora a adição de cinza aumente a suscetibilidade à carbonatação, as argamassas com 6% apresentam desempenho semelhante ao cimento Portland comum após 250 dias, com melhorias na densidade e resistência mecânica.
Study of the Pozzolanic Reactivity of Sugar Cane Straw Ashes (SCSA) Burned under Controlled Conditions	Rodrigues, M.S.; Payá, J.; Soriano, L.; Monzó, J.; Borrachero, M.V.; **Savastano, H., Jr**.; Beraldo, A.L.	Materials, 2023.	https://doi.org/10.3390/ma16216841	A pesquisa mostrou que as cinzas da palha de cana-de-açúcar (SCSA) calcinadas apresentam reatividade pozzolânica significativa, com fixação de cal de até 85% em pastas de cal hidratada. Essas cinzas melhoraram a resistência à compressão e refinaram a microestrutura dos sistemas cimentícios.
Enhancement of the reactivity of sugarcane bagasse ash for Pozzolan-Lime Paste: Effect of particle size	Potiron, C.O.; Bilba, K.; Ratiarisoa, R.V.; **Savastano, H., Jr**.; Arsene, M.A.	Construction and Building Materials, 2022.	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128561	A seleção de partículas menores de cinzas de bagaço de cana aumentou em 50% a reatividade pozolânica em relação às cinzas não classificadas. A resistência à compressão foi 30% superior. Os aglomerantes SCBA-cal mostraram condutividade térmica reduzida e excelente regulação de umidade.
Quantitative comparison of binary mix of agro-industrial pozzolanic additions for elaborating ternary cements: Kinetic parameters	Villar-Cociña, E.; Frías, M.; **Savastano, H**.; Rodier, L.; Sánchez de Rojas, M.I.; Sáez del	Materials, 2021	https://doi.org/10.3390/ma14112944	A pesquisa comparou sistemas binários de adições pozolânicas agroindustriais para formulação de cimentos ternários, avaliando parâmetros cinéticos. Esses sistemas demonstraram potencial para reduzir o consumo de clínquer e emissões de CO2.

Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: Analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment	Ruviaro, A.S.; Lima, G.T.S.; Silvestro, L.; Barraza, M.T.; Rocha, J.C.; **de Brito, J**.; Gleize, P.J.P.; Pelisser, F.	Construction and Building Materials, 2023	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129762	O estudo investiga o uso da cinza de casca de aveia (OHA) como material cimentício suplementar, revelando que a queima gera a maior energia líquida, mas a qualidade da cinza para incorporação em matrizes cimentícias diminui com o aumento da temperatura.
Rheology, hydration, and microstructure of portland cement pastes produced with ground açaí fibers	Azevedo, A.; Matos, P.; Marvila, M.; Sakata, R.; Silvestro, L.; Gleize, P.; **de Brito, J.**	Applied Sciences, 2021.	https://doi.org/10.3390/app11073036	O artigo investiga a incorporação de fibras de açaí moídas em pastas de cimento Portland, revelando que a adição de 5% de fibras in natura aumenta a tensão de escoamento e a viscosidade, enquanto 10% resulta em aumentos drásticos.

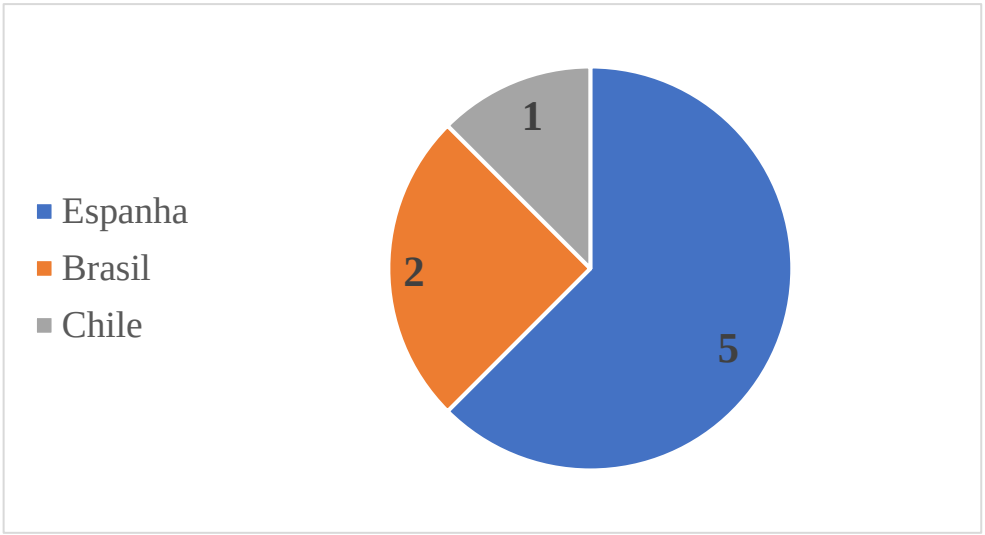
B. Pozolanas Naturais

Nesta seção, foram avaliados nove artigos que investigam o uso de materiais pozolânicos como substitutos parciais do cimento Portland. Os artigos analisados foram publicados entre 2021 e 2023 e abordam diversas pesquisas relacionadas à utilização de pozolanas naturais.

Em relação à RINCIMCI, destaca-se a participação dos responsáveis marcados em **negrito e sublinhado**. No presente caso, tem-se os maiores contribuintes os nomes de Prof. **Prof. Miguel Ángel Sanjuán B**. da IECA/Espanha, com 4 pesquisas associadas e seguido do **Prof. Holmer Savastano Jr**. da USP/Brasil, com 2 pesquisas.

Através dos artigos é notável o resultado que as pozolanas, ao substituírem parcialmente o cimento Portland, podem reduzir até 40% do consumo de combustível e as emissões de CO_2, sem comprometer a qualidade do cimento (Sanjuán *et al.*, 2023). Adicionalmente, elas previnem a expansão por ataque de sulfatos, diminuem o calor de hidratação e, em alguns casos, proporcionam resistência mecânica superior à do cimento Portland comum. Resultados demonstram que concretos contendo até 15% de pozolana natural apresentam desempenho mecânico comparável ao concreto com 20% de cinza volante, aproximando-se do concreto convencional. Em concretos autoadensáveis, altas substituições por cinza vulcânica resultaram em boa trabalhabilidade, resistência à penetração de cloretos e propriedades adequadas de resistência à compressão (Khan; Alhozaimy, 2011).

Gráfico 6 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Pozolanas Naturais



Fonte: O autor, 2025.

Quadro 4 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Pozolanas Naturais

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
Development of sustainable and eco-friendly materials from termite hill soil stabilized with cement for low-cost housing in chad	Assia Mahamat; Numfor Bih; Peter Azikiwe; **Holmer Savastano Jr**.; Winston Soboyejo.	Buildings, 2021	https://doi.org/10.3390/buildings11030086	O uso de solo de cupinzeiros estabilizado com 5% de cimento Portland resultou nas melhores propriedades mecânicas, incluindo resistência à compressão, à flexão e à fratura. Essa estabilização mostrou um comportamento mecânico superior.
Effects of calcination and milling pre-treatments on natural zeolites as a supplementary cementitious material	C. Florez; Oacar Restrepo-Baena; **Jorge I. Tobón.**	Construction and Building Materials, 2021	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125	O artigo analisa o impacto de pré-tratamentos de calcinação e moagem em zeólitas naturais, revelando que a combinação de ambos aumenta significativamente a atividade pozolânica, alcançando até 75% da resistência do controle em misturas.
Volcanic ash from La Palma (Canary Islands, Spain) as Portland cement constituent	Miguel Angel Sanjuán; **Moisés Frías**; Manuel Monasterio.	Journal of Building Engineering, 2023	https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107641	O artigo analisa a composição química e mineralógica das cinzas vulcânicas da erupção de 2021 na ilha de La Palma. As cinzas demonstram potencial para uso em cimentos, com propriedades mecânicas e de durabilidade adequadas.
Diatomites from the Iberian Peninsula as Pozzolans	Jorge L.; Luis Presa; José L. Parra; **Manuel A. Sanjuán**.	Materials, 2023	http://dx.doi.org/10.3390/ma16103883	O estudo caracterizou diatomitos do sudeste da Península Ibérica como pozolanas naturais, utilizando técnicas como SEM e XRF. Os resultados demonstraram potencial para melhorar a qualidade de cimentos tradicionais.
Ignimbrites Related to Neogene Volcanism in the Southeast of the Iberian Peninsula: An Experimental Study to Establish Their Pozzolanic Character	Jorge L. Costafreda; Elena Crespo; Beatriz Astudillo; **Miguel Ángel Sanjuán.**	Materials, 2023	https://doi.org/10.3390/ma16041546	O artigo analisou a possibilidade de utilizar ignimbritos do sudeste da Península Ibérica como pozolanas naturais para substituição parcial do cimento Portland

Natural Fluorite from Órgiva Deposit (Spain). A Study of Its Pozzolanic and Mechanical Properties	Domingo A. Martín; Jorge Luis Costafreda; Esteban Estévez; Leticia Presa; Alicia Calvo; Ricardo Castedo; **Miguel Ángel Sanjuán.**	Crystals, 2021	https://doi.org/10.3390/cryst11111367	O estudo avaliou o uso de fluorita natural e calcinada da jazida de Órgiva (Espanha) como adição pozolânica em cimentos Portland. O uso de fluorita natural demonstrou ser mais viável economicamente, oferecendo potencial para cimentos sustentáveis com menor emissão de CO2.
Reduced Carbonation, Sulfate and Chloride Ingress Due to the Substitution of Cement by 10% Non-Precalcined Bentonite	Carmen Andrade; Ana Martínez-Serrano; **Miguel Ángel Sanjuán**; José Antonio Tenorio Ríos.	Materials, 2021	https://doi.org/10.3390/ma14051300	O estudo avaliou o uso de bentonita não pré-calcificada como substituto parcial do clínquer em cimentos Portland. Resultados indicaram que a adição de 10% de bentonita melhorou a resistência à carbonatação.
Microstructure and Durability Performance of Mortars with Volcanic Powder from Calbuco Volcano (Chile) after 4 Hardening Years	Rosa María Tremiño; Teresa Real-Herraiz; **Viviana Letelier**; José Marcos Ortega.	Materials, 2021	https://doi.org/10.3390/ma14071751	O artigo investiga o impacto da adição de pó vulcânico do vulcão Calbuco. Os resultados mostram que as argamassas com pó vulcânico apresentaram uma rede de poros mais refinada e uma redução no coeficiente de difusão de cloretos, indicando melhor desempenho em ambientes agressivos.
Optimization of termite mound soil through alkali activation and cement stabilisation for sustainable and eco-friendly construction materials	Assia Aboubakar Mahamat; Numfor Linda Bih; **Holmer Savastano Jr**.	Trabalho de conferência	https://doi.org/10.1109/ICMEAS52683.2021.9692382	O artigo investiga a otimização do solo de montes de térmitas por meio da ativação alcalina com potássio natural e estabilização com cimento. Os resultados mostram que a substituição parcial de cimento proporciona maior resistência à compressão. A análise microestrutural revelou mudanças significativas na morfologia e nas ligações químicas.

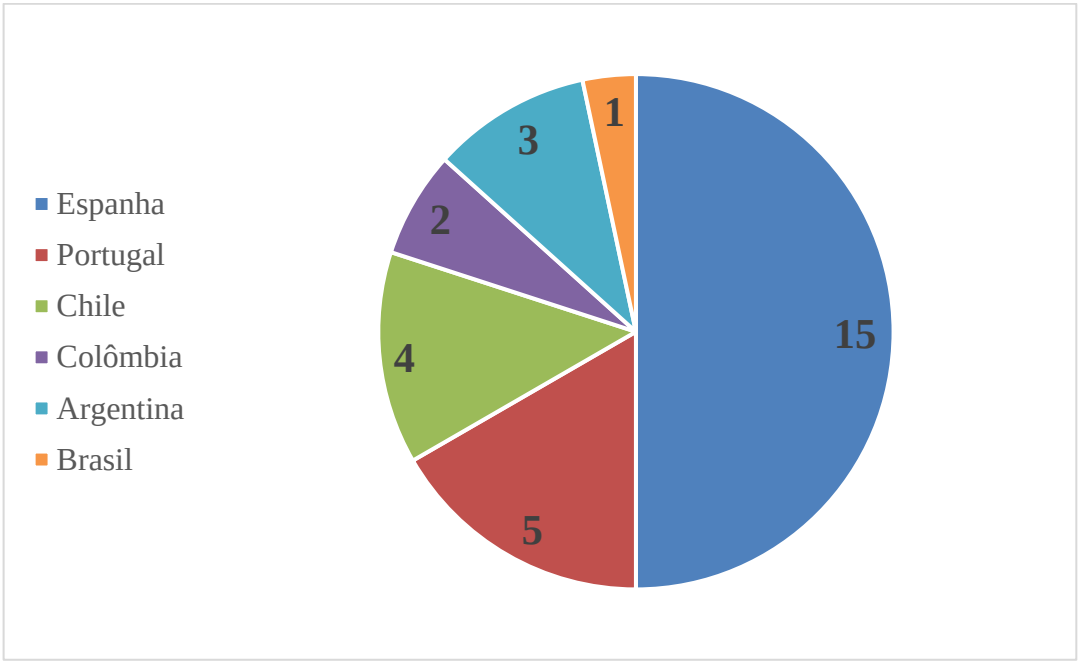
C. Resíduos Industriais

Nesta seção, foram avaliados trinta artigos que investigam o uso de materiais provenientes de resíduos industriais como substitutos parciais do cimento Portland. Os artigos analisados foram publicados entre 2021 e 2023.

Em relação à RINCIMCI, destaca-se a participação dos responsáveis os destacados em **negrito e sublinhado**. No presente caso, tem-se os nomes em destaque por mais participações do **Prof. Moisés Frías** da IETCC/Espanha, com nove pesquisas, seguido dos **Prof. Miguel Ángel Sanjuán B.**, com oito pesquisas e do **Prof. Jorge de Brito** do IST/Portugal, com cinco pesquisas.

Através das análises, é notável que o uso de resíduos de construção e demolição (RCD), especialmente os cerâmicos, como materiais cimentícios suplementares (SCM), demonstra grande potencial para promover a sustentabilidade na construção civil. Estudos revelam que os RCD cerâmicos podem melhorar propriedades mecânicas e resistência química do concreto, além de apresentar efeitos de diluição e estímulo na hidratação inicial (ZITO; IRASSAR; RAHHAL, 2023). Embora os RCD possuam carbono incorporado elevado em comparação com agregados naturais, sua utilização como SCM, substituindo parcialmente o cimento Portland, reduz significativamente as emissões de CO_2 (Al Saheen *et al*., 2022).

Gráfico 7 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Resíduos Industriais



Fonte: O autor, 2025

Quadro 5 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Resíduos Industriais

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
Recycled Construction and Demolition Waste as Supplementary Cementing Materials in Eco-Friendly Concrete	**Edgardo F. Irassar,** et al	Recycling, 2021	https://doi.org/10.3390/recycling8040054	O artigo investiga a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) cerâmicos como materiais cimentícios suplementares em concretos. Os resultados indicam que a incorporação de RCD melhora as propriedades mecânicas e a resistência química.
Tools for designing the early-age properties of fly ash and limestone filler ternary systems	**Edgardo F. Irassar,** et al.	Construction and Building Materials, 2022	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.12855	O artigo analisa a influência da substituição de cimento por filler de calcário (LF) e cinzas volantes (FA) nas propriedades de pastas e argamassas. Os resultados indicam que a adição de LF e FA melhora a densidade de empacotamento e a resistência à compressão.
The Influence of Recycled Cement, Fly Ash, and Magnesium Oxide on the Mechanical Performance of Sustainable Cementitious Materials	**Jorge de Brito**, et al.	Materials, 2023	https://doi.org/10.3390/ma16072760	O artigo analisa as propriedades mecânicas de materiais cimentícios sustentáveis contendo cimento reciclado (RC), cinzas volantes (FA) e óxido de magnésio (MgO). Mortares ternários mostraram melhores resultados
Ternary Blends for Self-Compacting Mortars Production Composed by Electric Arc Furnace Dust and Other Industrial By-Products	**Jorge de Brito**, et al.	Materials, 2022	https://doi.org/10.3390/ma15155347	O artigo avalia a produção de argamassas autoadensáveis utilizando misturas ternárias com pó de forno a arco elétrico (EAFD) e outros subprodutos industriais. O estudo destaca a viabilidade ambiental e mecânica dessas misturas, contribuindo para a economia circular.
The Influence of Fly Ash on the Mechanical Performance of Cementitious Materials Produced with Recycled Cement	**Jorge de Brito**, et al.	Applied Sciences, 2022.	https://doi.org/10.3390/app12042257	O estudo avaliou o desempenho de argamassas utilizando cimento reciclado (RC) e cinzas volantes (FA) como substitutos parciais. Resultados indicam o potencial do uso

				conjunto de RC e FA para produzir materiais mais ecoeficientes.
Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: An early-age investigation	**Jorge de Brito,** et al.	Journal of Building Engineering, 2021	https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102187	A substituição de cimento Portland por resíduos cerâmicos de demolição (CTDW) em até 30% melhora o desempenho inicial de pastas. O CTDW reduz a distância entre partículas, aumentando a resistência compressiva em até 5% em relação ao uso de calcário.
Mechanical and Durability Properties of Mortars Incorporating Red Mud, Ground Granulated Blast Furnace Slag, and Electric Arc Furnace Dust	**Jorge de Brito,** et al.	Applied Sciences, 2021.	https://doi.org/10.3390/app11094110	O artigo avalia as propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas com substituições parciais de cimento por lama vermelha (RM), escória granulada de alto-forno (GGBFS) e pó de forno a arco elétrico (EAFD). Substituições de até 10% mostraram benefícios na durabilidade, enquanto até 20% aumentaram levemente a resistência à compressão.
Eco-efficient cement based on activated coal washing rejects with low content of kaolinite	José Rodríguez; **Moisés Frías**; **Jorge I. Tobón**.	Construction and Building Materials, 2021	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122118	O artigo explora o potencial do rejeito de lavagem de carvão como material suplementar cimentício após tratamento térmico. Os resultados mostram que, mesmo com baixo teor de caulinita (14%), o rejeito pode ser convertido em material altamente pozolânico.
Study of Microstructure, Crystallographic Phases and Setting Time Evolution over Time of Portland Cement, Coarse Silica Fume, and Limestone (PC-SF-LS) Ternary Portland Cements	**Miguel Ángel Sanjuán**, et al.	Crystals, 2023	https://doi.org/10.3390/cryst13081289	O estudo mostrou que a adição de sílica ativa e calcário promoveu a densificação da microestrutura dos cimentos ternários devido ao efeito de preenchimento e à reação pozolânica, resultando em maior refinamento dos poros e formação gel.

Chloride Diffusion in Concrete Made with Coal Fly Ash Ternary and Ground Granulated Blast-Furnace Slag Portland Cements	**Miguel Ángel Sanjuán**, et al.	Crystals, 2023	https://doi.org/10.3390/ma15248914	Os cimentos ternários com 40% de escória de alto-forno (GGBFS) e 25% de cinzas volantes (FA) apresentaram maior resistência à penetração de cloretos, com coeficientes de migração e difusão significativamente reduzidos, destacando-se como opções eficazes para estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos.
A Ten-Year Study on Alkali Content of Coal Fly Ash	**Miguel Ángel Sanjuán**, et al.	Fuels, 2022	https://doi.org/10.3390/fuels3020023	O estudo de 10 anos sobre cinzas volantes de carvão mostrou que o teor de álcalis variou entre 0,35% e 2,53%. Esses parâmetros são essenciais para mitigar a reação álcali-sílica e melhorar a durabilidade do concreto.
Radiological Characteristics of Carbonated Portland Cement Mortars Made with GGBFS	**Miguel Ángel Sanjuán**, et al	Materials, 2022	https://doi.org/10.3390/ma15093395	O artigo investiga as características radiológicas de argamassas de cimento Portland carbonatadas com diferentes porcentagens de escória de alto-forno. Os resultados mostram que as concentrações de atividade de urânio variaram sem alteração significativa nas propriedades químicas.
Mechanical Performance of Portland Cement, Coarse Silica Fume, and Limestone (PC-SF-LS) Ternary Portland Cements	**Miguel Ángel Sanjuán**, et al.	Materials, 2022	https://doi.org/10.3390/ma15082933	O artigo analisa o desempenho mecânico de cimentos Portland ternários com adição de sílica fume grossa e calcário. Os resultados mostram que a adição de calcário melhora a resistência à compressão.

Fineness of Coal Fly Ash for Use in Cement and Concrete	**Miguel Ángel Sanjuán**; **Cristina Argiz**.	Fuels; 2021	http://dx.doi.org/10.3390/fuels2040027	O artigo analisa a finura da cinza de carvão, os resultados indicam que um aumento de 20% na fração de 45 μm resulta em um aumento médio de 13% na fração de carbonatação do cimento.
Reactivity of Ground Coal Bottom Ash to Be Used in Portland Cement	**Miguel Ángel Sanjuán**; **Cristina Argiz**.	J, 2021.	https://doi.org/10.3390/j4030018	O artigo investiga a reatividade de cinzas de fundo de carvão moído (GCBA) como material de adição no cimento Portland, demonstrando que o GCBA possui propriedades pozolânicas significativas. Os resultados indicam que a incorporação de GCBA melhora a resistência mecânica e a durabilidade do cimento.
Physical and Mechanical Behavior of New Ternary and Hybrid Eco-Cements Made from Construction and Demolition Waste	**Moisés Frias**, et al.	Materials, 2023.	https://doi.org/10.3390/ma16083093	O artigo investiga a produção de eco-cimentos a partir de resíduos de construção e demolição, destacando que a incorporação de materiais reciclados, como vidro, melhora a sinergia pozolânica e as propriedades mecânicas dos cimentos. Os resultados mostram que os eco-cimentos apresentam resistência à compressão competitiva e menor absorção de água.
Progress in the influence of recycled construction and demolition mineral-based blends on the physical–mechanical behaviour of ternary cementitious matrices	**Moisés Frías**, et al.	Construction and Building Materials, 2022.	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128169	O estudo demonstrou que cimentos ternários contendo 7% de misturas recicladas de resíduos de concreto e vidro possuem desempenho físico-mecânico semelhante ao cimento Portland comum, com uma leve redução na resistência à compressão.
Concrete/Glass Construction Waste	**Moisés**	Materials, 2022	https://doi.org/	O artigo investiga o uso de resíduos de concreto

Synergies in Ternary Eco-Cement-Paste Mineralogy	**Frías**, et al.		10.3390%2Fma15134661	(calcariano e silicioso) e vidro reciclado em pastas ternárias de eco-cimento, com substituição de 7% do cimento por essas misturas. Resultados mostram que os cimentos demonstraram potencial para melhorar a sustentabilidade e reduzir impactos ambientais.
Durability of Construction and Demolition Waste-Bearing Ternary Eco-Cements	**Moisés Frías**, et al.	Materials, 2022	https://doi.org/10.3390/ma15082921	O artigo avaliou a durabilidade de eco-cimentos ternários contendo resíduos de concreto (calcário e silicioso) e vidro reciclado em substituição a 7% do cimento Portland. Os resultados indicam que as misturas melhoraram a resistência à penetração de cloretos e reduziram a porosidade.
Reactivity in cement pastes bearing fine fraction concrete and glass from construction and demolition waste: Microstructural analysis of viability	**Moisés Frías**, et al.	Cement and Concrete Research, 2021	http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106531	Os resultados indicaram que a adição de resíduos de construção e demolição, como vidro e resíduos calcareos, afeta a reatividade dos cimentos, com menor formação de fases hidratadas e calor de hidratação em misturas com vidro.
Exploring sulphate resistance of coal mining waste blended cements through experiments and thermodynamic modelling	**Moisés Frías**, et al.	Cement and Concrete Research, 2021	http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104086	O estudo avaliou a resistência ao ataque por sulfato em cimentos adicionados de resíduos de mineração de carvão ativados, substituindo o clínquer. Resultados mostraram maior resistência de longo prazo para cimentos com 50% de substituição, atribuída à menor solubilidade de cálcio e formação de carboaluminatos.
Behaviour and Properties of Eco-	**Moisés**	Materials. 2021	https://doi.org/	Cimentos elaborados com resíduos reciclados de

Cement Pastes Elaborated with Recycled Concrete Powder from Construction and Demolition Wastes	**Frías, et al.**		10.3390/ma14051299	concreto demonstraram atender aos requisitos físicos e mecânicos para cimentos convencionais. Substituições parciais de 5% a 10% melhoraram a conectividade microestrutural e reduziram emissões de CO_2 em 10%.
Laboratory-scale study and semi-industrial validation of viability of inorganic CDW fine fractions as SCMs in blended cements	**Moisés Frías**, et al.	Construction and Building Materials; 2021.	http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121823	O estudo revelou que os resíduos de concreto reciclado, especialmente os finos de concreto silicoso e calcário, apresentam pozzolanicidade significativa, melhorando a resistência mecânica dos cimentos mistos. A substituição de 5-10% desses materiais mantém a conformidade com os requisitos de resistência.
Microstructure and mechanical properties of ternary mortars with brick powder, glass powder, slag, fly ash and limestone	**Viviane Letelier**, et al.	International Journal of Applied Ceramic Technology, 2022.	http://dx.doi.org/10.1111/ijac.14012	O estudo revelou que os morteros ternários com pó de tijolo apresentaram um refinamento progressivo da porosidade ao longo do tempo, com aumento da resistência à compressão e à flexão, especialmente em combinações com escória e pó de vidro.
Four-years influence of waste brick powder addition in the pore structure and several durability-related parameters of cement-based mortars	**Viviane Letelier**, et al.	Construction and Building Materials; 2021.	http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124839	O estudo revelou que os morteros ternários com pó de tijolo apresentaram um refinamento progressivo da porosidade ao longo do tempo, com aumento da resistência à compressão e à flexão, especialmente em combinações com escória e pó de vidro.
Effects after 1500 Hardening Days on	**Viviana**	Sustainability;	https://doi.org/	O estudo demonstrou que a adição de 10% e 20% de pó

the Microstructure and Durability-Related Parameters of Mortars Produced by the Incorporation of Waste Glass Powder as a Clinker Replacement	**L**.; Fernando G. Branco; José Ortega.	2021	10.3390/su13073979	de tijolo residual em argamassas melhorou a refinamento da porosidade e a difusão de cloretos ao longo de 1500 dias.
Durability of eco-friendly blended cements incorporating ceramic waste from different sources.	**Edgardo F. Irassar**, *et al*	Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2023	https://doi.org/10.1080/21650373.2021.2010242	O estudo analisou resíduos cerâmicos (PCWs) em cimentos mistos, melhorando a durabilidade e reduzindo CO_2.
Assessing technological properties and environmental impact of fired bricks made by partially adding bottom ash from an industrial approach.	**Viviana L.,** *et al*.	Construction and Building Materials. 2023	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132338	O estudo analisou a substituição de argila por cinzas de biomassa (BBA) na produção de tijolos.
Comparação da reatividade de resíduo de cerâmica vermelha cominuído e matéria-prima de olaria calcinada	**João Henrique da Silva Rêgo**, et al.	Ambiente Construído, 2023	https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400702	O estudo avaliou a reatividade de resíduos de cerâmica vermelha cominuídos (RCVs) e argilas calcinadas em diferentes condições.

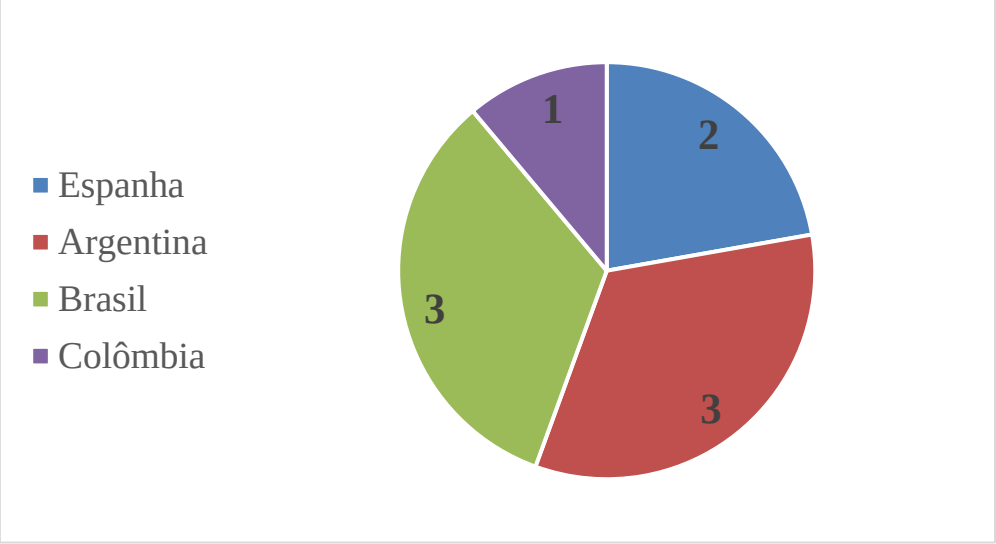
D. Argila Calcinada

Nesta seção, foram avaliados nove artigos que investigam o uso de argilas calcinadas como substitutos parciais do cimento Portland. Os artigos analisados foram publicados entre 2021 e 2023 e abordam diversas pesquisas relacionadas à utilização desse material, que são aditivos mineralógicos de grande importância para a produção de concreto.

Em relação à RINCIMCI, destaca-se a participação dos responsáveis **Prof. Edgardo F. Irassar**, com 3 pesquisas colaboradas, seguido do **Prof. João Henrique S. Rêgo**, também com três pesquisas

Os estudos analisados destacam o potencial das argilas calcinadas como Materiais Cimentícios Suplementares (SCMs) em cimentos de baixo carbono, devido à sua alta reatividade e ampla disponibilidade global. Argilas cauliníticas, mesmo de baixo teor, e resíduos argilosos demonstram viabilidade técnica e contribuem para a redução de emissões de CO_2, com melhorias significativas na resistência mecânica e na durabilidade do concreto, embora possam apresentar maior suscetibilidade à carbonatação. Combinações com nanosílica ou calcário geram benefícios adicionais, como maior refinamento da microestrutura e aumento de até 44% na resistência à compressão, além de reduzir reações álcali-sílica e a penetração de cloretos. Esses avanços posicionam as argilas calcinadas como elementos estratégicos para a sustentabilidade na construção civil.

Gráfico 8 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Argila Calcinada



Fonte: O autor, 2025

Quadro 6 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Argilas Calcinadas

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
Mineralogical characterization methods for clay resources intended for use as supplementary cementitious material.	**Edgardo F. Irassar**, *et al*	Materials And Structure, 2022.	http://dx.doi.org/10.1617/s11527-022-01973-1	O estudo aborda a caracterização de argilas brutas para uso como SCM, destacando técnicas como difração de raios X, análise térmica e espectroscopia no infravermelho. Ele fornece diretrizes para identificação mineralógica, essencial para otimizar o processamento e desempenho das argilas calcinadas.
Performance of Low-Grade Calcined Clays as Supplementary Cementitious Material in Relation to their Geological Characteristics.	**M. Frías**, R. García, R. Vigil, S. Martínez;	Cement and concrete research, 2022	https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106657	O estudo analisa pastas de cimento com até 25% de metacaulim, armazenadas por 15 anos a 60 °C. As análises revelam mudanças mineralógicas significativas.
Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials	**Edgardo F. Irassar**, et al	Materials And Structure, 2022.	https://doi.org/10.1617/s11527-022-01972-2	O artigo aborda o uso de argilas como materiais cimentícios suplementares (SCMs) para a produção de cimentos e concretos de baixo carbono. Ele destaca as propriedades e a distribuição de argilas, especialmente as cauliníticas, devido à sua reatividade superior.
Durability Performance of Blended Cement with Calcined Illitic Shale	**Edgardo F. Irassar**, et al	Materials, 2022.	http://dx.doi.org/10.14359/51734192	O artigo explora o uso de argilas xistosas ilíticas calcinadas em cimentos para melhorar a durabilidade do concreto, ataques por sulfatos e penetração de cloretos. A substituição por CIS reduz a expansão da ASR, limita a formação de gesso e etringita em meios sulfatados e mantém a resistência

Improvement of the Mechanical Properties of Mortars Manufactured with Partial Substitution of Portland Cement by Kaolinitic Clays	**Miguel A. Sanjuán**, et al.	Buildings, 2023	https://doi.org/10.3390/buildings13071647	O artigo investiga a utilização de argilas kaolinitas naturais como materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento Portland, demonstrando que essa substituição melhora significativamente as propriedades mecânicas dos morteros.
Physical and Chemical Effects in Blended Cement Pastes Elaborated with Calcined Clay and Nanosilica	**da Silva Rêgo, J.H**. **Frías Rojas, M.**	Materials, 2023	https://doi.org/10.3390/ma16051837	O artigo investiga os efeitos da incorporação de argila calcinada e nanosilica em pastas de cimento, revelando que essas adições melhoram a microestrutura e a resistência mecânica dos materiais.
New scientific evidence of the effect of high temperatures and long curing times on MK-blended cement paste	**M. Frías**, R. García, R. Vigil, S. Martínez;	Cement and Concrete Research; 2021.	https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106657	O artigo investiga a mineralogia e as propriedades de pastas de cimento com metacaulim (MK) ao longo de 15 anos, identificando fases cristalinas como portlandita e calcita..
Effect of nanosilica/metakaolin ratio on the calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H) formed in ternary cement pastes	**Matheus Ian Castro Sousa; João H. da Silva Rêgo**	Journal of Materials in Civil Engineering, 2021	https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102226	O artigo investiga o efeito da relação entre nanosilica e metakaolin em pastas de cimento ternárias, revelando que misturas otimizadas resultam em maiores valores de resistência e menor conteúdo de portlandita aos 28 dias.
Chemical and mechanical characterization of ternary cement pastes containing metakaolin and nanosilica	**Daniel S.**; **João Rêgo**; **Moisés Rojas**.	Construction and Building Materials, 2017	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.	O artigo avaliou a sinergia de metacaulim e nanosílica em pastas cimentícias ternárias, revelando aumento de 44% na resistência à compressão e redução de 66% no diâmetro médio dos poros em 91 dias.

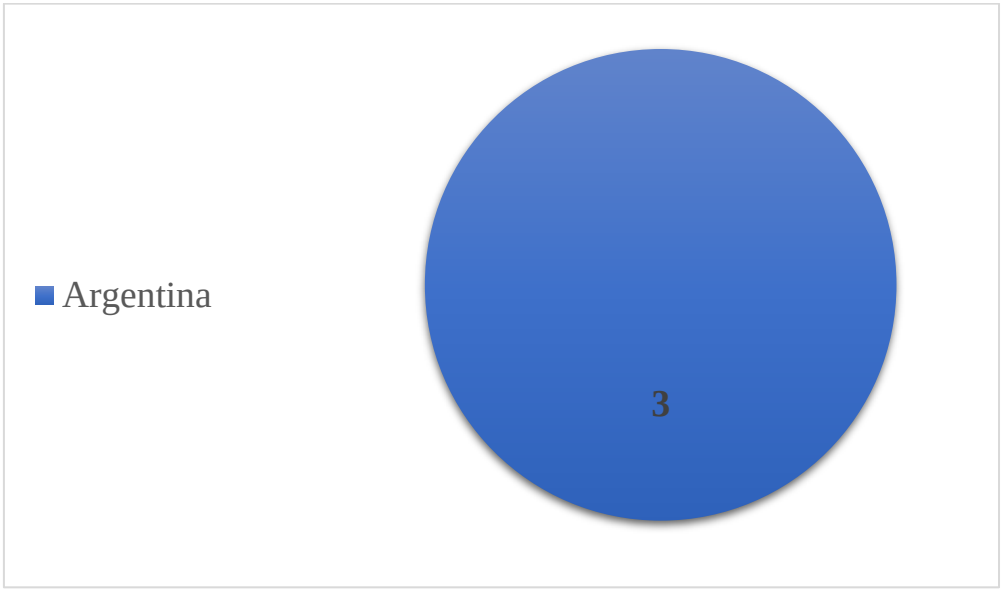
E. Cimentos LC³

Nesta seção, foram avaliados três artigos que investigam o uso do Limestone Calcined Clay Cement (LC³) como uma alternativa sustentável ao cimento Portland. Os artigos analisados foram publicados entre 2021 e 2023, e abordam diversas pesquisas relacionadas à aplicação e desenvolvimento desse cimento inovador.

Em relação a RINCIMCI, nota-se como único colaborador do tema o **Prof. Edgardo F. Irassar**, da UNCPBA/Argentina, com três artigos.

O LC³, desenvolvido por Karen Scrivener em colaboração com instituições da Suíça, Índia e Cuba, é um cimento ternário composto por clínquer, gesso, metacaulim e fíler calcário, capaz de substituir até 50% do clínquer sem comprometer a resistência à compressão. Os estudos analisados demonstram que a incorporação de argila ilítica calcinada (10%-30%) e calcário (≤10%) reduz a penetração de água, migração de cloretos e CO_2 incorporado em até 25%, além de melhorar a resistência após 90 dias. Cimentos com 30% de argila calcinada apresentam maior resistência a sulfatos devido ao refinamento dos poros e à redução do Ca $(OH)_2$ disponível. A calcinação da caulinita a 600°C por 2 horas maximiza sua reatividade pozolânica, enquanto ajustes na proporção de substituição mineral influenciam a resistência inicial. Esses achados reforçam o LC³ como uma alternativa sustentável, reduzindo emissões e consumo energético.

Gráfico 9 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Cimentos LC³



Fonte: O autor, 2025.

Quadro 7 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Cimentos LC³

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
Performance of Composite Portland Cements with Calcined Illite Clay and Limestone Filler Produced by Industrial Intergrinding	**Edgardo F. Irassar,** et al.	Minerals, 2023.	https://doi.org/10.3390/min13020240	O estudo avaliou cimentos compostos com argila ilítica calcinada e calcário produzidos por co-moagem. Os resultados mostraram redução da penetração de água e migração de cloretos.
Designing general use cement with calcined illite and limestone filler	**Edgardo F. Irassar,** et al.	Applied Clay Science, 2022	http://dx.doi.org/10.1016/j.cl	O estudo conclui que a combinação de argila ilítica calcinada (CC) e preenchimento com calcário (LF) pode reduzir o CO_2 incorporado.
Sulfate performance of blended cements (limestone and illite calcined clay) 2 exposed to aggressive environment after casting	**Edgardo F. Irassar,** et al.	Cement and Concrete Research, 2021	https://doi.org/10.1016/j.cemc	O estudo concluiu que cimentos com argila ilítica calcinada (ICC) apresentam melhor resistência a sulfatos do que os com preenchimento de calcário (LF).

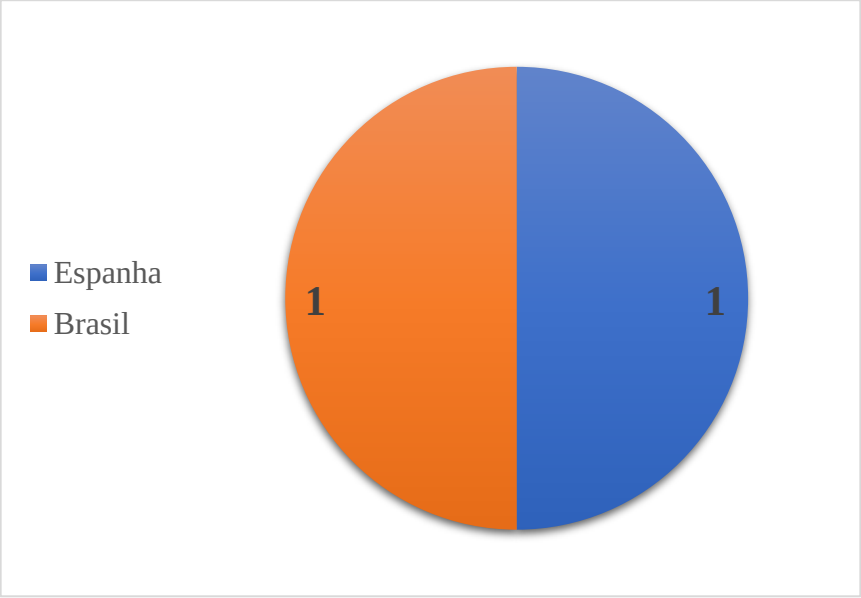
F. Modelagem

Nesta seção, foram avaliados dois artigos que investigam o uso de modelagem aplicada a produção de cimento Portland. Os artigos analisados foram publicados entre 2021 e 2023, com exceção de abordam diversas pesquisas relacionadas à aplicação e desenvolvimento desse material inovador.

Em relação a RINCIMCI, nota-se como colaboradores do tema o **Prof. João Henrique da Silva Rêgo** - UNB/Brasil, com um artigo, e o colaborador **Jaime Galvez**, da UPM/Espanha, com também um artigo.

A modelagem matemática nos dois estudos permite entender e prever o comportamento físico-químico do cimento e do concreto. No primeiro artigo, equações de transporte de íons são formuladas para diferentes escalas, demonstrando que a tortuosidade não reduz a velocidade média das espécies iônicas. O modelo apresenta excelente concordância com perfis experimentais de cloretos. No segundo artigo, a modelagem de dados explora a caracterização físico-química do cimento Portland comum, identificando padrões e correlações entre suas propriedades. Os resultados servem como base para análises futuras, incluindo o desenvolvimento de modelos preditivos e inteligência artificial.

Gráfico 10 - Países idealizadores do Tema 4.2.1 Modelagem



Fonte: O autor, 2025.

Quadro 8 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.1 Modelagem

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
On the tortuosity-connectivity of cement-based porous materials	**Jaime C. Gálvez**, et al.	Applied Sciences, 2021	https://doi.org/10.3390/app11135812	O estudo analisa as equações de transporte de espécies iônicas no concreto, desde a escala dos poros até a escala macroscópica. Demonstra-se que a tortuosidade-conectividade não afeta a velocidade média dos íons. Comparações entre modelos de transporte em volumes representativos e poros equivalentes permitem determinar o parâmetro de tortuosidade para quatro tipos de concreto
Dataset construction and data science analysis of physicochemical characterization of Ordinary Portland cement.	**João Henrique da Silva Rêgo.,** *et al*.	Revista IBRACON, 2023	http://dx.doi.org/10.1016/j.cl	O estudo apresenta a construção e análise de um conjunto de dados sobre a caracterização físico-química do cimento Portland comum (OPC). Foram avaliadas diversas variáveis, como composição química, propriedades físicas e resistência à compressão, a partir de publicações de diferentes países e período

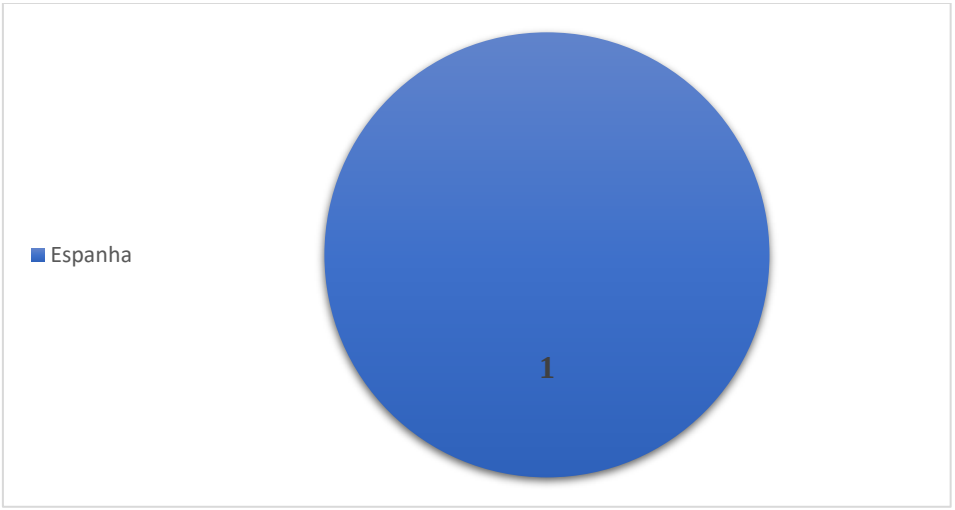
4.2.2. Novos Cimentos

Nesta seção, foram avaliados somente um estudo, que aborda uso de modelagem aplicada a produção de cimento Portland. Os artigos analisados foram publicados entre 2021 e 2023, com exceção de abordam diversas pesquisas relacionadas à aplicação e desenvolvimento desse material inovador.

Em relação a RINCIMCI, nota-se como colaboradores do tema o **Prof. João Henrique da Silva Rêgo** - UNB/Brasil, com um artigo, e o colaborador **Jaime Galvez**, da UPM/Espanha, com também um artigo.

A espectroscopia de infravermelho é uma técnica essencial para estudar cimentos ativados alcalinamente, permitindo analisar as vibrações das ligações químicas em materiais amorfos e cristalinos. Este trabalho investigou o efeito da concentração de hidróxido de cálcio (CH), hidróxido de sódio (SH), temperatura e tempo de cura na estrutura de cimentos à base de cinzas volantes. Foram analisadas nove misturas, variando as concentrações de CH, SH e temperatura (25, 35 e 45 °C), aos 3 e 28 dias de cura.

Gráfico 11 - Países idealizadores do Tema 4.2.2 Novos Cimentos



Fonte: O autor, 2025.

Quadro 9 - Dados das pesquisas relacionadas ao tema 4.2.2 Novos Cimentos

TÍTULO	AUTORES	PERIÓDICO	DOI	SÍNTESE
Infrared spectra experimental analyses on alkali-activated fly ash-based binders.	**Jorge I. Tobón**, et al.	Spectrochimica Acta. 2022	https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120698	Os resultados mostraram mudanças nas bandas dos grupos O-H, C-O e T-O, indicando a reorganização dos elementos formadores e modificadores para a formação de géis cimentantes, como C-(A)-S-H e N-A-S-H. Conclui-se que as condições de ativação alcalinam influenciam diretamente a estrutura dos cimentos, reforçando a utilidade da espectroscopia de infravermelho para entender esses processos.

Foram observados 60 artigos relacionados ao tema “Cimento Portland” com autoria de membros do RINCIMCI entre os anos de 2021 e 2023. Os artigos estão divididos nos tópicos referentes ao tema Concreto de acordo com o ROADMAP CEMBUREAU (2021) da seguinte forma:

1. Cimentos com baixo teor de clínquer: 59 artigos publicados.
2. Novos cimentos: 1 artigo publicado
3. Energia elétrica: 0 Artigo publicado
4. Transporte: 0 Artigo publicado

Observa-se que não foram encontrados artigos referentes aos temas “Energia elétrica” e “Transporte”. Isso indica uma lacuna nos tópicos de pesquisa desenvolvida dentro da Rede RINCIMCI e que podem servir como oportunidades a serem aproveitadas. Já os temas “Cimentos com baixo teor de clínquer” e “Novos cimentos” apresentaram respectivamente 59 artigos e 1 artigo. Abaixo será realizada uma análise dos artigos em cada um dos tópicos listados acima:

A. Cimentos com baixo teor de clínquer: 59 artigos publicados.

Foi realizada uma divisão de temas englobados na temática de cimentos com baixo teor de clínquer. Na Tabela 3 é possível observar o número de artigos em cada divisão.

Tabela 3 - Número de artigos publicados sobre o Cimentos com baixo teor de clínquer da Rede

Tema	Número de artigos
Resíduos agroindustriais	6
Pozolanas naturais	9
Resíduos Industriais	30
Argila calcinada	9
Cimentos LC^3	3
Modelagem	2
Total	**59**

Na Tabela 4 é possível identificar o número de publicações de cada autor sobre resíduos agroindustriais.

Tabela 4 - Numero de artigos publicados sobre resíduos agroindustriais por autor da Rede.

Autor	Número de artigos
Holmer Savastano (USP/Brasil)	3
Moisés Frías (IETcc/Espanha)	2
Jorge de Brito (IST/Portugal)	2

Houve uma publicação em conjunto entre os pesquisadores Moisés Frías e Holmer Savastano, no artigo “Quantitative comparison of binary mix of agro-industrial pozzolanic additions for elaborating ternary cements: Kinetic parameters”.

Na Tabela 5 é possível identificar o número de publicações de cada autor sobre pozolanas naturais. Nesse tema, não houve colaboração entre membros da rede RINCIMCI.

Tabela 5 - Numero de artigos publicados sobre pozolanas naturais por autor da Rede.

Autor	Número de artigos
Miguel Ángel Sanjuán (IECA/Espanha)	4
Holmer Savastano (USP/Brasil)	2
Jorge Tobón (UNC/Colômbia)	1
Viviana Letelier González (UFRO/Chile)	1
Moisés Frías (IETcc/Espanha)	1

Na Tabela 6 é possível identificar o número de publicações de cada autor sobre resíduos industriais.

Tabela 6 - Numero de artigos publicados sobre resíduos industriais por autor da Rede RINCIMCI

Autor	Número de artigos
Moisés Frías (IETcc/Espanha)	9
Miguel Ángel Sanjuan (IECA/Espanha)	8
Jorge de Brito (IST/Portugal)	5
Viviana Letelier González (UFR/Chile)	4
Edgardo F. Irassar (UNCPBA/Argentina)	3
Jorge Tobón (UNC/Colômbia)	2
João Henrique da Silva Rêgo (UnB/Brasil) 1	1

Nesse tema, houve as seguintes colaborações: Jorge Tobón e Moisés Frías: “Eco-efficient cement based on activated coal washing rejects with low content of kaolinite”.

Na Tabela 7 é possível identificar o número de publicações de cada autor sobre Argila Calcinada.

Tabela 7 - Numero de artigos publicados sobre argila calcinada por autor da Rede RINCIMCI

Autor	Número de artigos
Edgardo F. Irassar (UNCPBA/Argentina)	3
João Henrique da Silva Rêgo (UnB/Brasil)	3
Moisés Frías (IETcc/Espanha)	2
Jorge Tobón (UNC/Colômbia)	1
Miguel Ángel Sanjuán (IECA/Espanha)	1

Nesse tema, houve as seguintes colaborações: João Henrique da Silva Rêgo e Moisés Frías: “Physical and Chemical Effects in Blended Cement Pastes Elaborated with Calcined Clay and Nanosilica”.

Na Tabela 8 é possível identificar o número de publicações de cada autor sobre LC3.

Tabela 8 - Numero de artigos publicados sobre Cimentos LC³ por autor da Rede RINCIMCI

Autor	Número de artigos
Edgardo F. Irassar (UNCPBA/Argentina)	3

Na Tabela 9 é possível identificar o número de publicações de cada autor sobre modelagem.

Tabela 9 - Numero de artigos publicados sobre modelagem por autor da Rede RINCIMCI

Autor	Número de artigos
Jaime Galvez (UPM/Espanha)	1
João Henrique da Silva Rêgo (UnB/Brasil)	1

Na Tabela 10 é possível identificar o número de publicações de cada autor sobre Novos Cimentos.

Autor	Número de artigos
Jorge Tobón (UNC/Colômbia)	1

Gráfico 12 - Países idealizadores do Tema Cimentos

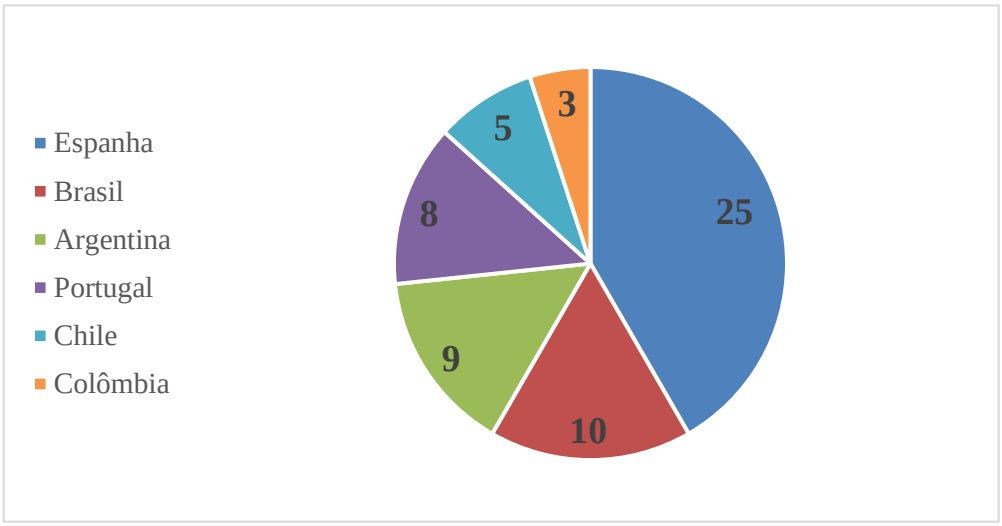
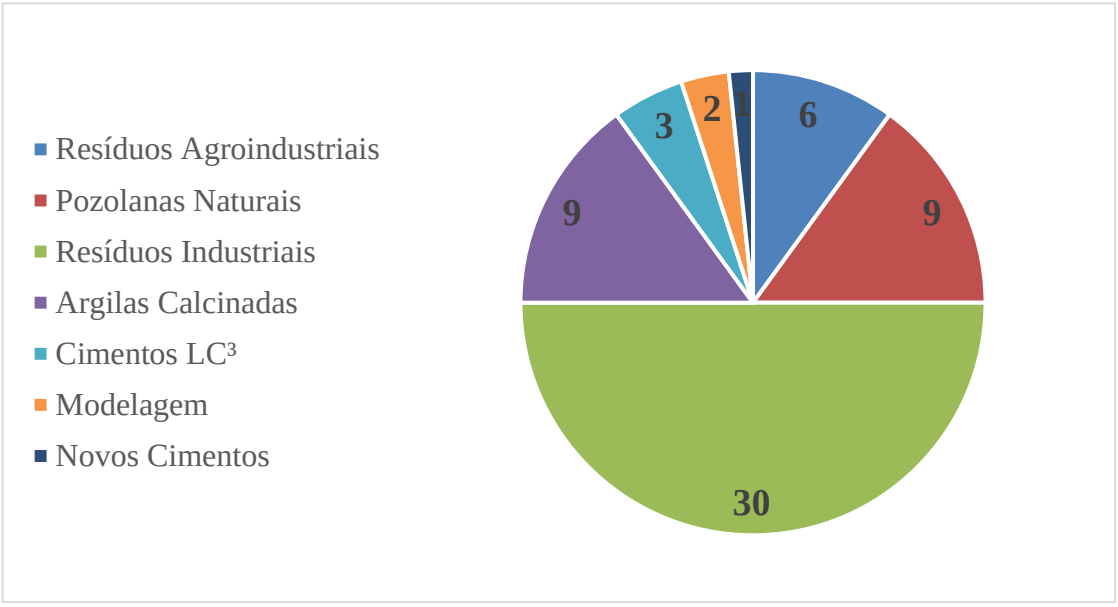


Gráfico 13 - Número de artigos publicados por tema



Fonte: O autor, 2025.

5. CONCLUSÃO

A mitigação das emissões de carbono na produção de cimento e clínquer é um desafio crítico para a sustentabilidade da indústria cimenteira, dada sua elevada participação nas emissões globais de CO_2. A revisão das pesquisas da rede RINCIMCI permitiu identificar avanços tecnológicos e estratégias de redução do impacto ambiental dessa indústria, consolidando o conhecimento existente e apontando caminhos para futuras inovações.

Os desafios e limitações para a redução das emissões na cadeia produtiva do cimento foram amplamente analisados, destacando-se a dependência do clínquer, a alta demanda energética e as barreiras econômicas e regulatórias. Embora haja avanços significativos, a implementação de novas tecnologias ainda enfrenta resistência devido a custos elevados e incertezas sobre o desempenho dos materiais alternativos. A necessidade de políticas públicas e incentivos governamentais foi ressaltada como essencial para superar esses desafios e viabilizar a transição para uma produção mais sustentável.

A pesquisa também permitiu mapear os principais temas abordados na rede RINCIMCI entre 2021 e 2023, evidenciando uma forte concentração de estudos sobre a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS), como pozolanas naturais, resíduos industriais e argilas calcinadas. Além disso, a captura e armazenamento de carbono (CCUS) e o uso de combustíveis alternativos surgem como estratégias complementares promissoras, demonstrando o alinhamento das pesquisas com as tendências globais de sustentabilidade.

A colaboração entre pesquisadores e instituições da rede RINCIMCI foi identificada como um fator determinante para o avanço das pesquisas, favorecendo a troca de conhecimento e a otimização de soluções sustentáveis. A análise das contribuições por país evidenciou uma forte participação de Espanha, Brasil, Argentina e Portugal, ressaltando o potencial de cooperação internacional para acelerar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras na indústria cimenteira.

A aplicabilidade industrial das principais estratégias de mitigação foi avaliada, destacando-se o potencial de materiais alternativos e processos mais eficientes para reduzir as emissões sem comprometer a qualidade do cimento. Tecnologias como o cimento LC^3 e a pirólise por spray de chama (FSP) demonstraram viabilidade prática, indicando caminhos concretos para a descarbonização da produção. No entanto, desafios técnicos e econômicos ainda precisam ser superados para viabilizar sua adoção em larga escala.

A identificação de lacunas de pesquisa foi um dos pontos centrais deste estudo, permitindo apontar áreas pouco exploradas que podem contribuir para a sustentabilidade da indústria. Apesar dos avanços, há carência de estudos sobre a durabilidade e o desempenho de longo prazo dos novos materiais, bem como sobre a integração das tecnologias de captura de carbono com os processos produtivos do cimento. O fortalecimento de parcerias entre academia e indústria se apresenta como uma estratégia fundamental para preencher essas lacunas e acelerar a implementação de soluções inovadoras.

Por fim, o objetivo geral deste trabalho, que consistiu na revisão das pesquisas da rede RINCIMCI sobre mitigação de carbono na produção de cimento e clínquer, foi plenamente alcançado. A análise sistemática dos estudos permitiu consolidar o conhecimento existente, identificar tendências e apontar oportunidades para novas pesquisas e colaborações. A continuidade dos estudos e o investimento em inovação serão essenciais para que o setor cimenteiro contribua efetivamente para a meta de neutralidade de carbono até 2050, alinhando-se aos compromissos globais de sustentabilidade.

.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, C.; MARTÍNEZ-SERRANO, A.; SANJUÁN, M. Á.; TENORIO RÍOS, J. A. Reduced carbonation, sulfate and chloride ingress due to the substitution of cement by 10% non-precalcined bentonite. **Materials**, v. 14, n. 1300, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma14051300. Acesso em: 03 dez. 2024.

ANDRADE, Daniel da Silva; RÊGO, João Henrique da Silva; FRÍAS ROJAS, Moisés; MORAIS, Paulo Cesar; SERAFIM, Maria José de Souza; LOPES, Anne Neiry. Properties of ternary cement pastes with nanosilica and rice husk ash. **ACI Materials Journal**, v. 117, n. 1, p. 1-15, 2020. DOI: 10.14359/51720291. Acesso em: 09 de jan. 2025.

AVILA, Y.; SILVA, R. V.; DE BRITO, J. Alkali-activated materials with pre-treated municipal solid waste incinerator bottom ash. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3535, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app12073535. Acesso em: 03 dez. 2024.

AZEVEDO, A.; DE MATOS, P.; MARVILA, M.; SAKATA, R.; SILVESTRO, L.; GLEIZE, P.; BRITO, J. d. Rheology, hydration, and microstructure of Portland cement pastes produced with ground açaí fibers. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3036, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app11073036. Acesso em: 09 de jan. 2025.

BERRIO, Ariel; TOBÓN, Jorge I.; DE LA TORRE, A. G. Kinetic model for ye'elimite polymorphs formation during clinkering production of CSA cement**. Construction and Building Materials**, v. 321, p. 126336, 2022. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126336. Acesso em: 19 de jan. 2025.

BETANCUR-GRANADOS, Natalia; MOLINA, Jarol E.; PÖLLMANN, Herbert; TOBÓN, Jorge I.; RESTREPO-BAENA, Oscar Jaime. Influence of metallic precursors in the mineralogy and reactivity of belite cement clinkers obtained by flame spray pyrolysis. **Materials Today Communications**, v. 26, p. 101917, 2021. ISSN 2352-4928. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101917. Acesso em: 16 de jan. 2025.

BETANCUR-GRANADOS, Natalia; PÖLLMANN, Herbert; RESTREPO-BAENA, Oscar Jaime; TOBÓN, Jorge I. Nanosized belite phases obtained by flame spray pyrolysis: Assessment of process conditions on the mineralogy and reactivity. **Cement and Concrete Research,** v. 164, p. 107062, 2023. ISSN 0008-8846. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107062. Acesso em: 21 de jan. 2025.

BETANCUR-GRANADOS, N.; TOBÓN, J. I.; RESTREPO-BAENA, O. J. Estudio general del método de síntesis de pirólisis de aerosol en llama. **Matéria** (Rio J), v. 26, n. 4, p. e13105, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1305. Acesso em: 21 de jan. 2025.

CANEDA-MARTÍNEZ, Laura; FRÍAS, Moisés; SÁNCHEZ, Javier; REBOLLEDO, Nuria; FLORES, Elena; MEDINA, César. Durability of eco-efficient binary cement mortars based on ichu ash: Effect on carbonation and chloride resistance. **Cement and Concrete Composites**, v. 131, 2022, p. 104608. ISSN 0958-9465. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104608. Acesso em: 09 de jan. 2025.

CANTERO, B.; BRAVO, M.; DE BRITO, J.; DEL BOSQUE, I. F. S.; MEDINA, C. The influence of fly ash on the mechanical performance of cementitious materials produced with recycled cement. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2257, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app12042257. Acesso em: 03 dez. 2024.

CEMBUREAU. **Roadmap to NetZero 2050**. European Cement Association, 2020.

CYTED. Programa Ibero-Americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento. Disponível em: https://www.cyted.org/. Acesso em: 21 mai. 2024.

CYTED. Rede Ibero-americana para Neutralidade Carbônica da Indústria de Materiais Cimentícios (RINCIMCI). CYTED, 2021.

DHANDAPANI, Y.; JOSEPH, S.; BISHNOI, S. Durability performance of binary and ternary blended cementitious systems with calcined clay: a RILEM TC 282-CCL, review. **Materials**

and Structures, v. 55, p. 145, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1617/s11527-022-01974-0. Acesso em: 15 jul. 2024.

FLOREZ, Cristian; RESTREPO-BAENA, Oscar; TOBÓN, Jorge I. Effects of calcination and milling pre-treatments on natural zeolites as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125220, 2021. ISSN 0950-0618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125220. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821029639. Acesso em: 03 dez. 2024.

FRÍAS, Moisés; CANEDA-MARTÍNEZ, Laura; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. Isabel; TENAZOA, Carlos; FLORES, Elena. Scientific and technical studies on eco-efficient binary cements produced with thermally activated ichu grass: Behaviour and properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, 2020, p. 103613. ISSN 0958-9465. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103613. Acesso em: 09 de jan. 2025.

HOYOS-MONTILLA, A. A.; TOBÓN, J. I.; PUERTAS, F. Role of calcium hydroxide in the alkaline activation of coal fly ash. Cement and Concrete Composites, v. 137, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104925. Acesso em: 03 dez. 2024.

HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. P.; SAVASTANO, H. Clinker-free CO_2 cured steel slag-based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 413-421, 2019. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169. Acesso em: 19 de jan. 2025.

IPCC. **Sixth Assessment Report**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: new sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257-273, 2019. ISSN 0008-8846. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008. Acesso em: 15 jul. 2024.

KHAN, M. I.; ALHOZAIMY, A. M. Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmentally friendly concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 38, n. 1, p. 71-78, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1139/L10-112. Acesso em: 30 jul. 2024.

LÓPEZ-UCEDA, A.; CANTADOR-FERNÁNDEZ, D.; DA SILVA, P. R.; DE BRITO, J.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, J. M.; JIMÉNEZ, J. R. Ternary blends for self-compacting mortars production composed by electric arc furnace dust and other industrial by-products. **Materials**, v. 15, n. 5347, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma15155347. Acesso em: 03 dez. 2024.

MAHAMAT, A. A.; BIH, N. Linda; AYENI, O.; ONWUALU, P. Azikiwe; SAVASTANO, H. Jr.; SOBOYEJO, W. Oluwole. Development of sustainable and eco-friendly materials from termite hill soil stabilized with cement for low-cost housing in Chad. **Buildings**, v. 11, n. 3, p. 86, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings11030086. Acesso em: 09 de jan. 2025.

MAHAMAT, A. A.; BIH, N. L.; SAVASTANO, H. Optimization of termite mound soil through alkali activation and cement stabilisation for sustainable and eco-friendly construction materials. In: **1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE** (ICMEAS), 2021, Abuja, Nigéria. Anais [...]. 2021. p. 1-5. DOI: 10.1109/ICMEAS52683.2021.9692382. Acesso em: 03 dez. 2024.

MARCHETTI, G.; CASTELLANO, C.; BONAVETTI, V.; IRASSAR, E. F. Tools for designing the early-age properties of fly ash and limestone filler ternary systems. **Construction and Building Materials**, v. 347, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128552. Acesso em: 03 dez. 2024.

MARTÍN, D. A.; COSTAFREDA, J. L.; ESTÉVEZ, E.; PRESA, L.; CALVO, A.; CASTEDO, R.; SANJUÁN, M. Á.; PARRA, J. L.; NAVARRO, R. Natural fluorite from Órgiva deposit (Spain): a study of its pozzolanic and mechanical properties. **Crystals**, v. 11, n. 1367, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/cryst11111367. Acesso em: 03 dez. 2024.

MARTÍN, D. A.; COSTAFREDA, J. L.; PRESA, L.; CRESPO, E.; PARRA, J. L.; ASTUDILLO, B.; SANJUÁN, M. Á. Ignimbrites related to Neogene volcanism in the southeast of the Iberian Peninsula: an experimental study to establish their pozzolanic character. **Materials**, v. 16, n. 1546, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma16041546. Acesso em: 03 dez. 2024.

MATOS, P. R. de; SAKATA, R. D.; ONGHERO, L.; ULIANO, V. G.; DE BRITO, J.; CAMPOS, C. E. M.; GLEIZE, P. J. P. Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: an early-age investigation. **Journal of Building Engineering**, v. 38, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102187. Acesso em: 03 dez. 2024.

MENÉNDEZ, E.; SANJUÁN, M. Á.; RECINO, H. Study of microstructure, crystallographic phases and setting time evolution over time of Portland cement, coarse silica fume, and limestone (PC-SF-LS) ternary Portland cements. **Crystals**, v. 13, n. 1289, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/cryst13081289. Acesso em: 03 dez. 2024.

ONESIPPE POTIRON, Cristel; BILBA, Ketty; RATIARISOA, Rijaniaina Valéry; SAVASTANO JUNIOR, Holmer; ARSENE, Marie-Ange. Enhancement of the reactivity of sugarcane bagasse ash for Pozzolan-Lime Paste: Effect of particle size. **Construction and Building Materials**, v. 350, 2022, p. 128561. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128561. Acesso em: 09 de jan. 2025.

PEDRAZA, J.; ZIMMERMANN, A.; TOBÓN, J.; SCHOMÄCKER, R.; Rojas, N. On the road to net zero-emission cement: Integrated assessment of mineral carbonation of cement kiln dust. **Chemical Engineering Journal**, v. 408, 2021, p. 127346. ISSN 1385-8947. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127346. Acesso em: 16 de jan. 2025.

PETIT, Horacio A.; PAULO, Cecilia I.; CABRERA, Oscar A.; IRASSAR, Edgardo F. Evaluation of the dustiness of fugitive dust sources using gravitational drop tests. **Aeolian Research**, v. 52, 2021, p. 100724. ISSN 1875-9637. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100724. Acesso em: 16 de jan. 2025.

RODRÍGUEZ, J.; FRÍAS, M.; TOBÓN, J. I. Eco-efficient cement based on activated coal washing rejects with low content of kaolinite. **Construction and Building Materials**, v. 274, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122118. Acesso em: 03 dez. 2024.

RODRIGUES, M. S.; PAYÁ, J.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SAVASTANO, H. Jr.; BERALDO, A. L. Study of the Pozzolanic Reactivity of Sugar Cane Straw Ashes (SCSA) Burned under Controlled Conditions. **Materials**, v. 16, 2023, p. 6841. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma16216841. Acesso em: 09 de jan. 2025.

ROSA, Luis da Silva; SOUSA, Kaique Gomes de; FILHO, Ademar Roberto Gross; SOUSA, Fernando Henrique Fernandes. Materiais cimentícios suplementares: Histórico e novas tendências. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 07, n. 04, p. 121-127, abr. 2020. ISSN 2448-0959. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/materiais-cimenticios. Acesso em: 15 ago. 2024.

RUVIARO, Artur Spat; BRITO, Jorge de; GLEIZE, Philippe Jean Paul; PELISSER, Fernando. Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: Analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment. **Construction and Building Materials**, v. 363, 2023, p. 129762. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129762. Acesso em: 09 de jan. 2025.

SANJUÁN, M. Á.; ARGIZ, C. A ten-year study on alkali content of coal fly ash. **Fuels**, v. 3, p. 365-374, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/fuels3020023. Acesso em: 03 fev. 2025.

SANJUÁN, M. Á.; ESTÉVEZ, E.; ARGIZ, C. Alkali Ion Concentration Estimations in Cement Paste Pore Solutions. **Applied Sciences**, v. 9, 2019, p. 992. Disponível em: https://doi.org/