

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

MICHELE SEVERO ANDRADE AQUINO

**A INDÚSTRIA DO CIMENTO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA
DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS RECICLÁVEIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2024

MICHELE SEVERO ANDRADE AQUINO

**A INDÚSTRIA DO CIMENTO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA
DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS RECICLÁVEIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**The cement industry as a sustainable alternative for the final disposal of recyclable
waste from civil construction**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Área de Concentração: Tecnologias e Processos Ambientais.

Linha de Pesquisa: Monitoramento e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Nagalli

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba**



MICHELE SEVERO ANDRADE AQUINO

**A INDÚSTRIA DO CIMENTO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA DESTINAÇÃO FINAL DOS
RESÍDUOS RECICLÁVEIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciência E Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologias E Processos Ambientais.

Data de aprovação: 10 de Dezembro de 2024

Dr. Andre Nagalli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Alexandre Erbs, Doutorado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Ifsc

Dra. Karina Querne De Carvalho Passig, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/12/2024.

À memória do meu irmão Cristiano, que sempre foi meu maior incentivador.

A meu esposo Fabrício e meus filhos Davi e Felipe, por toda a colaboração e paciência durante o desenvolvimento desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida. A Nossa Senhora que caminha à minha frente, abrindo todos os caminhos, abençoando e protegendo.

A meu esposo, Fabrício e a meus filhos Davi e Felipe por serem meu porto seguro e estarem sempre do meu lado me incentivando e me proporcionando momentos incríveis.

Aos meus pais, que se dedicaram muito a mim, para que eu pudesse alcançar meus objetivos profissionais.

A Larissa Velho e colegas de trabalho pelo apoio e incentivo nessa jornada.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR e aos professores, pelo ensino de excelência.

Ao meu orientador, André Nagalli, que sempre esteve disposto a me ouvir, corrigir e incentivar. Mostrando-me que o caminho é árduo, mas com a devida dedicação, dará certo.

Aos membros da banca Karina Querne de Carvalho Passig e Alexandre Erbs os meus sinceros agradecimentos pelas contribuições neste trabalho.

“O sucesso não é acidental, ele provém de longos dias de luta.”

José Aldo

RESUMO

AQUINO, Michele Severo Andrade. **A indústria do cimento como alternativa sustentável para destinação final dos resíduos recicláveis de construção civil**. 2024. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

O setor da construção civil, em crescente evolução, é responsável pela geração de uma parcela significativa de resíduos, o que representa no Brasil, hoje, cerca de 50%, de todo resíduo sólido gerado. A indústria do cimento é uma das maiores emissoras de dióxido de carbono no mundo, sendo responsável por cerca de 7%, em média, de todo o CO₂ emitido pelo homem, um dos gases que mais contribui para o aumento do efeito estufa. Esta pesquisa teve como objetivo analisar o potencial de aplicação da indústria do cimento como alternativa sustentável para destinação final dos resíduos recicláveis provenientes da construção civil, sob a perspectiva da redução das emissões de CO₂ na cimenteira. A pesquisa foi classificada como mista, abrangendo uma parcela exploratória e outra explicativa, e envolveu revisão bibliográfica sobre os resíduos recicláveis da construção civil e indústria do cimento. O método de investigação abrangeu o mapeamento de mercado e experimentos laboratoriais para caracterização dos materiais, bem como o estudo das possíveis rotas de destino no processo de fabricação do cimento e identificação de fatores que contribuem para aplicação desta pesquisa em termos de sustentabilidade. Os resultados mostraram que é possível a utilização de resíduos recicláveis de construção civil, gerados por Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção Civil na indústria do cimento, como combustível alternativo, matéria prima alternativa, substituto do clínquer e/ou aditivo no cimento, tendo sido identificadas as limitações para cada aplicação. A pesquisa revelou que a incorporação de resíduos recicláveis na produção de cimento pode contribuir para redução as emissões de CO₂ nas cimenteiras e contribuir com as Usinas de reciclagem, sendo mais uma possibilidade para o destino, diminuindo a parcela enviada a aterro, possibilitando-o a ter maior vida útil. Concluiu-se que a utilização de resíduos recicláveis, gerados por Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção Civil, na produção de cimento emerge como solução promissora e sustentável frente aos desafios ambientais enfrentados pela indústria cimenteira, contribuindo também com as usinas de reciclagem, sendo mais uma alternativa sustentável de destino.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos; Combustível Alternativo; Destinação de Resíduos; Sustentabilidade, Descarbonização.

ABSTRACT

AQUINO, Michele Severo Andrade. **The cement industry as a sustainable alternative for the final disposal of recyclable waste from civil construction.** 2024. 107 p. Dissertation (Master's in Environmental Science and Technology) – Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, 2024.

The construction sector, which is continuously evolving, is responsible for generating a significant portion of waste, accounting for about 50% of all solid waste generated in Brazil today. The cement industry is one of the largest emitters of carbon dioxide in the world, responsible for approximately 7% of all CO₂ emitted by humans, making it one of the gases that contributes most to the increase of the greenhouse effect. This research aimed to analyze the potential application of the cement industry as a sustainable alternative for the final disposal of recyclable waste generated from construction, from the perspective of reducing CO₂ emissions within cement plants. The study was classified as mixed, encompassing both exploratory and explanatory components, and involved a literature review on recyclable construction waste and the cement industry. The investigation method included market mapping and laboratory experiments for material characterization, as well as the study of potential disposal routes within the cement manufacturing process and the identification of factors that contribute to the application of this research in terms of sustainability. The results showed that it is feasible to utilize recyclable construction waste generated by Recycling Plants for Construction Waste in the cement industry as an alternative fuel, alternative raw material, clinker substitute, and/or additive in cement, with limitations identified for each application. The research revealed that incorporating recyclable waste into cement production could help reduce CO₂ emissions in cement plants and support recycling plants, providing another possibility for waste disposal and decreasing the amount sent to landfills, thereby extending their lifespan. It was concluded that the use of recyclable waste generated by Recycling Plants for Construction Waste in cement production emerges as a promising and sustainable solution to the environmental challenges faced by the cement industry, also contributing to recycling plants as another sustainable alternative for waste disposal.

Keywords: Solid Waste; Alternative Fuel; Waste Disposal; Sustainability; Decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hierarquia para gestão de resíduos sólidos no Brasil.	21
Figura 2 - Geração de RCD (mt significa milhões de toneladas) nos principais aglomerados urbanos.	23
Figura 3 - Estimativa do índice de reciclagem e capacidade instalada de produção das usinas de reciclagem brasileiras.	26
Figura 4 - Distribuição das fábricas de cimento no Brasil.	29
Figura 5 - Consumo aparente no Brasil.	30
Figura 6 - Processo de produção de cimento Portland.	30
Figura 7 - <i>Layout</i> de uma instalação típica de produção de cimento Portland via seca.	31
Figura 8 - Foto do Clínquer.	34
Figura 9 - Relação de Consumo de água com a dimensão do agregado.	37
Figura 10 - Diagrama de fluxo do processo de fabricação de cimento e contribuição (%) das diferentes partes do processo nas emissões totais de CO ₂	46
Figura 11 - Emissões específicas de CO ₂	48
Figura 12 - O caminho para a neutralidade do carbono no Brasil.	50
Figura 13 - Evolução na substituição de clínquer ao longo dos anos.	53
Figura 14 - Perfil dos combustíveis alternativos utilizados pela indústria brasileira.	55
Figura 15 - Evolução da utilização de combustíveis alternativos (cenário de redução 2 °C). .	55
Figura 16 - Resultados projetados na indústria brasileira de cimento até 2050.	57
Figura 17 - Tela da Ferramenta de Busca de CNPJ – EMPRESAQUI.	61
Figura 18 - Funil de pesquisa de Mercado.	61
Figura 19 - Programa experimental das fases da pesquisa.	63
Figura 20 - Pontos de retirada de amostra da pilha de material.	65
Figura 21 - Quantidade de amostra a ser coletada para realização dos ensaios físicos ou químicos.	65
Figura 22 - Processo de quarteramento manual de amostra.	66
Figura 23 – Materiais separados pela triagem nas Usinas de RCC.	67
Figura 24 – Materiais utilizados para beneficiamento nas Usinas de RCC.	67
Figura 25 - Quarteramento realizado nas amostras coletadas (AGR 1 e 2 e materiais triados) nas Usinas A e B.	68
Figura 26 - Quarteramento realizado nas amostras coletadas (AGR 3) nas Usinas A e B.	68
Figura 27 - Amostras identificadas reservadas para análise no laboratório.	69

Figura 28 - Separador para redução de amostra de campo em laboratório: (a) separador; (b) separador em uso.	69
Figura 29 - Fluxograma do processo da Usina A de Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil.	75
Figura 30 - Fluxograma do processo da Usina B de Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil.	76
Figura 31 - Materiais recebidos nas usinas de reciclagem.	77
Figura 32 - Realização da triagem manual para separação dos rejeitos.	77
Figura 33 - Agregados Reciclados.	78
Figura 34 - Agregados reciclados após beneficiamento.	78
Figura 35 - Resultados dos ensaios de teor de finos dos agregados reciclados, em percentual.	79
Figura 36 - Resultados dos ensaios do IAP com cimento, dos agregados reciclados em 7 dias (R7), em percentual.	80
Figura 37 - Resultados dos ensaios do IAP com cimento dos agregados reciclados em 28 dias (R28), em percentual.	81
Figura 38 - Resultados dos ensaios do Poder Calorífico Superior dos resíduos de madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em kcal/kg.	85
Figura 39 - Resultados do teor de umidade dos resíduos da madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em percentual.	86
Figura 40 - Resultados do teor de cloreto dos resíduos da madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em percentual.	87
Figura 41 - Resultados do teor de cinzas dos resíduos da madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em percentual.	88
Figura 42 - Resultados dos ensaios de FRX do CaO dos resíduos de gesso reciclado e de gesso natural, em percentual.	89
Figura 43 - Resultados dos ensaios de FRX do CaO, comparativo entre os resultados do Resíduo de Gesso e do Gesso Sintético, em percentual.	90
Figura 44 - Resultados dos ensaios de FRX de SO ₃ do Resíduo de Gesso e Gesso Natural, em percentual.	91
Figura 45 - Resultados dos ensaios de FRX de SO ₃ do Resíduo de gesso e Gesso Sintético, em percentual.	91

Figura 46 - Resultados do ensaio de P_2O_5 , via FRX, do gesso reciclado e gesso sintético, em percentual.....	93
Figura 47 -Resultados do Teor de Umidade do gesso reciclado e gesso natural, em percentual.	95
Figura 48 - Resultados do Teor de Umidade do gesso reciclado e gesso sintético, em percentual.....	95
Figura 49 - Proposta de rota sustentável para destinação dos Resíduos Recicláveis da Construção Civil.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização gravimétrica dos Resíduos da Construção Civil.....	25
Tabela 2 - Características de granulometria dos agregados reciclados.	28
Tabela 3 - Composição química dos Agregados Reciclados por Fluorescência de Raios-X (FRX), em percentual.	82
Tabela 4 - Resultados da análise estatística ANOVA referente ao parâmetro CaO para os Resíduos de Gesso e Gesso Natural.	89
Tabela 5 - Resultados da análise estatística ANOVA, referente ao parâmetro CaO, entre Resíduo de Gesso e Gesso Sintético.....	90
Tabela 6 - Resultados da análise estatística ANOVA, referente ao parâmetro SO ₃ , entre Resíduo de Gesso e Gesso Natural.	92
Tabela 7 - Resultados da análise estatística ANOVA, referente ao parâmetro SO ₃ , entre Resíduo de Gesso e Gesso Sintético.....	92
Tabela 8 - Resultados da análise estatística ANOVA referentes ao parâmetro P ₂ O ₅ obtido para os Resíduos de Gesso e de Gesso Sintético.....	94
Tabela 9 - Resultados da análise estatística ANOVA referentes ao Teor de Umidade dos Resíduos de Gesso e Gesso natural.	96
Tabela 10 - Resultados da análise estatística ANOVA referentes ao Teor de Umidade dos Resíduos de Gesso e Gesso Sintético	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação e exemplos dos Resíduos da Construção civil.	24
Quadro 2 - Contribuição para o <i>Net Zero</i> por categoria.	51
Quadro 3 - Quadro resumo sobre as possíveis rotas alternativas para os RRCC, abordando as principais contribuições e limitações.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição;
C&D	Construção e Demolição;
CDIAC	<i>Carbon Dioxide Information and Analysis Center;</i>
CCUS	Captura de Carbono;
CSI	Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento;
GCCA	<i>Global Cement and Concrete Association;</i>
GEE	Gases do efeito estufa;
IEA	<i>International Energy Agency;</i>
IFC	<i>International Finance Corporation;</i>
NBR	Norma Brasileira;
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável;
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos;
RCC	Resíduo da Construção Civil;
RDC	Resíduo de Demolição e Construção;
RFX	Fluorescência de Raio X;
RRCC	Resíduo Reciclado da Construção Civil;
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento;
USEPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency;</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná;
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development;</i>

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS	20
2.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	21
2.2.1 Classificação e composição dos RCC	23
2.2.2 Destinação dos Resíduos da Construção Civil.....	25
2.2.3 Usinas de Reciclagem de RCC.....	27
2.3 INDÚSTRIA DO CIMENTO	29
2.3.1 Panorama geral da indústria do cimento no Brasil.....	29
2.3.2 Etapas de produção do cimento.....	31
2.3.3 Controle de Qualidade dos materiais.....	36
2.3.4 Emissões de CO ₂ associado à produção de cimento	45
2.3.5 Descarbonização.....	48
3 METODOLOGIA	60
3.1 MAPEAMENTO DO MERCADO DE USINAS DE RECICLAGEM	60
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	62
3.3 USINAS DE RECICLAGEM DE RCC – FASE 1	64
3.3.1 Mapeamento do processo	64
3.3.2 Amostragem e preparo de amostras	64
3.3.3 Quarteamento das amostras.....	68
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS – FASE 2	69
3.4.1 Preparação das amostras.....	69
3.4.2 Métodos empregados na caracterização das amostras.....	70
3.5 PESQUISA EXPLORATÓRIA - FASE 3	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1 USINAS DE RECICLAGEM	74
4.1.1 Fluxograma do processo de triagem e beneficiamento de RCC.....	74
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS	79
4.2.1 Substituto de matéria prima e/ou clínquer.....	79
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS TRIADOS	83
4.3.1 Combustível Alternativo	84

4.3.2 Aditivo ao cimento	88
4.4 PROPOSTA DE ROTA ALTERNATIVA, POTENCIAL DE APLICAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES EM TERMOS DE SUSTENTABILIDADE	97
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	102
6 REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento é crucial para o desenvolvimento infraestrutural global, mas é também uma das principais fontes de emissões de CO₂. Essas emissões se devem principalmente aos processos de calcinação do calcário e a queima de combustíveis fósseis. Durante a calcinação, o calcário (carbonato de cálcio) é aquecido a altas temperaturas para produzir clínquer, componente fundamental do cimento (Scrivener *et al.*, 2018). Esse processo libera CO₂ como subproduto, contribuindo significativamente para a pegada de carbono da indústria. Além disso, a queima de combustíveis fósseis para gerar energia necessária para esse processo adiciona mais CO₂ à atmosfera. Estima-se que a indústria de cimento seja responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂ (Marmier, 2023), um número alarmante considerando o papel vital do cimento em projetos de construção. Com a crescente pressão para reduzir a pegada de carbono e enfrentar as mudanças climáticas, encontrar alternativas sustentáveis para produção de cimento tornou-se prioridade.

Ao mesmo tempo, a crescente geração de resíduos da construção civil, que constitui aproximadamente 50% do total de resíduos sólidos produzidos nas grandes cidades do Brasil (Oliveira, 2015) representa desafio significativo para a sustentabilidade urbana e ambiental, uma vez que esses materiais, quando não geridos adequadamente, podem causar sérios impactos negativos, como degradação do solo, poluição e ocupação inadequada de espaços urbanos. Lima e Cabral (2012) apontam que a construção civil é uma atividade de grande impacto ambiental, apresentando elevada utilização de recursos naturais para produção de bens de consumo e sendo responsável por grande parte dos resíduos sólidos gerados atualmente. Com o aumento das atividades de construção e demolição, torna-se crucial explorar alternativas viáveis para destinação final desses resíduos, seguindo a hierarquia estabelecida na Política Nacional de Resíduos Sólidos, especialmente em um cenário onde a pressão sobre os recursos naturais é cada vez maior (Brasileiro; Matos, 2015). A proposta de reciclar/reutilizar esses resíduos e utilizá-los como substituto para matérias-primas, clínquer, aditivos no cimento e/ou combustível alternativo na produção de cimento pode reduzir as emissões de CO₂ e melhorar a gestão de resíduos, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010).

Nesse contexto, a indústria do cimento surge como uma alternativa inovadora e sustentável, ao integrar resíduos recicláveis provenientes de indústrias de reciclagem em seu processo produtivo.

O uso de agregados reciclados, gesso e combustíveis alternativos derivados de resíduos da construção civil não apenas contribui para redução da quantidade de material

encaminhada para aterros, mas também diminui a necessidade de extração de matérias-primas virgens, mitigando os impactos ambientais associados à mineração. Contudo, o processo de produção de cimento tradicional é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa, tornando imperativo que a indústria busque formas de se adaptar e inovar (Scrivener *et al.*, 2018).

Ao incorporar práticas sustentáveis, a indústria do cimento não só se posiciona como protagonista na gestão de resíduos, mas também gera ganhos significativos em termos de eficiência energética e redução de emissões. Além disso, essa abordagem está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles que visam promover cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11), garantir padrões de consumo e produção responsáveis (ODS 12), e combater as mudanças climáticas (ODS 13) (Baggio *et al.*, 2024).

Neste trabalho, foi explorada a relevância da indústria do cimento como solução sustentável para destinação final dos resíduos recicláveis da construção civil, analisando seus impactos, benefícios e contribuição para um futuro mais sustentável, em consonância com os ODS globais.

A caracterização dos materiais é de fundamental importância nesta pesquisa e demanda por metodologia adequada para desenvolvimento da pesquisa para avaliar os materiais e sugerir rotas para os resíduos de recicláveis da construção civil, bem como contribuições em termos de sustentabilidade na cimenteira.

1.1 JUSTIFICATIVA

As expectativas da sociedade em relação ao desenvolvimento sustentável, transparência e responsabilidade evoluíram com legislações cada vez mais rigorosas, pressões crescentes sobre o ambiente devido à poluição, uso ineficiente de recursos, gestão inadequada de resíduos, mudanças climáticas, degradação de ecossistemas e perda da biodiversidade (Cioca *et al.*, 2019).

Alcançar o equilíbrio entre ambiente, sociedade e economia é considerado essencial para atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das gerações futuras. O desenvolvimento sustentável como meta é alcançado equilibrando estes três pilares da sustentabilidade (Cioca *et al.*, 2019).

A implementação de medidas para o desenvolvimento sustentável ajuda as empresas a reduzirem seus impactos (Cioca *et al.*, 2019), o que é fundamental diante das consequências advindas das mudanças climáticas.

Este trabalho está em linha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular, ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis para promover práticas que reduzem o impacto ambiental, ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis para incentivar a gestão sustentável e reduzir resíduos e ODS 13 – Ação Climática para mitigar as mudanças climáticas por meio da redução de emissões, uso de resíduos de construção e demolição, promover a economia circular na construção civil, reduzir a extração de recursos naturais, especialmente os não renováveis, minimizar as emissões de CO₂ e reduzir a depreciação ambiental pelo acúmulo destes resíduos em aterros sanitários (Baggio *et al.*, 2024).

O presente estudo justifica-se pelo fato de que há limitação de estudos científicos sobre a aplicação de resíduos recicláveis da construção civil na indústria do cimento no Brasil. O trabalho também explora, além de diferentes tipos de resíduos oriundos das Usinas, diferentes destinos para resíduos dentro da indústria, sugerindo alternativas para redução das emissões de CO₂.

Mediante o exposto, este trabalho contribui para o desenvolvimento sustentável do planeta, propondo algumas alternativas de rotas para o destino de resíduos de construção civil provenientes de indústrias de reciclagem na indústria do cimento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo da pesquisa é analisar o potencial de aplicação da indústria do cimento como alternativa sustentável para destinação final dos resíduos recicláveis provenientes da construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo, propostos para alcançar o objetivo geral, são:

- Caracterizar os resíduos recicláveis da construção civil quanto a suas propriedades físicas, químicas e mecânicas;
- Identificar alternativas para destinação dos resíduos recicláveis da construção civil nas cimenteiras;
- Propor rotas sustentáveis para destinação final na indústria do cimento e;

- Indicar contribuições, das rotas de destinação estudadas, em termos de sustentabilidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados os diversos assuntos sobre os resíduos recicláveis de construção civil, processo de beneficiamento nas usinas de reciclagem, processo de fabricação de cimento e coprocessamento de resíduos. Por fim, são detalhados os impactos ambientais do aumento do volume de geração dos resíduos da construção civil e os impactos ambientais na produção do cimento.

2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil, Lei nº 12.305, instituída em 2 de agosto de 2010 (Brasil, 2010) tornou-se um marco legal. Nesta legislação são dispostos os princípios, objetivos e instrumentos, bem como as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e os instrumentos econômicos aplicáveis.

Segundo descrito na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), a responsabilidade é compartilhada entre governos, empresas e cidadãos na gestão dos resíduos sólidos. Nesta legislação são estabelecidas diretrizes para gerenciamento dos resíduos, incluindo a logística reversa, que exige que fabricantes e importadores recolham seus produtos e embalagens após o uso. Também são exigidos que os municípios e estados criem planos de gestão integrada de resíduos sólidos, abordando desde a coleta até a destinação final. Incentiva a redução na geração de resíduos e a reutilização de materiais, além de promover a reciclagem. Regulamenta a operação de aterros sanitários, definindo critérios para a sua instalação e operação e fomenta a educação e a conscientização ambiental sobre o manejo de resíduos sólidos.

A lei visa criar um sistema mais eficiente e sustentável para o manejo dos resíduos, buscando minimizar os impactos ambientais e promover a saúde pública.

Na Figura 1 é apresentada a hierarquia a ser adotada para gestão de resíduos sólidos no Brasil seguindo os princípios da gestão de resíduos sólidos apresentados na PNRS (Brasil, 2010).

Figura 1 - Hierarquia para gestão de resíduos sólidos no Brasil.



FONTE: O autor (2024).

A base da pirâmide deve ser a Não geração (1) de resíduos, uma forma utilizada para prevenção, a fim de promover redução na fonte a geração de resíduos. A Reutilização (2) de resíduos é proposta como uma forma de prolongar a vida útil dos materiais e reduzir a necessidade de novos recursos. Isso se alinha com a ideia de economia circular, na qual os materiais são mantidos em uso pelo maior tempo possível. A Reciclagem (3) é o processo de transformação dos resíduos sólidos, que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos.

Na segmentação da pirâmide, Tratamento (4), entrariam algumas alternativas como reaproveitamento energético, incineração, coprocessamento de resíduos, entre outros, a fim de reduzir o impacto ambiental e vida útil de aterros. E por fim, como ápice da pirâmide, e em menor quantidade, a Disposição Final (5), que, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, é a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimizar os impactos ambientais adversos.

2.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002 (Brasil, 2002) do Conselho Nacional do Meio Ambiente, resíduos da construção civil (RCC):

São os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (Brasil, 2002).

Nos últimos tempos, o crescimento contínuo das atividades de construção e demolição (C&D) resultou em aumento na utilização de recursos naturais, bem como na produção global de resíduos de C&D. Uma grande parte dos resíduos de C&D produzidos é descartada em aterros no mundo, embora alguns países tenham adotado instalações de reciclagem e reutilização para estes resíduos (Khan *et al.*, 2024)

A produção de resíduos no mundo tem aumentado continuamente, o que, se gerido corretamente, poderá poupar enormes quantidades de energia e beneficiar a economia.

A indústria da construção representa 26% do total global de resíduos do mundo e consome 30% dos recursos naturais (Benachio *et al.*, 2020). Infelizmente, aproximadamente 35% dos resíduos de construção e demolição (C&W) globais são descartados em aterros (Benachio *et al.*, 2020).

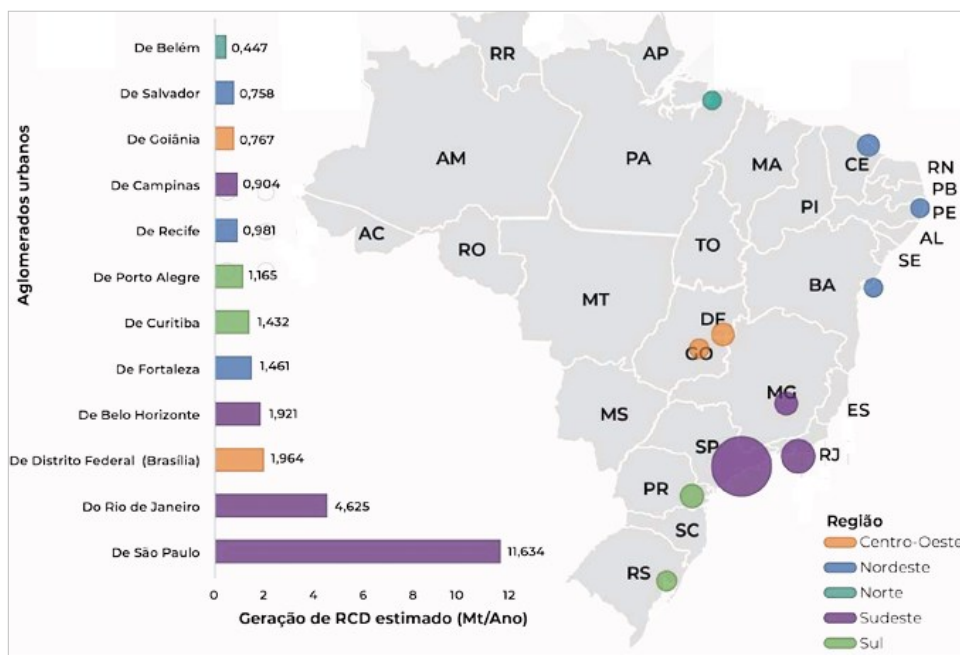
Com produção combinada de resíduos de mais de dois mil milhões de toneladas, China, Índia e EUA são os contribuintes mais significativos neste cenário. A contribuição anual da China para os resíduos C&D foi de 30-40%, com quantidade total de 1.130 milhões de toneladas (Swarna *et al.*, 2022). Os Estados Unidos são responsáveis por 30% dos resíduos de C&D no mundo (Swarna *et al.*, 2022). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), os resíduos C&D quantificados em 2014 foi de 534 MT (USEPA, 2016). A quantidade produzida de resíduos de C&D aumentou para 569 MT em 2017, com aumento na taxa de reciclagem de 70% (Swarna *et al.*, 2022).

A produção anual de resíduos de construção é de aproximadamente 900 ton na União Europeia, representando 25-30% da produção de resíduos (Mália *et al.*, 2013).

O Brasil enfrenta desafios significativos na gestão dos resíduos da construção civil, refletindo tanto a complexidade do setor quanto a magnitude dos problemas ambientais associados. De acordo com o Relatório de Gestão de Resíduos panorama da Construção Civil (ABRECON, 2019), o país gera aproximadamente 50 milhões de toneladas de resíduos de construção civil por ano, representando cerca de 50% do total de resíduos sólidos gerados.

Na Figura 2 é ilustrada a distribuição de geração nos principais aglomerados urbanos no Brasil.

Figura 2 - Geração de RCD (mt significa milhões de toneladas) nos principais aglomerados urbanos.



FONTE: ABRECON, Pesquisa Setorial, (2019/2020).

Este volume elevado resulta da combinação de crescimento urbano, atividades de demolição e reformas frequentes.

A gestão inadequada dos RCC no Brasil é um problema significativo, com falta de infraestrutura adequadas para a triagem, reciclagem e disposição final dos resíduos resulta em práticas inadequadas, como descarte irregular em áreas não autorizadas e aterros e baixa taxa de reciclagem. Apesar dos avanços na reciclagem de resíduos, a taxa de reciclagem dos RCC no Brasil ainda é baixa. Estima-se que menos de 10% dos resíduos de construção sejam reciclados (ABRECON, 2022), com grande parte sendo enviada para aterros ou descartada em áreas inadequadas. Além disto, o desconhecimento e a falta de capacitação, muitos profissionais da construção civil carecem de conhecimento sobre práticas adequadas de gestão de resíduos e a importância da separação e reciclagem dos materiais.

2.2.1 Classificação e composição dos RCC

Os resíduos de construção e de demolição são tipicamente heterogêneos, constituídos por materiais diversos. Isso porque as construções são fabricadas com grande diversidade de materiais, algumas vezes compósitos de materiais, e cuja separação nem sempre é facilitada durante os processos de desagregação ou de construção (Nagalli, 2022).

Os resíduos da construção civil (RCC) são classificados em quatro classes (A, B, C e D), conforme a Resolução nº307, Conama, de 05 de julho 2022 (Brasil, 2022) (Quadro 1).

Quadro 1 - Classificação e exemplos dos Resíduos da Construção civil.

CLASSE A	Reutilizável ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras.
CLASSE B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.
CLASSE C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
CLASSE D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

FONTE: Adaptado da Resolução nº307, CONAMA (Brasil, 2002).

Para avaliar a composição média dos RCC, vários fatores devem ser considerados, tais como a tipologia construtiva utilizada, as técnicas construtivas existentes e os materiais disponíveis em cada região. Ainda nesse contexto, devem ser considerados os índices de perdas de materiais mais significativos, ou seja, a composição do RCC também é um reflexo dos insumos que têm os índices de desperdício mais elevados no setor. Segundo Vieira e Dal Molin (2004), quando se analisa a composição dos resíduos de construção e demolição das cidades, percebe-se que sua composição, em geral, possui elevados percentuais de concreto, material cerâmico e argamassa, independentemente da região, estado e país em que foram gerados.

Com relação à geração de RCC, esta varia com o tipo de cidade e sua população, assim como com o patamar de desenvolvimento econômico.

No Brasil, os materiais foram caracterizados em estudos e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização gravimétrica dos Resíduos da Construção Civil.

Materiais	Percentual (%)
Concreto e Argamassa	33,30
Material Cerâmico	21,74
Solo e areia	18,85
Madeira	5,94
Demolição (diversos)	4,05
Finos	3,98
Papel/plástico/metal/fios/vidro	3,38
Gesso	2,94
Pedras/rochas	2,63
Tijolo	1,47
Embalagens Contaminadas	0,76
Outros	0,65
Fibrocimento	0,21
Material orgânico	0,10

FONTE: Adaptado de Costa, Rosado e Penteado (2017).

Na caracterização apresentada na Tabela 1 os resíduos gerados em obra em sua grande maioria são de Classe A.

2.2.2 Destinação dos Resíduos da Construção Civil

A gestão dos resíduos da C&D ainda é incipiente e os materiais reciclados carecem de um controle de qualidade mais eficaz para uso em larga escala. Existe desigualdade na gestão dos resíduos de C&D entre as regiões brasileiras. A região Sudeste possui 65% das plantas de reciclagem, enquanto não há nenhuma na região norte. Em relação à coleta dos resíduos de C&D, na região Sudeste corresponde a 52,1% do total, enquanto a região Norte coleta apenas 3,9% (Thives *et al.*, 2022).

Os problemas ambientais ocasionados pelas disposições irregulares já são conhecidos. A massa de resíduos de construção é muito significativa e corresponde a mais da metade de resíduos sólidos gerados nas cidades.

Quando os RCC são dispostos nas vias públicas, podem entupir galerias de água, causando enchentes e entupimento do sistema de águas pluviais. Quando disposto em aterros sem qualquer tipo de triagem, tipicamente lixivia sulfatos, provenientes do gesso de construção e de alguns elementos metálicos como ferro e alumínio, o que pode causar alterações nos

padrões de potabilidade da água, ou modificar o solo local de forma que parem de apresentar os níveis requeridos para uso em atividades agrícolas. Em casos mais extremos, se resíduos perigosos não forem triados previamente, pode haver contaminação do solo com metais pesados (de maior toxicidade), como chumbo em construções antigas, provenientes da madeira tratada.

Os dados da Figura 3 foram sistematizados a partir dos relatórios setoriais da ABRECON. Foi estabelecida a faixa de produção das usinas brasileiras e os dados de produção extrapoladas considerando-se a existência de 360 usinas acumuladas no país até 2019 (320 cadastradas, mais uma estimativa de 40 usinas não identificadas, 23% a mais do total). Vale ressaltar que esse número pode estar superestimado porque não considera as usinas que deixaram de operar, mas representa uma primeira aproximação para essas estimativas nacionais (ABRECON, 2022).

Figura 3 - Estimativa do índice de reciclagem e capacidade instalada de produção das usinas de reciclagem brasileiras.

	PS 2013	PS 2014/2015	PS 2017/2018	PS 2019/2020
Respostas das usinas (em unidades)	96	93	96	88
Total de usinas (em unidades) (+)	310	310	360	360
Geração de RCD (t/ano)	100.516.000	102.225.000	103.830.000	105.073.500
Produção informada (m³/mês)	426.453	431.500	290.370	400.488
Produção convertida (t/ano) (*)	6.140.923	6.213.600	4.181.328	4.805.856
Produção extrapolada (t/ano)	19.830.065	20.712.000	15.679.980	16.944.692
Capacidade máxima informada (t/ano)	13.065.794	13.808.000	11.946.651	12.019.680
Capacidade máxima extrapolada (t/ano)	42.191.627	46.026.667	44.799.943	50.487.520
Índice de reciclagem (%) (**)	19,7	20,3	15,1	16,1
Capacidade instalada (%) (***)	42,0	45,0	43,1	48,0

(+) Número estimado pela ABRECON (número de usinas cadastradas x 1,2)
 (*) Multiplicar por 1,2 t/m³ (densidade aparente do agregado reciclado) x 12 meses
 (**) Produção extrapolada / geração de RCD.
 (***) Capacidade máxima de produção / geração de RCD

FONTE: ABRECON, Pesquisa Setorial, (2019/2020).

Na Figura 3 é apresentada a produção nacional de agregados reciclados e capacidade máxima instalada de produção das usinas vem crescendo a cada ano. Porém, a capacidade instalada das Usinas de Reciclagem não atende nem 50% do volume total de resíduos gerados, evidenciando a problemática gerada com essa tipologia de resíduos.

2.2.3 Usinas de Reciclagem de RCC

Em termos gerais, os resíduos de construção e demolição (C&D) são divididos em materiais inertes (areia, tijolos, cerâmicas e concreto) e materiais não inertes (plástico, vidro, papel, madeira, vegetação e outros materiais orgânicos) (Ulubeyli *et al.*, 2017). O objetivo das usinas de reciclagem é beneficiar os materiais inertes, separando em diferentes granulometrias, e realizar a separação dos materiais não inertes.

Os resíduos de construção e de demolição repercutem nas dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade concomitantemente, quer pelos impactos ao ambiente, quer por atividades humanas na cadeia de reciclagem, como também geram emprego e renda (Nagalli, 2022).

As vantagens das usinas reciclagem são conservação/preservação de áreas preciosas, prolongamento da vida útil dos aterros, rentabilidade da utilização de produtos reciclados, melhoria do estado ambiental geral em termos de energia e poluição, minimização do consumo de recursos, utilização de resíduos que caso contrário, seriam perdidos em aterros e na criação de empregos. No entanto, na ausência de grandes incentivos econômicos, as tentativas de promover significativamente o comportamento de reciclagem podem não ser fáceis de conduzir à mudança comportamental necessária (Ulubeyli *et al.*, 2017).

Existem usinas de reciclagem fixas e móveis, sendo as instalações estacionárias com capacidade de 100 a 350 ton/h nas quais geralmente são adotadas tecnologias de nível superior e são normalmente equipadas com equipamentos de classificação para separação de frações indesejadas. São adequadas para áreas de alta densidade, capazes de produzir produtos de alta qualidade e eficientes devido à produção de diversos produtos reciclados de diversas graduações. No entanto, o investimento inicial para instalação de tal planta pode ser excessivo (Kumbhar *et al.*, 2013). As centrais móveis, com capacidades até 100 ton/h, tratam quantidades menores de RCC em locais de demolição temporária, implementam tecnologias básicas e normalmente produzem agregados de reciclagem de baixa qualidade pela reciclagem *in situ*. Eles são economicamente viáveis na quantidade de 5.000 a 6.000 ton/local (Kumbhar *et al.*, 2013).

A cadeia de reciclagem de RCC provou ser ecoeficiente, uma vez que os impactos evitados são superiores aos impactos gerados para os indicadores ambientais (Coelho; Brito, 2013).

Na NBR 15.116 (ABNT, 2004), agregado reciclado é definido como:

Agregado reciclado é um material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura (ABNT, 2004, p.02).

Basicamente, o processo de reciclagem se resume a britagem do RCD da classe A, reduzindo sua granulometria e produzindo o agregado reciclado. A classificação de agregados reciclados está descrita na Tabela 2. Entretanto, antes desse processo é necessária a retirada de materiais indesejáveis, tais como vidro, metais, borracha e madeira (Ângulo, 2005).

Tabela 2 - Características de granulometria dos agregados reciclados.

Reciclado	Características	Principais usos
Areia	Material com diâmetro máximo inferior a 4,8 mm, isento de impurezas.	Argamassa de vedação de alvenaria, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
Agregado Fino	Material com diâmetro máximo inferior a 6,3 mm, isento de impurezas.	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, tubos de esgoto.
Agregado Grosseiro 1	Material com diâmetro máximo inferior a 39 mm, isento de impurezas.	Produção de betão não estrutural e obras de drenagem.
Agregado Grosseiro 2	Material com diâmetro máximo inferior a 63 mm, isento de impurezas.	Para construção de estradas como base, camadas de reforço e regularização do subleito; aterros e regularização topográfica e terreno.

FONTE: ABRECON (2021).

Essas aplicações demonstram como a reciclagem de resíduos da construção civil não só reduz o impacto ambiental dos projetos de construção, mas também promove inovação e sustentabilidade no setor. Ao integrar materiais reciclados, a construção civil pode avançar em direção a práticas mais ecológicas e responsáveis.

A implantação de usinas de reciclagem com produção regular e padrões de qualidade definidos ainda não se transformou em rotina adotada pelas prefeituras, nem pela iniciativa privada. Apesar disso, alguns municípios estão se organizando para adotar política de gerenciamento de seus resíduos.

A reciclagem, além de ser promovida em instalações permanentes, pode ser realizada no próprio canteiro, utilizando equipamentos móveis. Essa abordagem remete à execução dos processos de britagem e peneiramento no próprio local de produção dos resíduos e de utilização do agregado reciclado logo que é processado. Tal prática reduz o consumo de agregados naturais, a destinação em aterros, os custos de transporte, energia e desgaste com estradas e equipamentos (Goonan, 2000). Devidamente reciclado, o entulho apresenta propriedades

físicas e químicas apropriadas para seu emprego como material de construção, embora o custo da produção e venda do agregado reciclado, ainda seja um desafio para o setor, uma planta de reciclagem de RCC é economicamente viável (Brum *et al.*, 2021).

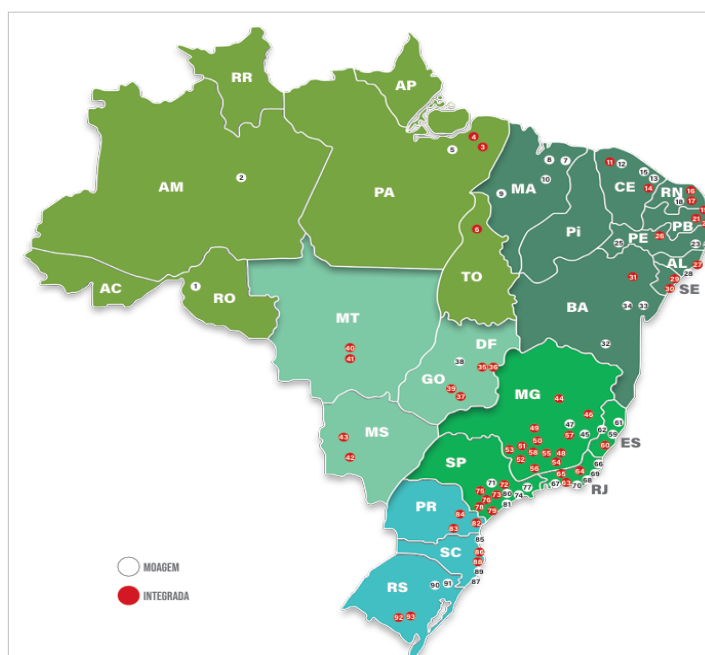
No entanto, os RCC são formados de uma grande variedade de componentes. A proporção desses materiais em diferentes amostras é muito variável e de grande heterogeneidade. Esse é um dos motivos da baixa utilização de agregados reciclados, dificultando seu aproveitamento pela indústria (Vieira; Dal Molin, 2004).

2.3 INDÚSTRIA DO CIMENTO

2.3.1 Panorama geral da indústria do cimento no Brasil

Segundo dados do Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC, 2022), a indústria brasileira de cimento é composta por 93 fábricas de cimento, distribuídas entre 23 estados brasileiros, concentradas em sua grande maioria na região Sudeste e Nordeste, conforme apresentado na Figura 4, com capacidade instalada de mais de 94 milhões de ton. No ano de 2022, a produção foi de 63,4 milhões de toneladas, gerando aproximadamente 18 mil empregos diretos (SNIC, 2022).

Figura 4 - Distribuição das fábricas de cimento no Brasil.

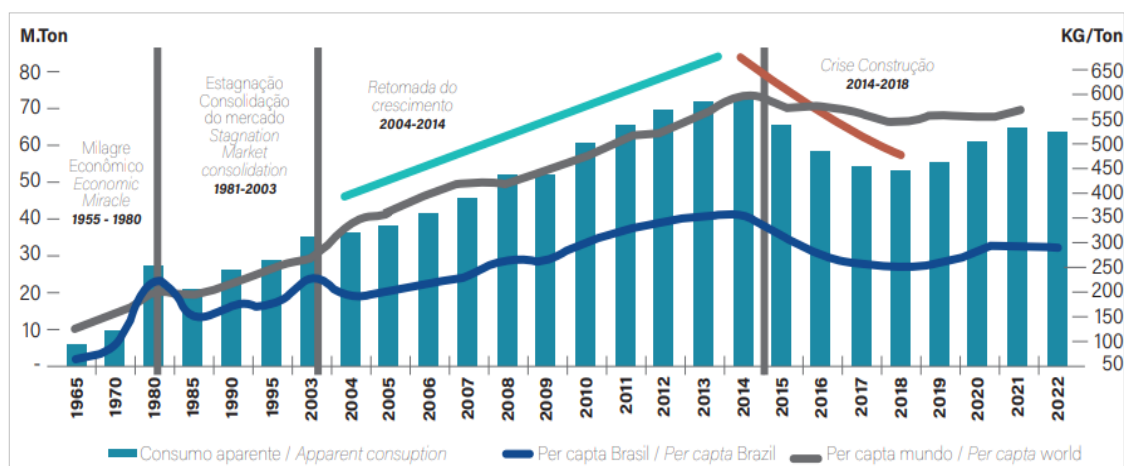


FONTE: ABCP (Panorama do Coprocessamento, Ano Base 2022).

Informações sobre o consumo de cimento nos últimos 57 anos no Brasil estão apresentadas na Figura 4, na qual se percebe expressivo aumento a partir de 2004. Entretanto,

verifica-se diminuição na produção e no consumo a partir de 2015 e retomada no crescimento em 2019, sendo produzidos cerca de 63,4 milhões de toneladas (SNIC, 2022).

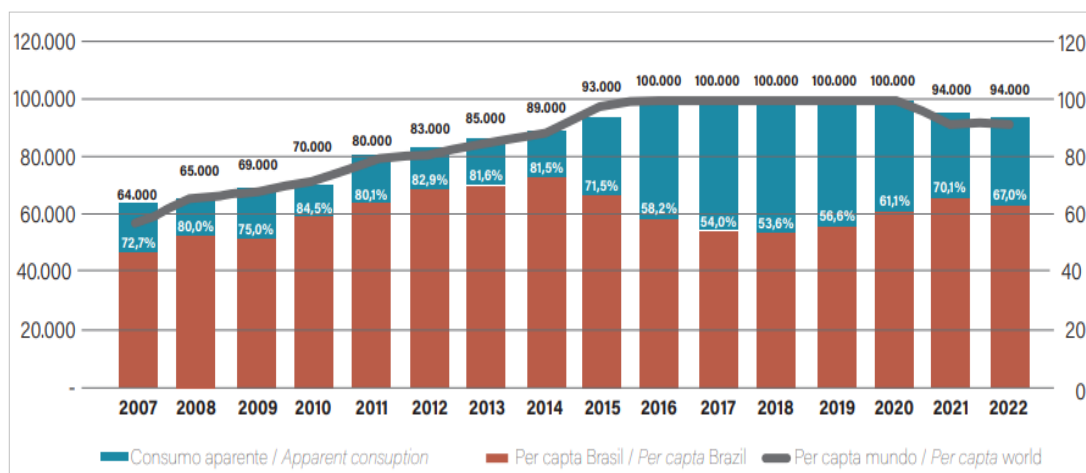
Figura 5 - Consumo aparente no Brasil.



FONTE: SNIC (2022).

O Brasil, como país em desenvolvimento, tem um importante programa de infraestrutura a ser implementado, e o aumento da população, aliado aos seus crescentes padrões de urbanização, deverá impulsionar a demanda por cimento nas próximas décadas. Atualmente, a capacidade instalada para fabricação de cimento no Brasil é de aproximadamente 94 milhões de toneladas, havendo ainda espaço suficiente para crescimento em produção, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Processo de produção de cimento Portland.



FONTE: SNIC (2022).

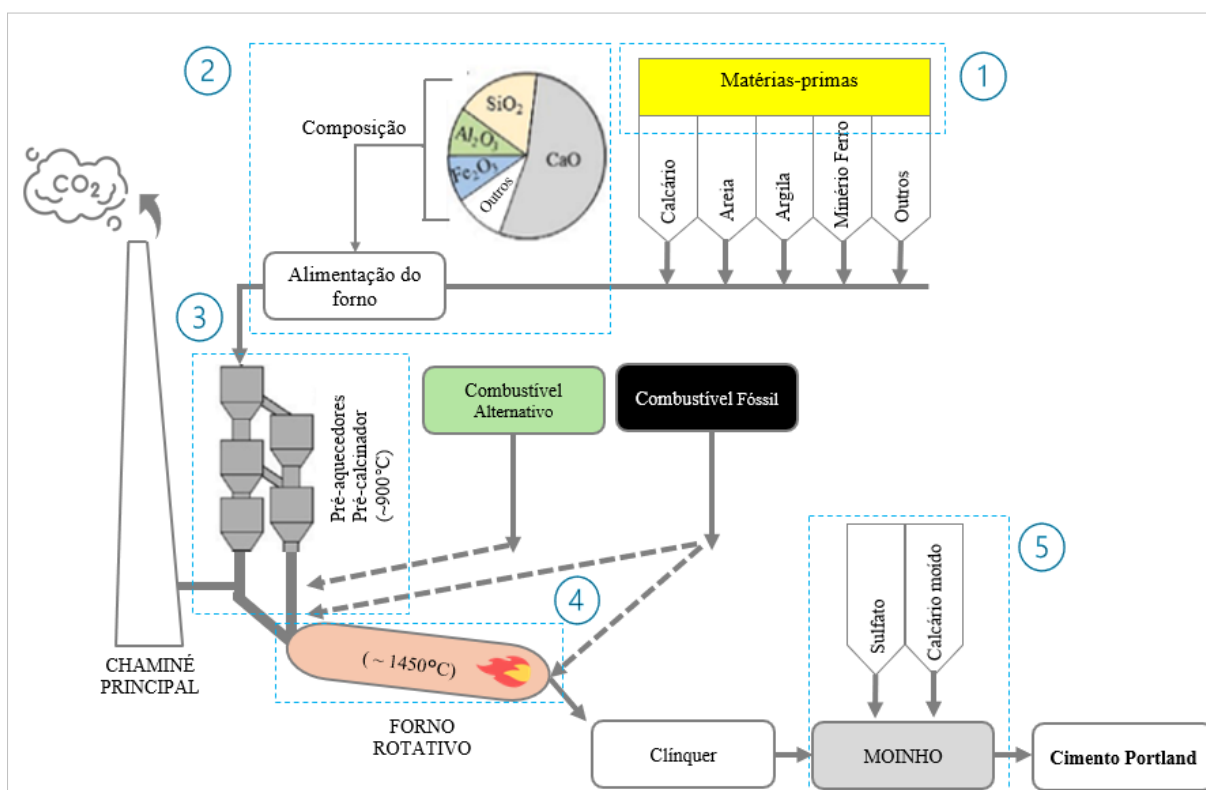
Há espaço para aumento da produção de cimento nas fábricas instaladas no Brasil, com possibilidade de construção de novas fábricas. Aliada a essa capacidade e a tendência de crescimento do setor, o setor busca minimizar impactos ambientais, associados à extração de matérias-primas e processo produtivo, em termos de emissões de CO_2 .

2.3.2 Etapas de produção do cimento

O processo de fabricação do cimento é composto por diversas etapas, que vão desde a extração de matérias-primas, passando pela produção do clínquer, produto intermediário fundamental, até a sua mistura a outros componentes que determinam os tipos de cimentos disponíveis no mercado.

O processo produtivo do cimento Portland está esquematicamente ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - *Layout* de uma instalação típica de produção de cimento Portland via seca.



FONTE: Adaptado de SCHINDLER (2014).

De forma resumida, estas etapas são descritas a seguir:

1. Extração de matérias-primas

A mineração é a primeira etapa no processo de produção do cimento. Nesta etapa ocorre extração das matérias-primas mais importantes do processo, como calcário, que fornece carbonato de cálcio (CaCO_3) que é essencial para o cimento. Pequenas quantidades de materiais “corretivos”, como minério de ferro, bauxita, xisto, argila ou areia, que também são escavados a partir de minas, podem ser necessárias para fornecer conteúdos extras de óxido de ferro (Fe_2O_3), alumínio (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), a fim de adequar a composição química da farinha crua necessária ao processo de fabricação e aos requisitos do produto (Schindler *et al.*, 2014).

A proporção das matérias-primas normalmente é de 75-80% de calcário, 20-25% de argila e possivelmente pequenas quantidades de minério de ferro e/ou areia para ajustar a composição geral a fim de satisfazer os requisitos do cimento Portland produzido (Manning *et al.*, 2019).

O calcário pode ser dividido em três classes de acordo com o teor de magnésio, sendo (Bernardo, 2009):

I. Calcário calcítico (CaCO_3): o teor de óxido de magnésio (MgO) varia de 0 a 4%. Esse calcário é mais quebradiço que os outros devido a maior quantidade de cálcio presente na sua constituição.

II. Calcário magnesiano (MgCO_3): o teor de MgO varia de 4 a 18%.

III. Calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): o teor de MgO é superior a 18%. Para a fabricação de cimento Portland é utilizado somente o calcário calcítico. Somente ele pode ser utilizado devido ao baixo teor de MgO presente em sua composição. A matéria prima deve possuir no máximo 3% de MgO , pois em alta concentração no clínquer pode produzir um cimento de baixa durabilidade.

Ao contrário do calcário, existem diversos tipos de argila que podem ser utilizadas na fabricação de cimento Portland. Portanto, a escolha da argila utilizada no processo irá depender da disponibilidade, da distância da jazida em relação à fábrica e da relação sílica/alumínio do material. Durante o processo de fabricação do clínquer, a argila fornece os compostos Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 . Nem sempre a argila utilizada tem a quantidade de óxidos de ferro e alumínio ideal para o processo, portanto pode ser adicionado óxido de ferro e alumínio à matéria-prima (Bernardo, 2009).

Ainda nesta etapa, os materiais extraídos passam por britagem para redução do tamanho das partículas.

Para esta etapa que se busca materiais com alto índice de CaO , a fim de substituir o calcário proveniente de extração dos recursos naturais, a reação de descarbonatação na indústria do cimento é a etapa na qual ocorre o maior nível de emissão de CO_2 (Benhelal *et al.*, 2021).

2. Moagem e homogeneização da farinha crua

As diferentes matérias-primas são misturadas para manter a composição química necessária em um processo chamado “pré-homogeneização”. O material anteriormente britado é moído para produzir a “farinha crua”. Para garantir a alta qualidade do cimento, a composição química das matérias-primas e da farinha crua é cuidadosamente monitorada e controlada (Ramasamy *et al.*, 2023).

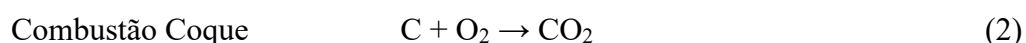
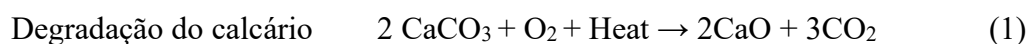
3. Pré-calцинаção

Nesse processo, a energia térmica dos gases de exaustão do forno é recuperada, e a farinha é pré-aquecida diminuindo o diferencial de temperaturas entre a mesma e o forno, aumentando a eficiência das reações e economizando combustível. No final do pré-aquecimento, o material já se encontra em uma temperatura em torno de 800 °C, ideal para o início da pré-calцинаção. Nesta etapa ocorre 90% da reação de calcinação, que consiste na decomposição do calcário em óxido de cálcio (Pisciotta *et al.*, 2023). Isso garante processo de calcinação completo e transforma o material bruto para alimentação a 1000 °C (Ramasamy *et al.*, 2023).

A temperatura permanece constante nesse processo por meio da adição de combustíveis na câmara. Sendo assim, essa etapa permite a queima de combustíveis com poder calorífico menor do que o permitido para os fornos rotativos, aumentando a utilização de combustíveis secundários com baixo poder calorífico e economizando os combustíveis utilizados no forno (Belato, 2013).

O pré-calcinador é tipicamente aquecido por coque e/ou combustíveis alternativos. Os combustíveis utilizados no pré-calcinador e no forno resultam em CO₂ (Reação 2), mas representam apenas 40% das emissões totais, com os outros 60% vindo da decomposição do calcário (Pisciotta *et al.*, 2023).

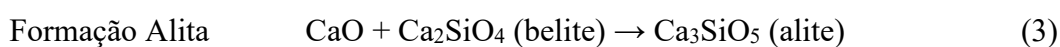
A reação de calcinação está representada na Reação 1:



4. Clinquerização

A farinha pré-calcinada então entra no forno rotativo. O combustível é queimado no forno ao alimentar um maçarico em temperaturas de até 1.450 °C. O forno é inclinado de 1° a

4° horizontalmente e gira lentamente a 30–250 rpm. Os materiais se movem da extremidade elevada para a outra extremidade (Ramasamy *et al.*, 2023). À medida que o forno gira, o material desliza e cai através de zonas progressivamente mais quentes em direção à chama. Dessa forma, garante-se a queima uniforme e gradual do material. O clínquer é formado a 1450 °C devido à reação dentro do forno, conforme descrito na Reação (3). O alite é formado quando o material calcinado é misturado com belita. Uma quantidade excessiva de óxido de cálcio permanecerá no clínquer devido a reações incompletas causadas pela falta de belitas (Ramasamy *et al.*, 2023).



Ao final da etapa de clinquerização, ocorre o processo de resfriamento, um resfriador é utilizado para reduzir a temperatura do clínquer de 1450 para 100 °C. Cerca de 30% do calor é recuperado e utilizado durante vários ciclones para o pré-aquecimento (Ramasamy *et al.*, 2023).

O processo de clinquerização gera o clínquer, ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Foto do Clínquer.



FONTE: O autor (2024).

O clínquer, principal componente utilizado para fabricação do cimento, o clínquer mais aditivos (gesso e outros), gera o cimento.

5. Moagem e Adições

O clínquer produzido no processo de clinquerização é pulverizado em um pó de cimento fino durante o processo de moagem.

Nesta etapa, pode ocorrer a substituição do clínquer por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), os mais comuns utilizados são cinzas e escórias (SNIC, 2022). A característica principal para essas substituições, se deve à característica pozolânica de alguns

materiais que é observada pela análise de IAP com cimento. Pozolanas são materiais naturais ou artificiais, silicosos e aluminosos que por si só não possuem poder aglomerante, mas que em presença de água à temperatura ambiente, reagem com hidróxido de cálcio, gerando compostos de poder aglomerante (Kilhara, 1982).

O clínquer é misturado com gesso ou anidrido natural em até 5% para regular o tempo de pega do cimento. O gesso é a última adição ao processo. É adicionado ao cimento, devido a sua capacidade de ser um aglomerante proveniente da gipsita, utilizado em grande escala no setor de construção civil, devido às suas propriedades de aderência. Ele é introduzido com a finalidade de retardar a pega do cimento após a adição de água (Bernardo, 2009).

O gesso utilizado como fonte de gipsita pode ser de origem natural (convencional) ou sintética (Fosfogesso). O gesso natural é extraído diretamente da natureza, geralmente de depósitos de gesso sedimentar. Este material é composto principalmente de sulfato de cálcio diidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). O gesso sintético é produzido artificialmente, geralmente como um subproduto de processos industriais. Os principais métodos de produção envolvem a captura de sulfato de cálcio de processos industriais, como a produção de ácido fosfórico ou a fabricação de fertilizantes.

O uso de fosfogesso e outros gessos sintéticos para substituir o gesso natural como retardador de pega para o cimento é limitado principalmente devido à variação no teor de umidade e impurezas, que podem interferir na trabalhabilidade do cimento (Potgieter *et al.*, 2004). O óxido de cálcio, proveniente de aditivos, é um componente importante que influencia a capacidade do gesso de retardar o tempo de pega do cimento Portland. O CaO no gesso reage com a água durante a hidratação e contribui para formação de um gel de sulfato de cálcio, que controla o tempo de endurecimento do cimento. Segundo a NBR 13207 (ABNT, 2017), o teor de mínimo de 38% de CaO.

Para garantir desempenho ótimo, o teor de SO_3 no gesso utilizado na indústria do cimento deve estar em uma faixa específica. Segundo a NBR 13207 (ABNT, 2017), para construção civil, é recomendado o teor mínimo de 53% de SO_3 para garantir que o gesso desempenhe efetivamente seu papel como retardador de pega, sem comprometer a resistência e a durabilidade do cimento. Teores de SO_3 abaixo dessa faixa podem resultar em tempos de pega mais rápidos, dificultando o controle durante a aplicação e a mistura do cimento. Por outro lado, teores superiores podem levar a problemas como formação excessiva de etringita, o que pode afetar negativamente as propriedades do cimento e a durabilidade do concreto.

A presença de óxidos como o fósforo deve ser cuidadosamente monitorada para evitar impactos negativos na qualidade do cimento. O pentóxido de fósforo (P_2O_5) é tipicamente

encontrado em pequenas quantidades no clínquer, variando de 0,1 a 1,5%, normalmente incorporados aos silicatos, alita e belita (Taylor, 1997; Hurdowski, 2014).

O teor de óxido de fósforo (P_2O_5) no gesso deve ser minimizado, o fósforo pode interagir com outros componentes do cimento, como o alumínio e o cálcio, resultando em possível alteração nas características do cimento, como resistência e durabilidade.

Outro parâmetro considerável para o ensaio de gesso é a umidade. O teor de umidade no gesso utilizado na indústria do cimento deve ser cuidadosamente controlado para garantir que o gesso desempenhe seu papel de maneira eficaz e não comprometa a qualidade do cimento. Segundo a NBR 13207 (ABNT, 2017), a especificação química recomendada para uso na indústria do cimento seria de no mínimo 1,3% de umidade.

Usando um britador de rolos, muitas plantas de cimento alcançam uma redução preliminar do tamanho do clínquer e do gesso. Em seguida, moinhos de bolas ou de tubos (cilindros de aço rotativos e horizontais contendo bolas de liga de aço) são usados para moer os materiais. Partículas de cimento de tamanho maior são filtradas usando o separador de ar e retornadas para moagem, formando um processo de moagem em circuito fechado. O produto acabado é transferido usando elevadores de caçamba e correias transportadoras para os silos de armazenamento. Finalmente, o cimento é embalado e está pronto para a entrega (Ramasamy *et al.*, 2023).

2.3.3 Controle de Qualidade dos materiais

2.3.3.1 Matérias Primas, clínquer, substitutos e aditivos

a) Finura

Na norma ABNT NBR 11579 - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200), é descrito o método de ensaio para determinação da finura do cimento Portland com o emprego da peneira 75 μm (nº 200) pelos procedimentos manual e mecânico. É determinada a porcentagem, em massa, de cimento cujas dimensões de grãos são superiores a 75 μm (fração retida).

Na Equação 1 é apresentado o cálculo do índice de finura do cimento.

$$F = \frac{RC}{M} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

F = índice de finura do cimento, em porcentagem;

R = resíduo do cimento na peneira 75 μm , em g;

M = massa inicial do cimento, em g;

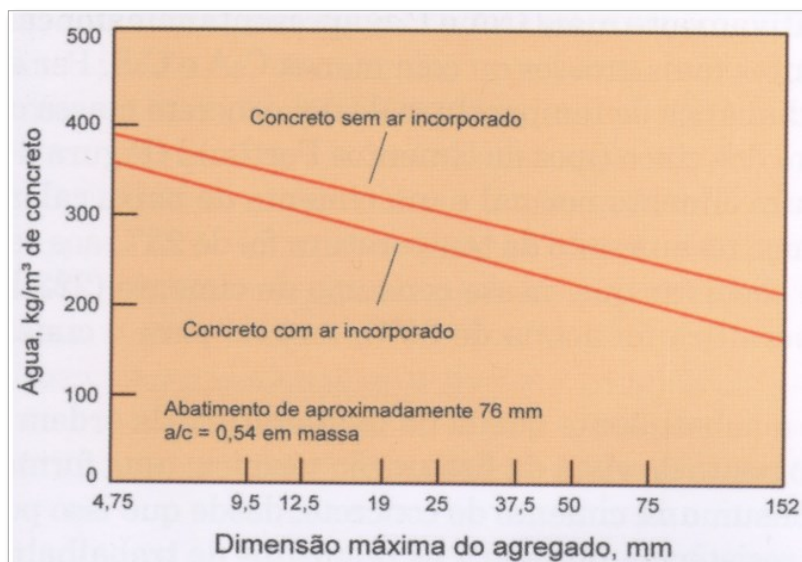
C = fator de correção da peneira utilizada no ensaio, devendo estar compreendido no intervalo de $1,00 \pm 0,20$.

A finura do cimento é caracterizada pelo índice de finura, que é o material retido na peneira de 75 μm , expresso em porcentagem de massa, calculado até os décimos. O resultado do ensaio é o valor obtido em uma única determinação.

O teor de finos é uma variável importante que afeta a trabalhabilidade do agregado reciclado, quando em quantidades excessivas (Gokce *et al.*, 2016).

Para Mehtha e Monteiro (2006), a finura do cimento afeta sua reatividade com a água. Pode-se dizer que quanto mais fino o cimento, mais rapidamente ele reagirá. Na Figura 9, Mehtha e Monteiro (2006) ilustram que o consumo de água depende da finura do agregado, relacionando o consumo de água com a dimensão dos agregados.

Figura 9 - Relação de Consumo de água com a dimensão do agregado.



FONTE: Mehtha e Monteiro (2006).

A substituição parcial de cimento com finura convencional por cimento ou outros materiais mais finos, em teores de 20%, apresenta ganhos na resistência à compressão, segundo Sajedi e Razak (2011).

b) Fluorescência de Raios X (FRX) e Perda ao Fogo

A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) é um método de análise qualitativa e quantitativa da composição dos elementos da amostra, pela excitação de átomos e detecção de seus raios X característicos (Bruker, 2016).

Os princípios físicos da fluorescência X são simples e bem conhecidos (Jenkins et al., 1995). Com a aplicação desta análise é possível induzir transições eletrônicas entre os orbitais mais internos dos átomos utilizando radiações eletromagnéticas de energia adequada (raios X e raios gama). Essas transições podem resultar na emissão de radiações X de energia característica que permitem identificar a espécie atômica envolvida na transição e a mensuração da sua abundância. Mais especificamente, neste processo a energia da radiação de fluorescência identifica o elemento, enquanto sua intensidade permite que seja medida sua concentração na amostra analisada mediante uma prévia calibragem (Faretto, 2009).

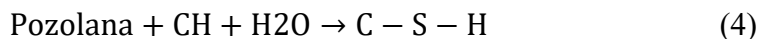
O ensaio de perda ao fogo de matérias-primas (ABNT NBR NM18:2012,), é importante para os cálculos da dosagem das farinhas de clínquer para obter a efetiva quantidade de elementos em óxidos que cada material contribuirá após a queima no forno, durante a calcinação.

c) Índice de Atividade Pozolânica com Cimento

Segundo a norma NBR 12653 (1992), pozolanas são materiais silicosos ou silico-aluminosos, que quando moídos e misturados com água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades de se aglomerar. Porém, esses materiais possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante sem a adição de água.

As reações de hidratação do cimento Portland, que são reações químicas entre os silicatos e aluminatos com água, ocorrem quase que instantaneamente à medida que se adiciona água ao cimento (Neville, 1997). Os principais constituintes do cimento são silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). O C_3S é responsável pela resistência inicial e pelo aumento da resistência final da pasta, apresentando rápida hidratação e desprendendo quantidade média de calor, comparado às outras fases. O C_2S é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas, apresenta lenta hidratação e desprende pequena quantidade de calor. A hidratação dos dois compostos produz silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH).

Quando materiais pozolânicos são acrescentados à mistura durante a hidratação do cimento, a sílica (SiO_2) e/ou alumina (Al_2O_3) amorfas, presentes nestes materiais, reagem com o hidróxido de cálcio (CH), liberado na hidratação do cimento, formando C-S-H e C-A-H, de acordo com a Reação 4.



De forma simplificada, a reação do hidróxido de cálcio com a pozolana pode variar em função do conteúdo da pozolana, teor de SiO_2 ativo na mistura, natureza das fases ativas da pozolana, taxa de reação, área superficial da pozolana, relação de sólidos por água e temperatura da mistura (Cordeiro, 2006).

Para avaliação da reatividade de um material a ser empregado como aditivo mineral, o índice de atividade pozolânica é um parâmetro significativo, pois simula uma situação real de aplicação (Cordeiro, 2006). De acordo com procedimentos da NBR 5752:2014, o ensaio consiste na razão entre a resistência média à compressão de corpos de prova moldados com substituição de 35% de cimento pelo material avaliado e a resistência média de uma argamassa de referência (Equação 2).

$$\text{IAP} = \frac{f_{cp}}{f_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

Em que:

IAP: Índice de atividade pozolânica com Cimento Portland;

f_c : resistência média à compressão dos corpos de prova moldados com cimento areia e água aos 28 dias;

f_{cp} : resistência média a compressão dos corpos de prova moldados com substituição de 35% da massa do cimento, usado na referência, por material pozolânicos aos 28 dias.

O Índice de Atividade Pozolânica (IAP) é uma medida da capacidade de um material pozolânico para reagir com a cal livre no cimento e formar compostos que melhoram as propriedades do cimento. O IAP é crucial para determinar a eficácia de substitutos do clínquer, como os agregados reciclados, na fabricação de cimentos com características desejáveis. Um IAP mais alto indica maior atividade pozolânica, o que é vantajoso para resistência e durabilidade do cimento (Filho et al., 2017).

A crescente demanda por soluções sustentáveis na indústria da construção tem levado à exploração de alternativas para substituir o clínquer em cimentos. Entre essas alternativas, o uso de agregados reciclados tem se destacado como opção promissora devido a sua capacidade de reduzir o impacto ambiental associado à produção do cimento. O Índice de Atividade

Pozolânica (IAP) é uma das principais métricas para avaliar a eficácia de materiais substitutos em cimentos, tais como o agregado reciclado.

Para determinar o índice de atividade pozolânica (IAP), foram fabricadas amostras cilíndricas de argamassa (5×10 cm) de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014). O cimento utilizado na produção da argamassa foi o CP II F 32, que não contém material pozolânico. Seis amostras foram moldadas para o teste de resistência à compressão, as quais foram curadas por 28 dias antes do teste.

2.3.3.2 Combustíveis Alternativos

a) Poder Calorífico Superior (PCS)

O Poder Calorífico Superior é a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa da amostra em volume constante em uma atmosfera de oxigênio, assumindo que os produtos da combustão consistem em O_2 , CO_2 , SO_2 e N_2 em fase gasosa, juntamente com a água que estava presente na amostra e a que é gerada a partir do hidrogênio combinado na forma líquida (Regueira *et al.*, 2011).

O poder calorífico dos resíduos é um fator crucial para o coprocessamento na indústria cimenteira, uma vez que influencia diretamente a eficiência energética e a viabilidade econômica do processo. O poder calorífico, que representa a quantidade de energia que pode ser obtida a partir da queima de um combustível, é essencial para determinar a adequação dos resíduos como substituto de combustíveis tradicionais. O poder calorífico superior é geralmente estimado usando uma bomba calorimétrica (Wang *et al.*, 2021), método utilizado para os ensaios de PCS.

A calorimetria de bomba é o método mais comum utilizado para determinar o valor calorífico bruto de combustíveis sólidos, e tem sido desenvolvida ao longo de muitos anos. Na calorimetria de bomba, o carvão queima em uma bomba, e o calor da combustão é transferido para a água fora da parede da bomba. Termômetros são usados para medir a temperatura da água, e o valor calorífico é calculado com base nas mudanças de temperatura da água e em fórmulas de correção (Wang *et al.*, 2021).

O material de referência de ácido benzóico é indispensável para calibração de bombas calorimétricas (Sem *et al.*, 2024).

A definição do poder calorífico é a quantidade de energia na forma de calor que é liberada pela combustão de uma unidade de massa. No Sistema Internacional, o poder calorífico

é expresso em joules por grama (J/g) ou Quilo joules por quilograma (kJ/kg), mas é comumente expresso em quilocaloria por quilograma (kcal/kg).

O poder calorífico é dividido entre superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão acontece a volume constante e no qual a água formada na combustão é condensada e o calor que é derivado da condensação é recuperado. O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após a dedução das perdas com a evaporação da água (Erdogane, 2021).

O poder calorífico é uma das características mais importantes de um combustível e pode ser medido a volume constante ou à pressão constante. A medição à volume constante é realizada por uma bomba calorimétrica e a pressão constante por um calorímetro para gases. Na avaliação da composição de um combustível, ele geralmente é composto de carbono, hidrogênio e oxigênio.

Quanto à especificação técnica e limites aceitáveis para PCS, na Resolução SIMA n°47, de 06 de agosto de 2020 (SIMA, 2020), são estabelecidas as diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR. Além desta resolução, na Resolução SIMA n° 145, de 22 de dezembro de 2021 (SIMA, 2021) é estabelecido procedimento para análise do processo de licenciamento da atividade de preparo de combustível derivado de resíduos perigosos para coprocessamento em fornos de clínquer. Nestas resoluções é estabelecido o limite mínimo de 2775 kcal/kg de Poder Calorífico Inferior para coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.

No Estado do Paraná exigências e critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais são estabelecidos na Resolução CEMA n° 76, de 30 de novembro de 2009 (CEMA, 2009) para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento para substituição de matéria prima ou aproveitamento energético, com poder calorífico superior de no mínimo 1500 kcal/kg.

b) Teor de Umidade

O teor de umidade afeta diretamente a eficiência da combustão. A umidade reduz o poder calorífico efetivo dos materiais. Quando os materiais contêm umidade elevada, parte da energia fornecida pelo combustível é usada para evaporar a água, o que pode reduzir a eficiência térmica e exigir maior quantidade de material para atingir a mesma energia térmica. A presença de umidade pode afetar a estabilidade e o controle do processo de combustão nos fornos de cimento. A água evapora a altas temperaturas e pode levar a variações na temperatura do forno

e a possíveis interrupções no processo, exigindo ajustes na operação do forno e afetando a qualidade do cimento produzido.

A referência do teor de umidade para combustível recuperado sólido é de 21% (Fyffe *et al.*, 2016). A umidade pode influenciar as emissões de poluentes. A evaporação da água durante a combustão pode formar vapor d'água e, em alguns casos, pode contribuir para formação de compostos indesejáveis, tais como ácidos. Além disso, a presença de umidade pode impactar a formação de cinzas e o gerenciamento de resíduos.

O teor de umidade foi obtido a partir da secagem térmica. A amostra de resíduo sólido deve ser homogênea e representativa. A amostra é geralmente triturada ou peneirada para garantir que tenha tamanho de partícula uniforme e que seja representativa do material total. Um peso conhecido da amostra é pesado com precisão. Esse peso inicial é usado para calcular a perda de massa após a secagem.

A amostra é submetida a um processo de secagem em um forno ou estufa a temperatura controlada (geralmente entre 105 e 110 °C) até que toda a água presente na amostra seja evaporada. A secagem deve ser feita até que a massa da amostra seja constante, o que indica que a umidade foi completamente removida.

Após a secagem, a amostra é resfriada em um dessecador para evitar a absorção de umidade do ambiente e novamente determinada sua massa. A massa obtida após a secagem representa o peso seco da amostra. O teor de umidade é calculado pela Equação 3.

$$\text{Teor de Umidade (\%)} = \left(\frac{\text{peso inicial} - \text{peso seco}}{\text{peso inicial}} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

Alto teor de umidade pode indicar que o resíduo possui quantidade significativa de água, o que pode influenciar o manejo e o tratamento. Pode ser necessário ajustar os processos de secagem ou armazenamento para lidar com a umidade.

c) Cloretos

O teor de cloretos em combustíveis alternativos na indústria do cimento pode afetar a qualidade do produto, operação dos equipamentos e o impacto ambiental. O controle rigoroso do teor de cloretos é essencial para evitar corrosão acelerada, formação de depósitos e incrustações e emissões de poluentes.

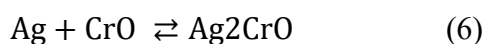
O valor de referência para o teor de cloretos é especificado na Resolução SIMA nº 47, de 06 de agosto de 2020 (SIMA, 2020), na qual são estabelecidas diretrizes e condições para o

licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR e na Resolução SIMA nº 145, de 22 de dezembro de 2021 (SIMA, 2021), na qual é estabelecido o limite máximo de 1%. Os demais estados não possuem legislação específica para este parâmetro, sendo usadas essas legislações como referências.

É fundamental monitorar e controlar o teor de cloretos para prevenir problemas operacionais e prolongar a vida útil dos equipamentos. A combustão de resíduos com altos teores de cloreto pode levar à formação de compostos corrosivos e poluentes, como o ácido clorídrico (HCl) que pode ser emitido no processo. A presença de cloretos pode exigir sistemas adicionais de controle de emissões, como sistemas de neutralização para capturar e tratar o HCl e outros subprodutos ácidos, o que pode aumentar custos operacionais e a complexidade do processo.

A análise do teor de cloretos determina a quantidade de íons cloreto em uma amostra de resíduo sólido. A concentração de cloretos é frequentemente medida em unidades de massa por volume (mg/L) ou em porcentagem (%), dependendo da natureza da amostra e das necessidades do estudo.

O método Argentométrico com detecção visual do ponto de equivalência foi utilizado para quantificação dos íons cloreto. Este procedimento é também conhecido como Método de Mohr para determinação de cloretos e brometos. Na titulação de uma solução neutra ou ligeiramente alcalina dos íons cloreto com solução padrão de nitrato de prata, adiciona-se pequena quantidade de solução de cromato de potássio que age como indicador. No final, quando a reação de precipitação do cloreto for completa, o excesso de íons prata combina-se com os íons cromato (indicador), formando um precipitado de cromato de prata, vermelho, fracamente solúvel, conforme indicado nas reações representadas nas Reações 5 e 6.



Na prática, o ponto final ocorre um pouco além do ponto de equivalência devido à necessidade de adicionar excesso de íons Ag^+ para precipitar o Ag_2CrO_4 em quantidade suficiente para ser notada visivelmente na solução amarela que já contém a suspensão do AgCl . Este método requer que uma titulação em branco seja feita para corrigir o erro cometido na

detecção do ponto final 1. O valor da prova em branco obtido deve ser subtraído do valor da titulação propriamente dita.

A amostra de resíduo sólido deve ser preparada utilizando bomba calorimétrica para permitir a análise dos íons cloreto, com mistura do resíduo com água destilada e a filtragem para obter solução aquosa. O teor de cloretos na amostra é determinado por titulação e calculado de acordo com a Equação 4.

$$\text{Teor de cloreto (\%)} = \left(\frac{\text{volume AgNO}_3 \times \text{Concentração AgNO}_3 \times \text{Fator}}{\text{Volume da amostra}} \right) \quad (4)$$

d) Teor de Cinzas

O teor de cinzas nos combustíveis alternativos pode afetar diretamente a eficiência da combustão nos fornos de cimento. Combustíveis com alto teor de cinzas podem levar à formação de depósitos e incrustações nos sistemas de combustão, o que pode reduzir a eficiência térmica e aumentar o consumo de combustível.

A qualidade do clínquer, produto intermediário na produção do cimento, é influenciada pela composição química dos combustíveis utilizados. Um elevado teor de cinzas pode alterar a composição química da matéria-prima, resultando em variações na qualidade do clínquer. Isso pode afetar as propriedades do cimento final, tais como resistência, durabilidade e desempenho em aplicações específicas. A referência do teor de cinzas para combustível recuperado sólido é de 22% (Fyffe *et al.*, 2016).

A análise do teor de cinzas é uma técnica que mede a quantidade de resíduos sólidos que permanecem após a combustão completa de uma amostra. Esses resíduos, conhecidos como cinzas, consistem em materiais inorgânicos que não se volatilizam durante a queima. A técnica é fundamental para entender a composição dos resíduos e avaliar seu potencial de utilização ou impacto ambiental.

A análise ajuda a identificar a quantidade de minerais e outros materiais inorgânicos presentes nos resíduos. Isso é útil para avaliar a composição dos resíduos e para estudos sobre sua origem e natureza. Em processos industriais, como a fabricação de cimentos ou materiais de construção, conhecer o teor de cinzas dos resíduos pode ajudar a garantir que os materiais atendam aos padrões de qualidade especificados.

A amostra de resíduo sólido deve ser homogênea e representativa. Pode ser necessário triturá-la ou peneirá-la para obter tamanho uniforme das partículas.

A amostra é colocada em um forno mufla e submetida a temperatura geralmente entre 500 e 600 °C para incineração da parte orgânica. A queima é realizada até que toda a matéria orgânica se volatilize, deixando apenas as cinzas inorgânicas. Após a queima, a amostra é resfriada em ambiente controlado e pesada novamente. A massa obtida representa o teor de cinzas, conforme apresentado na Equação 5.

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \left(\frac{\text{peso inicial} - \text{peso após mufla}}{\text{peso inicial da amostra}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

O alto teor de cinzas pode indicar quantidade significativa de materiais inorgânicos no resíduo, o que pode influenciar sua utilização e disposição.

2.3.4 Emissões de CO₂ associado à produção de cimento

A produção de cimento é um dos setores industriais mais intensivos em carbono, com necessidade imediata de descarbonização (Antzaras *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, a questão das mudanças climáticas tem ocupado o topo da agenda global. Seus efeitos estão impactando comunidades e economias ao redor do mundo e espera-se que se intensifiquem (Abbass *et al.*, 2022). De fato, a última década foi a mais quente já registrada, com aumento de 0,08 °C por década desde 1880 (Lindsey, Dahlman, 2021).

Segundo dados do Banco Mundial, as emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) aumentaram cerca de 50% entre 1990 e 2020 no mundo.

O dióxido de carbono é indiscutivelmente o principal gás de efeito estufa (GE), representando 55% do efeito estufa antropogênico (Lindsey; Dahlman, 2021).

Nesse contexto, os ambientalistas argumentam que, além dos fatores naturais, a atividade humana, na forma de crescimento econômico, está intrinsecamente ligada ao aumento das pressões sobre o clima e o ambiente (Abbass *et al.*, 2022).

Portanto, compreender a ligação entre os impactos climáticos e o crescimento econômico é importante ao projetar estratégias para enfrentar os impactos negativos das mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável (Azzeddinne *et al.*, 2024).

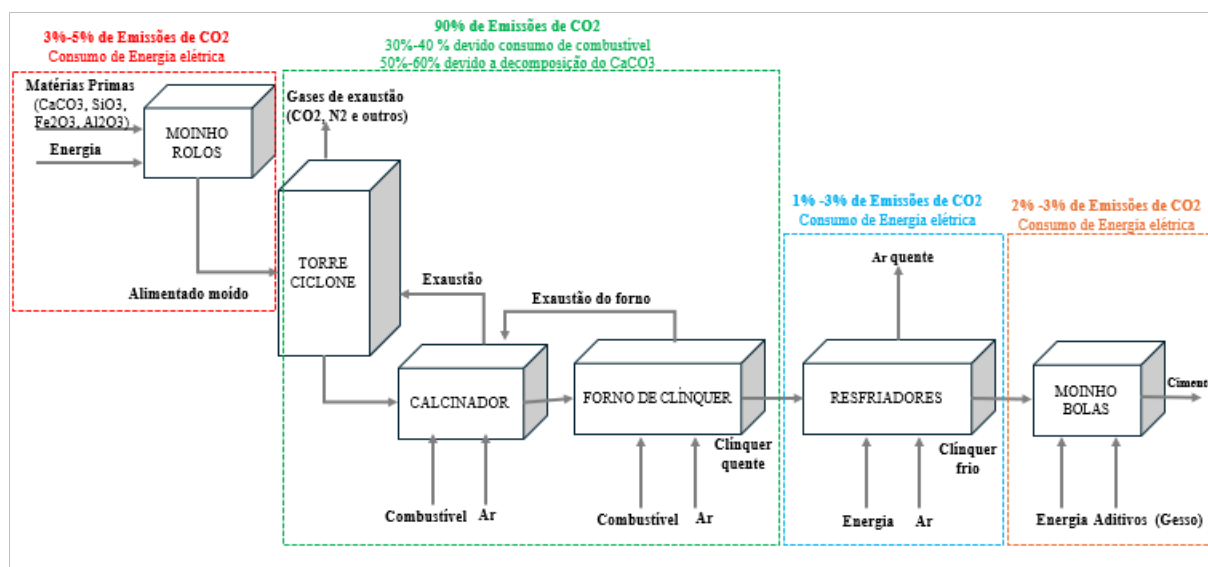
O uso abundante de combustíveis fósseis em grandes usinas de energia estacionárias e em outras indústrias de processamento contribui com 60% do total de CO₂ liberado mundialmente (Agência Internacional de Energia, 2015). Dentre esses, mais de 7% vêm da indústria do cimento, que é uma das maiores fontes estacionárias de emissões de CO₂ (Marmier,

2023). Pesquisas recentes mostram aumento do percentual de contribuição da indústria do cimento que ultrapassou os 7% nos últimos anos (Miller *et al.*, 2021), podendo estar entre 8-10% de contribuição (Rocha *et al.*, 2022).

A produção de cimento é intensiva em energia, exigindo grandes quantidades de energia para o pré-aquecimento das matérias-primas e a calcinação endotérmica da matéria-prima principal (calcário). Uma grande parte das emissões de CO₂ durante a produção de clínquer é inevitável, uma vez que cerca de 60% das emissões totais provêm da calcinação do calcário (decomposição térmica do calcário CaCO₃), sendo que a combustão de combustíveis fósseis para fins energéticos representa os 40% restantes (De Lena *et al.*, 2017).

Na Figura 10 é apresentado um diagrama de fluxo do processo de fabricação de cimento e contribuição (%) das diferentes partes do processo nas emissões totais de CO₂.

Figura 10 - Diagrama de fluxo do processo de fabricação de cimento e contribuição (%) das diferentes partes do processo nas emissões totais de CO₂.



FONTE: Benhelal *et al.* (2021).

Observa-se claramente as etapas do processo e os maiores percentuais de contribuição em termos de emissão de CO₂. De 30% a 40% das emissões diretas de CO₂ provêm da queima de combustíveis e os 50% a 60% restantes são inerentes ao processo e decorrem da reação química envolvida na conversão de calcário em óxido de cálcio (calcinação), precursor da formação do clínquer. Outros percentuais, como demonstrado na Figura 10, ocorrem de forma indireta e resultam do consumo elétrico da planta industrial.

A necessidade de reduzir as emissões de indústrias tão intensivas em energia, substituindo idealmente os combustíveis fósseis por fontes de energia renovável, é de extrema

prioridade (Antzaras *et al.*, 2023). O acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera está causando aumento na temperatura global (aquecimento global), representando uma ameaça extrema à vida na Terra (Climate Change, 2007a, 2007b).

Desde a Revolução Industrial, como consequência da expansão industrial e da queima de combustíveis fósseis, o nível de GEE na atmosfera aumentou substancialmente e espera-se que continue a subir no futuro. Em comparação com cem anos anteriores, as concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera aumentaram de 280 para 410 ppm por volume (Buis, 2019).

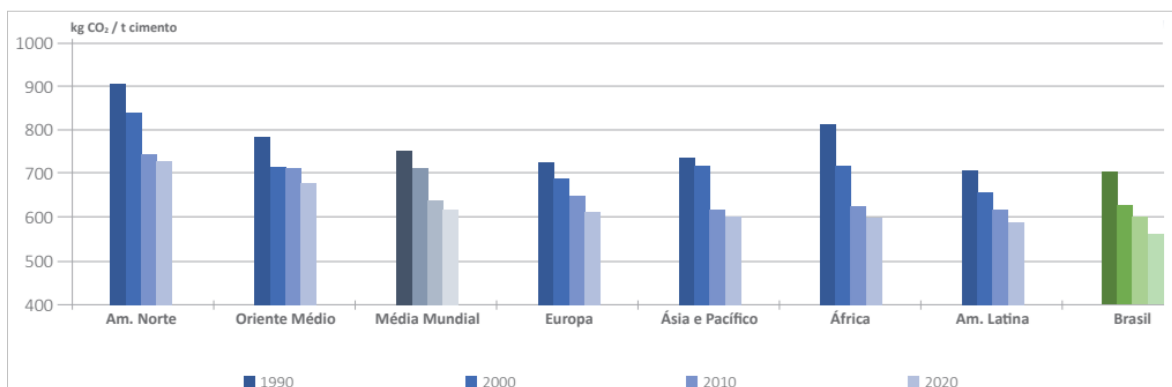
E essa tendência é esperada para as próximas décadas, resultando no aumento da temperatura de até 5,8 °C neste século (Mahmoud *et al.*, 2009)

Segundo CDIAC, entre os diversos gases de efeito estufa, o CO₂ é o mais influente, sendo considerado a causa imediata do fenômeno do aquecimento global. Portanto, quase todos os estudos e esforços para reduzir a temperatura média global estão focados em limitar as emissões de CO₂ de várias fontes emissoras.

Os setores industriais são as principais fontes de produção de CO₂. Em 2017, foram liberadas 21,4 Gton de CO₂ desse setor (estatísticas da IEA, 2019), indicando o impacto dramático desses processos no aquecimento global.

Particularmente, o Brasil é um dos países que emite menor quantidade de CO₂ por tonelada de cimento produzida (SNIC, 2022).

A indústria do cimento brasileira tem sido referência internacional pela baixa intensidade de CO₂ no seu processo produtivo desde o início da contabilização de emissões pelo setor em 1990, até os dias de hoje (Figura 11). Em função de ações que o setor vem implementando, aliado ao próprio perfil de emissões nacionais, essa participação reduziu para um terço, equivalente a 2,3% das emissões totais brasileiras (SNIC, 2022).

Figura 11 - Emissões específicas de CO₂

FONTE: SNIC, 2022 (Adaptado GCCA).

No Brasil, a parcela correspondente à queima de combustíveis representa 36% das emissões totais, enquanto as emissões da calcinação contribuem com outros 63%. Em função da matriz elétrica limpa do país (74% renovável), a participação da energia elétrica é bem inferior à média mundial, sendo de aproximadamente 1%.

Além dos gases de efeito estufa, a produção de cimento emite poluentes atmosféricos, tais como material particulado (poeira), SO_x (óxidos de enxofre, SO₂ e SO₃), NO_x (óxidos de nitrogênio), CO (monóxido de carbono) e gases contendo elementos menores como metais pesados, hidrocarbonetos voláteis, dioxinas e furanos, ácidos halogenados, entre outros (Lorenceti, 2017; Pinho, 2012).

Para evitar e reduzir as emissões para a atmosfera, as unidades de produção de cimento estão providas de sistemas de controle de poluentes, procurando evitar sua formação por meio do controle dos parâmetros de funcionamento das diversas unidades e principalmente evitar a emissão pela instalação por meio de sistemas de remoção (Ramos, 2015). Os principais equipamentos de controle utilizados atualmente para redução das emissões de material particulado são filtros de manga, precipitadores eletrostáticos e filtros híbridos formados por filtros mangas e eletrostáticos. Tanto o filtro eletrostático como o de mangas possuem alta eficiência de retenção de partículas, acima de 99% (Ramos, 2015).

2.3.5 Descarbonização

Nos últimos anos, a indústria de cimento tem mudado seu processo de fabricação devido à escassez de matérias-primas e à crescente preocupação com o impacto ambiental do setor. Devido ao seu uso generalizado, o cimento responde por aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (Gallego-Schimid *et al.*, 2020). Para atender os

objetivos estabelecidos pelo Acordo de Paris, limitando o aumento da temperatura global a 2 °C de média, a indústria internacional e brasileira de cimento lançou o Roteiro Tecnológico do Cimento (2009 e 2019).

A Agência Internacional de Energia (IEA) e a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Mundial de Negócios para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) estabeleceram diretrizes para reduzir as emissões de CO₂ da indústria de cimento em 33% (Baggio *et al.*, 2024).

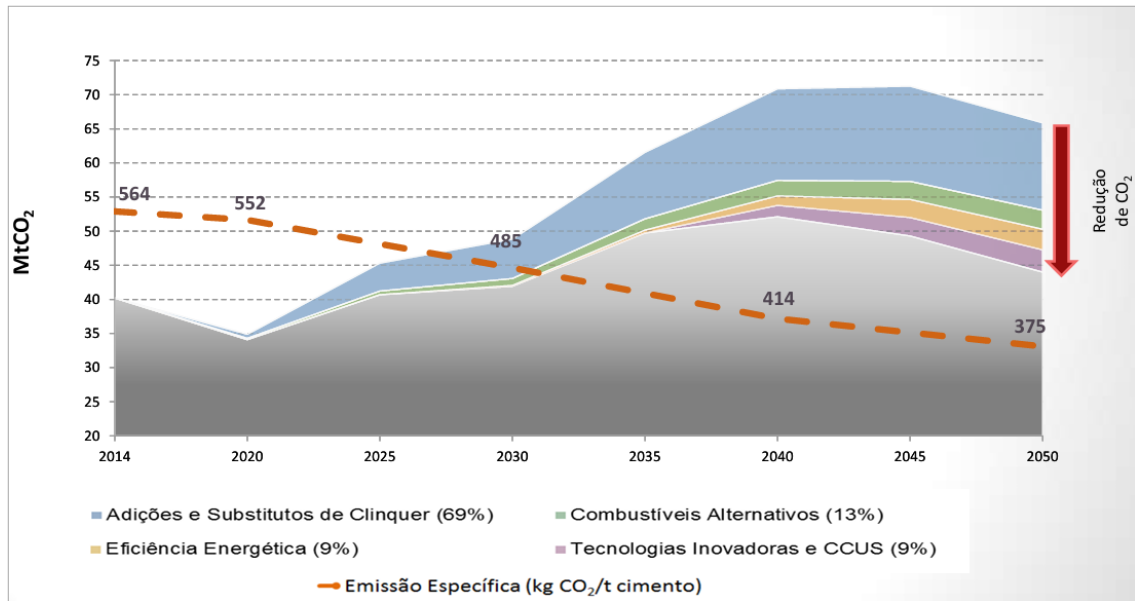
A nível mundial, no cenário de referência, mantendo as condições atuais, ocorreu aumento de emissão bruta de 40 milhões de toneladas de CO₂ em 2020 para 65 milhões em 2050.

A indústria de cimento estava ativa na busca de estratégias para reduzir as emissões de CO₂ muito antes de o aquecimento global se tornar prioridade. Desde 1999, com o lançamento da Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) no Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), a indústria coletou sistematicamente evidências e melhorou suas estratégias (Scrivener *et al.*, 2018).

Observando as tendências e entendendo a necessidade de discutir e apresentar cenários de neutralidade climática além da redução de CO₂, a indústria do cimento em escala mundial se antecipou novamente a isto, ampliando o escopo ao abordar o processo produtivo de cimento e o uso do produto ao longo da cadeia do concreto e da construção. Assim, o setor de cimento foi o primeiro a apresentar compromisso de neutralidade em escala global dentro do programa *Race to Zero* da ONU. Como desdobramento desta iniciativa global em ações locais, a indústria brasileira do cimento foi uma das primeiras a aderir em 2022 para atualizar o *Roadmap* nacional de modo a alcançar a neutralidade em carbono no seu ciclo de vida até 2050. O projeto brasileiro, além das alternativas de redução do CO₂ nos processos produtivos do clínquer e cimento, pretende incluir potenciais de descarbonização nos concretos, sistemas construtivos, eletrificação, recarbonatação para sequestro de CO₂ pelas estruturas em concreto e em soluções inovadoras e disruptivas como captura de carbono (CCUS).

Na Figura 12 é apresentada uma série de alavancas que atuam na redução direta ou indireta das emissões do setor com maior ou menor impacto, agrupadas em 7 subcategorias (GCCA, 2023).

Figura 12 - O caminho para a neutralidade do carbono no Brasil.



FONTE: Seminário ABCP, Gonzalo Visado. (SNIC, 2022)

A adição e substitutos do clínquer (MCS) é a alavanca de maior contribuição para redução de CO₂ no Brasil dentre as alavancas destacadas. No Brasil, as 7 subcategorias mapeadas foram distribuídas em 4 classes para atuação, sendo Desmaterialização, Reduções Diretas, Reduções Indiretas e Remoções e Compensação, com potenciais níveis de redução para atingir a meta de Neutralidade de Carbono (*Net Zero*) até 2050, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Contribuição para o *Net Zero* por categoria.

Classe	Subcategorias	Redução de CO ₂	Descritivo da contribuição
Desmaterialização	Construção	8%	Otimização do <i>design</i> e da construção para reduzir o consumo de concreto e por consequência do cimento e clínquer através de estratégias de eficiência na sua utilização.
	Concreto	10%	Maior eficiência na produção de concretos pode desempenhar papel importante na redução das emissões do cimento.
Reduções diretas	Cimento	21%	A redução do fator clínquer, a partir da maior utilização de adições no cimento, principalmente <i>filler</i> calcário e argilas calcinadas, seguidas de escórias siderúrgicas e cinzas volantes, que deverão ter oferta limitada no horizonte futuro, desempenhará papel fundamental para o setor alcançar efetiva redução de suas emissões.
	Clínquer	10%	A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos de menor intensidade carbônica, como resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos e biomassas.
Reduções indiretas	Eletrificação	5%	A crescente e contínua descarbonização da matriz elétrica nacional, a mais limpa e renovável do mundo, a partir de energias renováveis, como eólicas e fotovoltaicas, terá impacto na redução das emissões indiretas.
	Recarbonatação	7%	Ao mesmo tempo em que o processo produtivo do cimento emite CO ₂ , a partir da descarbonatação da matéria-prima, o uso do produto ao longo de sua vida útil reabsorve CO ₂ da atmosfera a partir das estruturas em concreto.
Remoções e Compensações	CCUS SbN Metanização	39%	P&D de tecnologias disruptivas como a Captura e Uso ou Estocagem de Carbono (CCUS); Remoções de carbono a partir de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), através de projetos de conservação florestal; Emissões evitadas pelo coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, que em condições normais se decompõem em aterros ou lixões, gerando metano.

FONTE: Adaptado de SNIC, 2022.

Em 2022, aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) foram coletadas apenas no Brasil, dos quais 80% eram resíduos provenientes de cerâmicas e materiais cimentícios, tornando o pó de resíduos de construção e demolição (PRCD) um material promissor para uso como material cimentício suplementar (Baggio *et al.*, 2024).

Em linha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular, ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis – promove práticas que reduzem o impacto ambiental, ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis – incentiva a gestão sustentável e a redução de resíduos e ODS 13 – Ação Climática – busca mitigar as mudanças climáticas por meio da redução de emissões, o uso de resíduos de construção e demolição promove economia circular na construção civil, reduz a extração de recursos naturais, especialmente dos não

renováveis, minimiza emissões de CO₂ e reduz a depreciação ambiental por meio de seu acúmulo nos aterros sanitários (Baggio *et al.*, 2024).

Os resíduos gerados na construção civil, estudados nesta pesquisa, têm potencial para contribuir com a Neutralidade de Carbono, dentro da indústria do cimento, enquadrados nas seguintes frentes:

2.3.5.1 Reduções Diretas – Cimento

A crescente utilização do cimento Portland levanta preocupações ambientais, levando à exploração de materiais cimentícios suplementares (MCS) como alternativas para indústria da construção (Aslam; Shahab, 2024).

Uma maneira apropriada de reduzir os efeitos negativos relacionados a essa fabricação é a substituição parcial do clínquer de cimento Portland por materiais compostos adequados, chamados de materiais cimentícios suplementares, que, para manter a qualidade do cimento, precisam apresentar certa atividade química (Scrivener *et al.*, 2016).

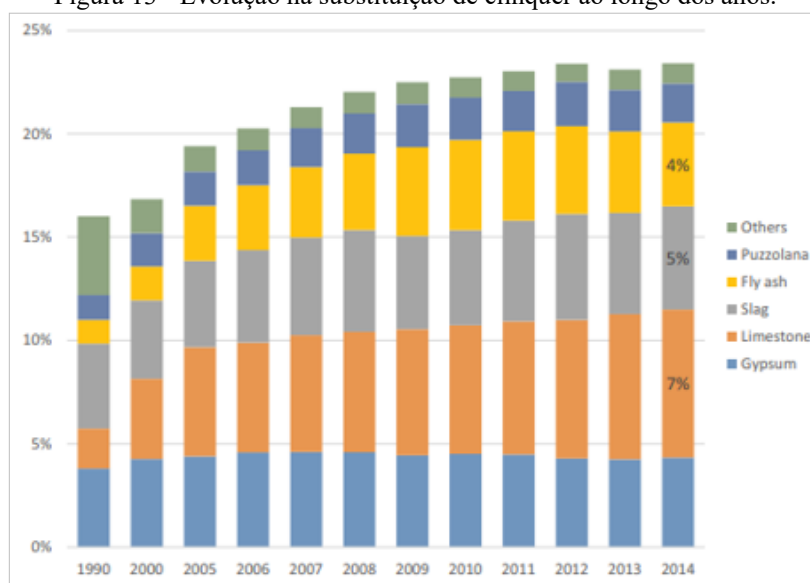
Essa circunstância é intensificada por tendências futuras que afetam o mercado de materiais de construção, sendo que por um lado, a demanda por cimento aumenta constantemente e por outro lado, a viabilidade dos MCS mais comuns, como a escória de alto forno e as cinzas volantes, está sujeita a mudanças nas indústrias de aço e carvão, levando a perda da quantidade e qualidade dos subprodutos (Ludwig, 2012).

Os MCS mencionados compartilham o problema da disponibilidade limitada, o que aumenta a demanda por materiais alternativos (Scrivener *et al.*, 2016).

Os substitutos de clínquer mais comuns são subprodutos reativos de outras indústrias, tais como escória de alto forno granulada, que é subproduto da produção de ferro-gusa em altos-fornos, cujo uso no cimento remonta a antes de 1900; e cinzas volantes, geradas pela queima de carvão para produzir eletricidade (Figura 12). No entanto, o material cimentício suplementar mais comum é o filler de calcário quase inerte (Scrivener *et al.*, 2018).

No entanto, a crescente demanda por cimento para atender ao déficit habitacional e de infraestrutura, alinhada com a necessidade de reduzir as emissões de CO₂, torna necessário buscar novos MCS para reduzir o impacto ambiental da indústria de cimento (Baggio *et al.*, 2024).

Figura 13 - Evolução na substituição de clínquer ao longo dos anos.



FONTE: CSI EWBCSD (Scrivener et al., 2018).

Na Figura 13 observa-se a evolução dos substitutos de clínquer nos últimos 25 anos para empresas na base de dados GNR da CSI. Ela indica que o nível de substituição do clínquer está estabilizado. Isso corresponde à baixa estimativa da contribuição dos substitutos do clínquer para redução adicional de CO₂, decorrente da modesta oferta dos substitutos de clínquer mais desejáveis, particularmente as escórias de alto forno e as cinzas volantes de carvão de qualidade adequada, em comparação com a produção total de cimento. Em 2006, de acordo com a linha de base para o estudo da IEA, uma proporção muito alta desses substitutos já estava sendo usada em cimento ou concreto (Scrivener *et al.*, 2018).

Fatores cruciais para que um resíduo se torne um potencial MCS são suas propriedades físicas e químicas, bem como a reatividade, sem causar alterações nos produtos de hidratação ou efeitos adversos na consistência. Além disso, deve preferencialmente contribuir para o aumento das propriedades físico-mecânicas e dos parâmetros de durabilidade (Baggio *et al.*, 2024).

Apesar de apresentarem perfil ambiental mais favorável, algumas abordagens podem levar a resultados imprecisos, uma vez que maior resistência nem sempre corresponde ao menor impacto ambiental (Cuadrado *et al.*, 2024).

A produção de cimentos Portland com adições propicia redução das emissões de CO₂, uma vez que diminui o consumo de clínquer por tonelada de cimento e, conseqüentemente, a queima de combustíveis e a emissão por calcinação/descarbonatação, além de contribuir para preservação de jazidas (SNIC, 2022).

2.3.5.2 Redução Diretas – Clínquer

O desperdício de materiais com alto poder calorífico destinados a aterros estão sendo cada vez mais explorados para uso potencial em uma variedade de indústrias. Um exemplo é o uso potencial desses resíduos em fornos de cimento para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) da produção de cimento (Pitre *et al.*, 2024).

A utilização de combustíveis alternativos no processo produtivo reduz a quantidade necessária de combustíveis fósseis, contribuindo para redução dos gases de efeito estufa por apresentarem menor fator de emissão de CO₂, isto é, emitem menos carbono para gerar a mesma quantidade de energia e é amplamente vantajoso o destino de resíduos como combustível alternativo, quando comparado ao descarte em aterros (Pitre *et al.*, 2024).

O forno de cimento moderno é uma máquina muito flexível, que permite à indústria do cimento mudar de combustíveis de forma relativamente simples. A indústria de cimento brasileira, por exemplo, passou de quase 100% de óleo combustível na década de 1970 para uma mistura de carvão vegetal (~40%) e carvão (~50%) em 1984 e agora depende quase inteiramente do coque do petróleo. Na Europa, o uso de resíduos como combustível pode ser de até 80% da demanda térmica. O aumento do uso de combustíveis de resíduos é um meio eficiente de descarte, proporcionando um serviço útil e ecologicamente responsável à sociedade. Essa flexibilidade representa oportunidade para reduzir a intensidade de CO₂; há oportunidades para expandir o uso de biomassa e combustíveis alternativos no mundo. Essa alternativa aumentará de 3% em 2006 para cerca de 37% em 2050, proporcionando aproximadamente 15% da redução total de emissões de CO₂ almejada (Scrivener *et al.*, 2018).

A energia necessária a este processo produtivo faz com que a indústria do cimento seja um dos cinco setores mais intensivos em energia no mundo. Por este motivo, procura-se constantemente diversificar a gama de combustíveis utilizados. Cerca de 85% dos energéticos utilizados pelo setor no Brasil são de origem fóssil, quase que exclusivamente coque do petróleo. Os outros 15% são classificados como combustíveis alternativos, estando subdivididos, essencialmente, em resíduos e biomassas (SNIC, 2022).

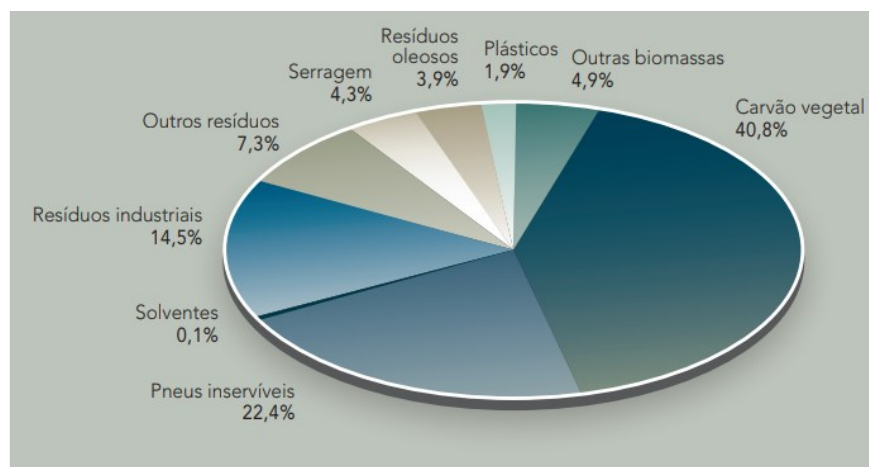
Os fornos de cimento possuem características favoráveis à queima de resíduos, como altas temperaturas, longo tempo de residência em temperaturas acima de 1.450 °C, atmosfera oxidante, destruição total dos componentes orgânicos e a não geração de cinzas, entre outras. A operação combinada de fabricar cimento conjuntamente com a queima de resíduos é conhecida como coprocessamento. Além de reaproveitar o valor energético e a fração mineral destes resíduos, em substituição a combustíveis fósseis não renováveis, o coprocessamento

diminui o impacto ambiental causado pela disposição inadequada desses rejeitos na natureza (SNIC, 2022).

Segundo o relatório anual, Panorama do Coprocessamento, ano base 2022, o coprocessamento, oferece as vantagens de preservar recursos naturais, reduzir emissões dos gases que causam o efeito estufa, diminuir passivos ambientais, impulsionar o crescimento outras tecnologias adequadas de destinação, gerar empregos diretos e indiretos, contribuir para erradicação de lixões, aumentar a vida útil de aterros sanitários e diminuir custos de energia térmica.

Na Figura 14 são apresentados os principais combustíveis alternativos utilizados na indústria do cimento.

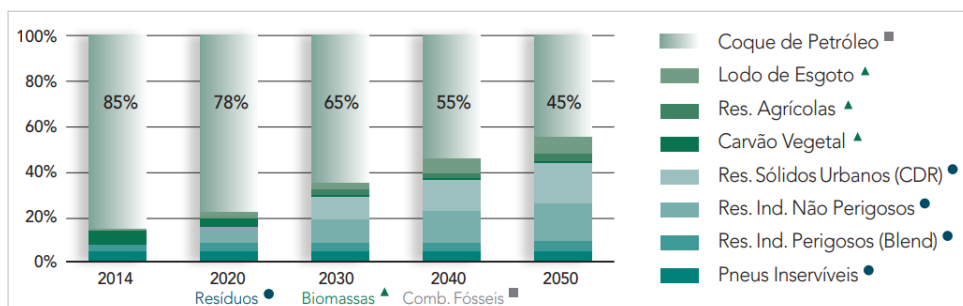
Figura 14 - Perfil dos combustíveis alternativos utilizados pela indústria brasileira.



FONTE: Roadmap Tecnológico (ABCP; SNIC, 2022).

Segundo apontado no relatório SNIC (2022), a maior contribuição energética alternativa se dá pelo uso do carvão vegetal, seguida de pneus inservíveis. A crescente evolução do uso de combustíveis alternativos pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 - Evolução da utilização de combustíveis alternativos (cenário de redução 2 °C).



FONTE: Roadmap Tecnológico (ABCP; SNIC, 2022).

Em 2019 foi publicado o *Roadmap Tecnológico*, um estudo coordenado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), com colaboração ativa da *International Finance Corporation* (IFC), *International Energy Agency* (IEA) e *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) e Academia. Este trabalho mostra o potencial de crescimento e a ambição do setor de médio a longo prazo, consolidando esta tecnologia no país para redução das emissões de CO₂. Esta projeção está baseada principalmente no desenvolvimento para utilização dos resíduos sólidos urbanos e dos lodos das estações de tratamento de efluentes, o que permitirá atingir o marco de substituição do combustível fóssil em 55% em 2050.

2.3.5.3 Resultados esperados para redução de emissões de CO₂

Na corrida para alcançar a neutralidade climática global, indústrias com alta intensidade de carbono, como a de cimento, precisam descarbonizar rapidamente (Muller et al., 2024)

Na Figura 16 são apresentados resultados esperados para o ano de 2050, considerando a redução de 2 °C na temperatura média global na indústria do cimento para redução de emissões de CO₂.

Figura 16 - Resultados projetados na indústria brasileira de cimento até 2050.

Produção	2014	2020	2030	2040	2050
Cimento (Mt)	71	62	87	126	117
Clinker (Mt)	48	41	51	67	61
Adições	2014	2020	2030	2040	2050
Fator Clinker (%)	68%	65%	59%	54%	52%
Escória de Alto Forno	14%	11%	11%	11%	11%
Cinzas Volantes	3%	3%	3%	3%	2%
Argilas Calcinadas	3%	3%	4%	4%	4%
Filer Calcário	8%	13%	18%	23%	25%
Outros	1%	1%	2%	2%	2%
Gesso	4%	4%	4%	4%	4%
Combustíveis Alternativos	2014	2020	2030	2040	2050
Taxa de Substituição (%)	15%	22%	35%	45%	55%
Resíduos	8%	15%	29%	36%	44%
Resíduos Industriais Não Perigosos	0%	5%	11%	14%	17%
Resíduos Industriais Perigosos (Blend)	4%	3%	3%	4%	4%
Pneus Inservíveis	5%	5%	5%	5%	5%
Resíduos Sólidos Urbanos (CDR)	0%	2%	10%	13%	17%
Biomassas	7%	7%	6%	9%	11%
Carvão Vegetal	6%	4%	0%	0%	0%
Lodo de Esgoto	0%	1%	2%	6%	7%
Resíduos Agrícolas	1%	2%	3%	3%	4%
Eficiência Energética	2014	2020	2030	2040	2050
Térmica (GJ/t clínquer)	3,50	3,49	3,47	3,38	3,22
Elétrica (kWh/t cimento)	113	111	106	95	91
Captura e Uso ou Estocagem de Carbono (CCUS)	2014	2020	2030	2040	2050
Mt CO ₂	0,0	0,0	0,0	1,7	3,3
Emissão Total	2014	2020	2030	2040	2050
Mt CO ₂	40	34	42	52	44
Emissão Específica	2014	2020	2030	2040	2050
(kg CO ₂ /t cimento)	564	552	485	414	375

FONTE: Roadmap Tecnológico (ABCP; SNIC, 2022).

Para contribuir com a descarbonização, a indústria do cimento tem grande desafio com resultados projetados para 2050.

O cimento contribui com 8% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas à energia (IEA, 2021). Atender às metas do Acordo de Paris requer rápida descarbonização da produção de cimento (Benhelal *et al.*, 2021). Diante dessas crescentes preocupações climáticas, várias estratégias de descarbonização foram propostas pela própria indústria do cimento (Cembureau, 2012, 2013, 2020; GCCA, 2021), com medidas que incluem melhoria da eficiência energética e troca de combustíveis (Favier *et al.*, 2018; Georgiopoulou e Lyberatos, 2018) e tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) (Favier *et al.*, 2018).

Substituir clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS) (Kermeli *et al.*, 2019) ou ligantes não baseados em calcário (Favier *et al.*, 2018; Miller e Myers, 2020) são outras opções, embora seu potencial de mitigação seja limitado. Outras medidas a montante incluem a redução do uso de cimento e concreto, substituição de materiais, reutilização e carbonatação (Favier *et al.*, 2018; GCCA, 2021).

Abordar as significativas emissões de carbono da indústria do cimento é fundamental para mitigar esses impactos e avançar em direção à sustentabilidade global. A urgência em combater as mudanças climáticas levou ao consenso global sobre a necessidade de reduzir as emissões de carbono e transitar para o futuro de carbono neutro (Barbhuiya *et al.*, 2024).

O setor de cimento com carbono neutro é um passo crucial para alcançar essas metas climáticas globais. Isso envolve adotar uma abordagem holística que abrange a implementação de tecnologias de baixa emissão de CO₂, a utilização de matérias-primas sustentáveis e alternativas, a melhoria da eficiência energética e a exploração de soluções de captura e armazenamento de carbono. Essa transição alinha a indústria do cimento com a ambição global mais ampla de alcançar um futuro sustentável e de baixo carbono. Além disso, abraçar um setor de cimento com carbono neutro traz benefícios econômicos e sociais substanciais (Rissman *et al.*, 2020; Panos *et al.*, 2023). Isso impulsiona a inovação, estimula a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de ponta e cria um mercado para produtos e práticas sustentáveis (Barbhuiya *et al.*, 2024).

2.3.5.4 Principais estudos relacionados ao RCC na indústria do cimento

Apesar de promissor, não foram encontrados artigos, dissertações ou teses, que tenham estudos relacionados a todos os resíduos e materiais que este trabalho contempla. Na análise individual de materiais, foi possível concluir que:

As cimenteiras buscam formas de reduzir o consumo de energia e emissão de gases poluentes (Puertas *et al.*, 2006), como a reutilização de RCC como matéria-prima alternativa no processo de produção.

Segundo Costa (2020), a substituição parcial da mistura calcário-argila, por agregados reciclados, proporciona redução de até 8,1% na emissão de CO₂, proveniente das matérias-primas, na produção do clínquer, uma vez que o RCC atua como fonte alternativa de cálcio na formulação da farinha, substituindo parcialmente o calcário, sem prejuízos quanto à formação das fases mineralógicas do cimento, principalmente a alita (C₃S).

Vários estudos têm mostrado a viabilidade técnica da substituição de diferentes tipos de resíduos e subprodutos industriais como matéria-prima alternativa na fabricação de cimento Portland, tais como uso de resíduos de concreto reciclado (Galbenis *et al.*, 2006), resíduos de telhas e revestimentos cerâmicos (Puertas *et al.*, 2008) e resíduos de fibrocimento (Schoon *et al.*, 2012). Diferentemente desses trabalhos, pretende-se dar outra abordagem na utilização dos RCC ao considerar as partes constituintes dos resíduos da construção civil classe A, por meio da utilização de sua parte fina (Costa; Ribeiro, 2019).

Costa e Ribeiro (2019) verificaram teores significativos de silício, cálcio, alumínio e ferro e de outros elementos ao caracterizarem resíduos da construção civil (RCC) aplicados como matéria-prima. Os autores indicaram que estes elementos irão auxiliar na formação das principais fases do cimento Portland, possibilitando seu uso como matéria-prima alternativa para a indústria cimenteira.

O uso de resíduos de construção e demolição no setor da construção pode trazer consideráveis benefícios em termos de custos, eficiência energética e benefícios ambientais e ecológicos (da Silva *et al.*, 2022). Resíduos da construção civil tem potencial de ser utilizado como MCS, reduzindo as emissões de CO₂ da indústria do cimento e contribuindo para economia circular no setor da construção (Baggio *et al.*, 2024).

Para aplicação dos RCC ao concreto foi encontrado um número maior de estudos na literatura. Resultados apontam que concretos com resistências de até 25,0 MPa são mais efetivos na redução do CO₂ e pegada de carbono quando utilizado o método de reciclagem dos agregados de concreto separando os agregados da pasta de cimento antes de seu endurecimento (Vieira *et al.*, 2022).

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi classificada como mista, abrangendo uma parcela exploratória e outra explicativa. Segundo Gil (2002), as pesquisas exploratórias têm como objetivo proporcionar maior familiaridade para aprimoramento de ideias, envolvendo levantamento bibliográfico, estudos de caso e planejamento da pesquisa. Ainda segundo o autor, as pesquisas explicativas têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para ocorrência dos fenômenos, aprofundando o conhecimento da realidade, porque explicam a razão e o porquê das coisas.

Aliado aos compromissos mundiais de sustentabilidade das cimenteiras com a problemática dos elevados teores de CO₂ gerados pela indústria do cimento, identificou-se uma oportunidade de estudar os resíduos gerados na construção civil e destinados a Usinas de Reciclagem, com potencial de uso na indústria do cimento como matéria prima alternativa, cimentício e/ou uso como combustível alternativo.

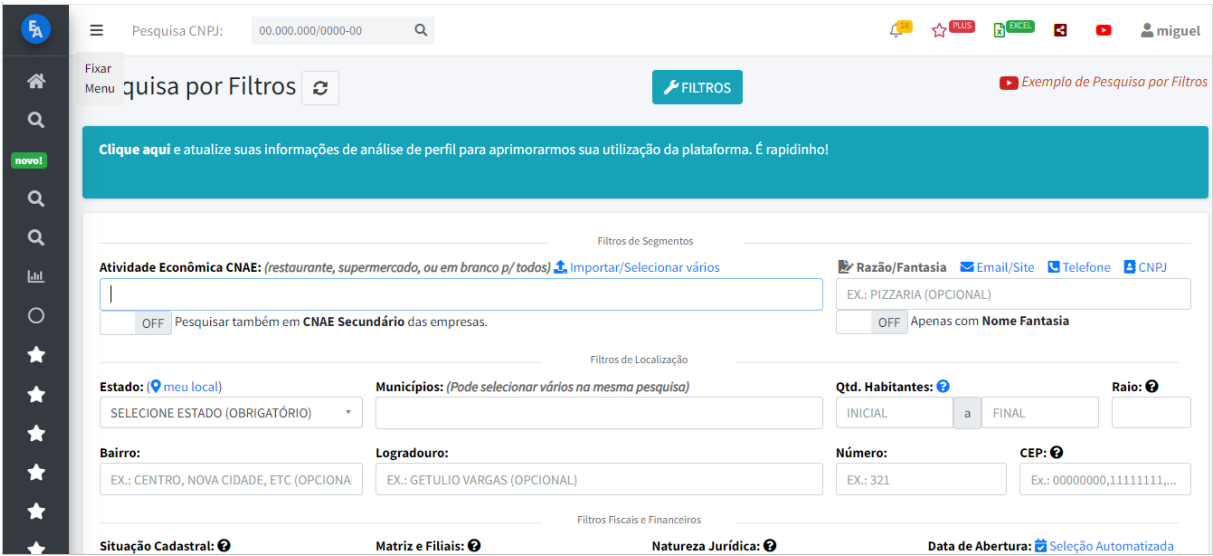
Devido à necessidade e importância da triagem dos materiais para uso na indústria do cimento, a escolha pelo segmento específico de Usinas de Reciclagem, se deu principalmente por se tratar de um material mais limpo e previamente segregado. Portanto, a pesquisa em questão traz dados e resultados referentes a esse nicho.

3.1 MAPEAMENTO DO MERCADO DE USINAS DE RECICLAGEM

Para esse trabalho, a primeira pesquisa foi no site do IBAMA, que contém as informações de geradores de resíduos no Brasil. No site é possível analisar a geração de resíduos que cada empresa autodeclara a cada ano. Foi selecionada a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) das empresas relacionadas à Geração e Reciclagem dos RCC.

Conhecendo o CNAE associado ao nicho de Geradores/Recicladores de Materiais de Construção Civil, foi utilizado o site EMPRESASQUI (<https://www.empresaqui.com.br/acesso/login?r=https://www.empresaqui.com.br/acesso/empresas>) (Figura 17). Nesta plataforma é possível aplicar filtros e assim, foi possível filtrar um perfil de empresas na região de Curitiba/PR com potencial para o estudo. Além disso, na plataforma foi possível ver informações das empresas, tais como, faturamento anual estimado, número de funcionários, número de setores, localização, quantidade de filiais, natureza jurídica, quem são os decisores, tipos de tecnologia da empresa, dentre outras.

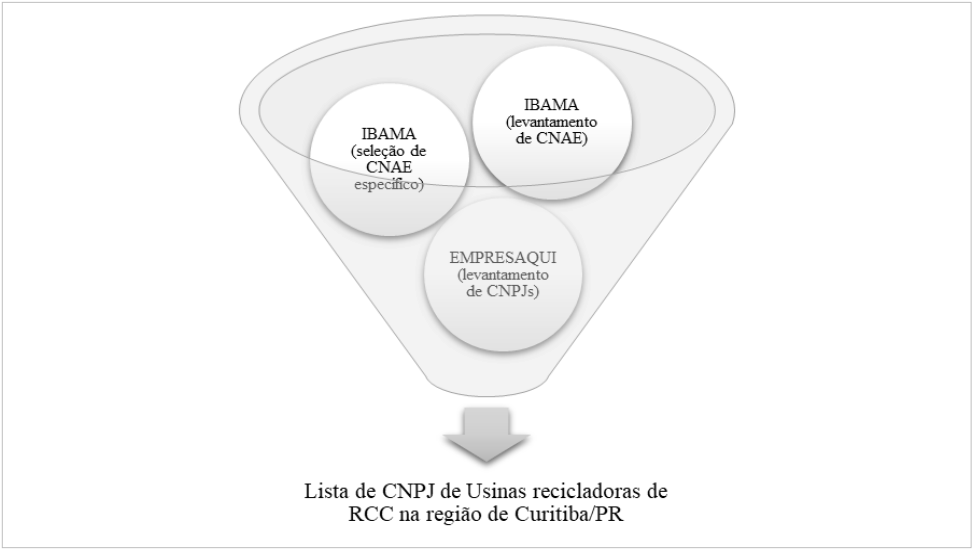
Figura 17 - Tela da Ferramenta de Busca de CNPJ – EMPRESAQUI.



FONTE: O autor (2024).
<https://www.empresaquei.com.br/aceso/login?r=https://www.empresaquei.com.br/aceso/empresas> (Acesso em 22/06/2024)

Para as informações coletadas no passo anterior, foi necessário realizar uma revisão dos dados encontrados, ou seja, aplicar um filtro e eliminar as distorções/possíveis erros. Além disto, aplicou-se um terceiro filtro com o objetivo de obter uma lista final com as informações de CNPJ das usinas de Reciclagem dos RCC.

Figura 18 - Funil de pesquisa de Mercado.



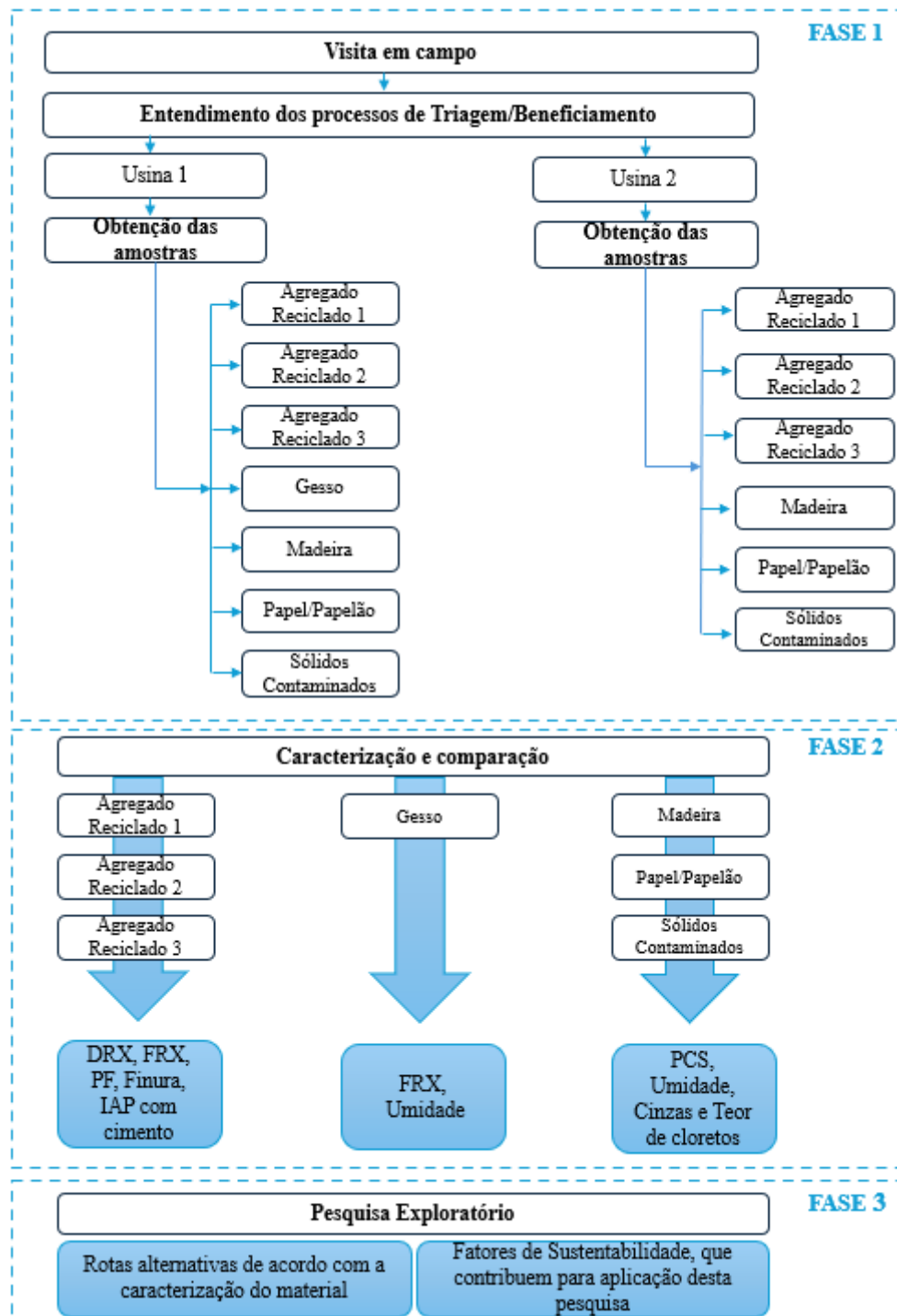
FONTE: A autora (2024).

A lista final continha 4 usinas de reciclagem na região de Curitiba. Foram selecionadas 2 empresas para o trabalho devido ao volume de recebimento e beneficiamento dos RCC. A Usina A, localizada em São José dos Pinhais e a Usina B, localizada em Almirante Tamandaré.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi separado em 3 fases para atendimento dos objetivos da pesquisa que consistem na caracterização dos resíduos de construção civil que são destinados às Usinas de Reciclagem, estudo das alternativas para destinação dos RCC nas cimenteiras, apresentação de rotas sustentáveis para destinação e identificação dos fatores que contribuem para aplicação deste estudo em termos de sustentabilidade (Figura 19).

Figura 19 - Programa experimental das fases da pesquisa.



FONTE: A autora (2024).

- Primeira fase (classificada como pesquisa exploratória) – consistiu na realização das visitas em campo, estudo do processo de triagem/beneficiamento dos RCC e obtenção de amostras para análise (amostragem e quarteamento).
- Segunda fase (classificada como pesquisa exploratória) – foram determinadas e analisadas as características dos materiais triados antes do

beneficiamento e dos agregados reciclados. Nesta fase, foram realizadas a comparação destas propriedades com os materiais já conhecidos e utilizados na indústria do cimento.

- Terceira fase (classificada como pesquisa explicativa) – foi realizado o estudo das rotas alternativas para destinação dos RCC na cimenteira, com base nos resultados da caracterização, bem como o estudo para identificação dos fatores que contribuem para aplicação desta pesquisa em termos de sustentabilidade.

3.3 USINAS DE RECICLAGEM DE RCC – FASE 1

Foram realizadas 3 visitas em duas Usinas de Reciclagem de Resíduo de Construção Civil para entendimento do processo de triagem, beneficiamento e coleta de amostras, sendo duas visitas realizadas na Usina A em São José dos Pinhais e uma visita realizada na usina B em Almirante Tamandaré.

3.3.1 Mapeamento do processo

Para mapeamento do processo foi utilizado um fluxograma nesta etapa para identificar e sequenciar as etapas do processo de triagem e beneficiamento, entradas e saídas de forma estruturada. O fluxograma do processo é fundamental para padronização e posterior entendimento do processo, segundo Campos (1992). Ele facilita a visualização ou identificação dos produtos produzidos, dos clientes e fornecedores internos e externos do processo, das funções, das responsabilidades e dos pontos críticos.

Foram elaborados dois fluxogramas com indicação das entradas e saídas das etapas de triagem e beneficiamento de cada uma das usinas de reciclagem dos RCC visitadas.

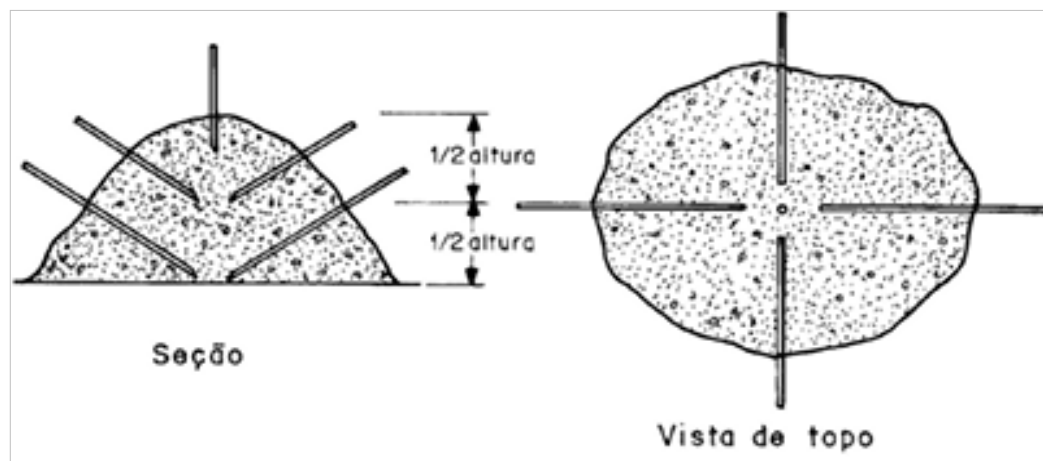
3.3.2 Amostragem e preparo de amostras

Segundo a NBR 16915 - Agregados - Amostragem (ABNT, 2021), a amostragem é tão importante quanto o ensaio, e por isto devem ser tomadas todas as precauções necessárias para que se obtenham amostras representativas quanto à natureza e características.

As normas NBR 16915 - Agregados - Amostragem (ABNT, 2021) e NBR 10.007 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004) foram utilizadas como referências para amostragem dos materiais.

A amostragem foi realizada topo, no meio e na base das pilhas para os agregados reciclados e para os materiais gerados na etapa de triagem, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Pontos de retirada de amostra da pilha de material.



FONTE: NBR 10.007 (ABNT, 2004).

O volume de amostra para os agregados reciclados foi estabelecido de acordo com a norma 16915 - Agregados – Amostragem (ABNT, 2021), conforme Figura 20.

Figura 21 - Quantidade de amostra a ser coletada para realização dos ensaios físicos ou químicos.

Tamanho nominal do agregado	Número mínimo de amostras parciais	Quantidade mínima total da amostra de campo	
		Em massa kg	Em volume dm ³
≤ 9,5 mm	3	40	25
> 9,5 mm ≤ 19 mm	3	40	25
> 19 mm ≤ 37,5 mm	3	75	50
> 37,5 mm ≤ 75 mm	3	150	100
NOTA As massas ou volumes considerados referem-se aos agregados de massa específica entre 2 g/cm ³ e 3 g/cm ³ . A quantidade total de amostra de campo, em volume, leva em conta os critérios práticos usuais.			

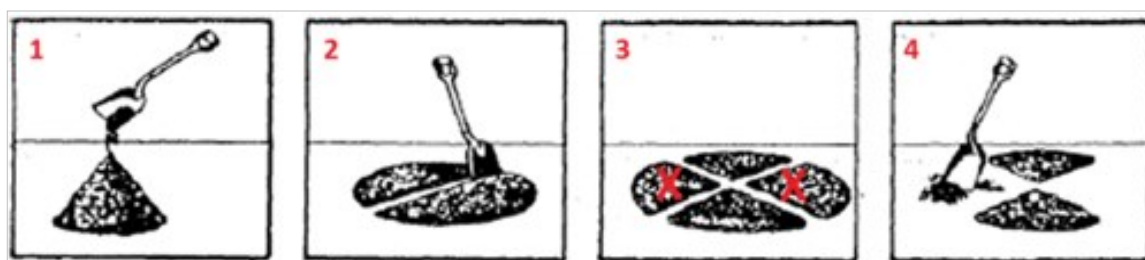
FONTE: Norma ABNT NBR 16915 (2021).

Na norma NBR 10.007 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004), não há volume estabelecido para amostras de resíduos, portanto para os demais materiais, separados na etapa de triagem, o volume coletado foi de 25 L com auxílio de pá, balde e sacos plásticos para a coleta.

Foram realizados cuidados básicos na etapa de amostragem como limpeza dos materiais utilizados para evitar qualquer contaminação da amostra.

Devido ao volume amostrado inicialmente, foi necessário realizar quarteamento manual, *in loco*, a fim de reduzir o volume da amostra a ser entregue no laboratório para realização de análises físicas e químicas, conforme Figura 22.

Figura 22 - Processo de quarteamento manual de amostra.



FONTE: Adaptado NBR 16915 (2021).

Conforme sugerido na NBR 10.007 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004), foram utilizadas fichas de coleta contendo os seguintes dados para identificação de cada amostra:

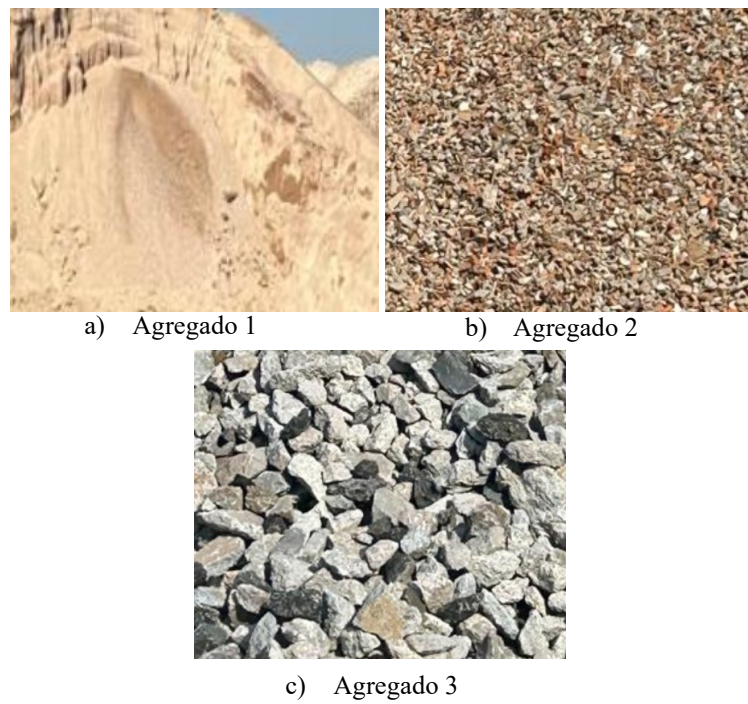
- a) Responsável pela amostragem;
- b) Data e hora da coleta;
- c) Identificação da origem do resíduo;
- d) Identificação de quem receberá os resultados;
- e) Número da amostra;
- f) Descrição do local da coleta;
- g) Determinações efetuadas em campo;
- h) Determinações a serem efetuadas no laboratório.

As amostras coletadas e estudadas no presente trabalho foram:

Figura 23 – Materiais separados pela triagem nas Usinas de RCC.



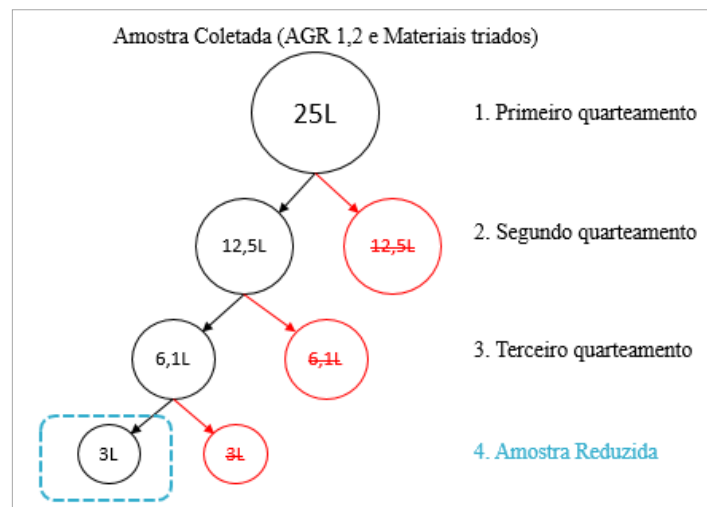
Figura 24 – Materiais utilizados para beneficiamento nas Usinas de RCC



3.3.3 Quarteamento das amostras

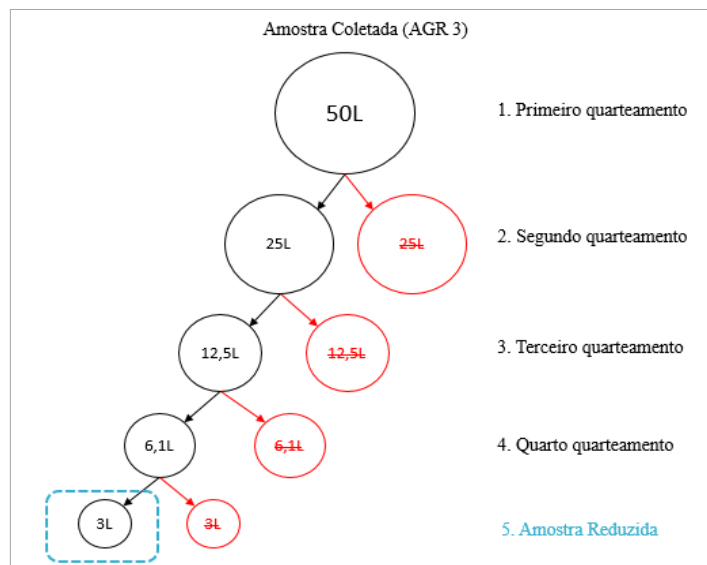
Foram coletados 25 L de amostras dos agregados 1 e 2 e materiais triados e 50 L de amostras do AGR 3. As amostras foram quarteadas e reduzidas ao volume de aproximadamente 3 L e armazenadas em sacos plásticos, sem necessidade de preservação. Nas Figuras 25 e 26 são representados os modelos esquemáticos dos quarteamentos realizados.

Figura 25 - Quarteamento realizado nas amostras coletadas (AGR 1 e 2 e materiais triados) nas Usinas A e B.



FONTE: A autora (2024).

Figura 26 - Quarteamento realizado nas amostras coletadas (AGR 3) nas Usinas A e B.



FONTE: A autora (2024).

Após realizar os quarteamentos, as amostras (Figura 27) foram encaminhadas para o laboratório de uma cimenteira da região, para realização de ensaios de caracterização.

Figura 27 - Amostras identificadas reservadas para análise no laboratório.



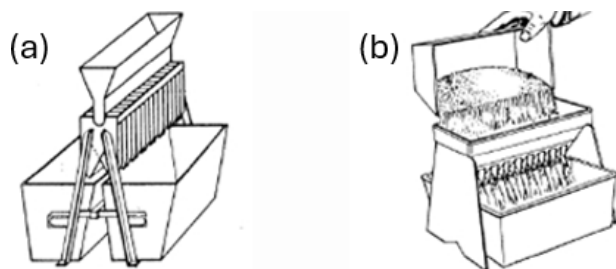
FONTE: A autora (2024).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS – FASE 2

3.4.1 Preparação das amostras

As amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório de uma cimenteira da região. Primeiramente foi utilizado um separador para redução da amostra de campo em laboratório, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Separador para redução de amostra de campo em laboratório: (a) separador; (b) separador em uso.



FONTE: NBR 16915 (2021).

Após a separação, as amostras passaram por britador e moinhos, marca Marconi, com diferentes velocidades de rotação e malha da peneira para redução da granulometria para as análises.

No laboratório, as amostras recebidas foram britadas em britador de mandíbula (marca MA2015) e posteriormente moídas em moinho de discos (marca MA700) e moinho de bolas (marca MA701) durante uma hora (em cada) para redução de granulometria para aproximadamente 0,075 mm. Após o preparo das amostras, direcionadas para realização dos ensaios, físico, químicos e mecânicos.

3.4.2 Métodos empregados na caracterização das amostras

Os métodos analíticos utilizados seguiram normas nacionais, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Referência das metodologias utilizadas, ano do método e aplicabilidade para cada material estudado.

Análise	Referência metodológica	Nome do método	Ano	Aplicabilidade
Finura	ABNT NBR 11579 (75µm)	Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira	2010	Agregados Reciclados
FRX	ABNT NBR 14656	Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios-X	2023	Agregados Reciclados
PF	ABNT NBR 6459	Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo	2016	Agregados Reciclados
IAP com cimento	ABNT NBR 5752	Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias	2014	Agregados Reciclados
PCS	UNE – EN ISO 21654	Combustíveis sólidos recuperados – Determinação do poder calorífico	2021	Madeira Sólidos Contaminados Plástico/Papelão
Teor de Umidade	UNE-EN ISO 21660-3	Combustíveis sólidos recuperados – Determinação do conteúdo de umidade pelo método de estufa	2021	Madeira Sólidos Contaminados Plástico/Papelão.
Teor de Cloretos	EN 15408	Recuperados – Métodos de determinação do conteúdo de Enxofre, Cloro, Flúor e Bromo	2011	Madeira Sólidos Contaminados Plástico/Papelão
Teor de Cinzas	UNE-EN ISO 21656	Combustíveis sólidos recuperados – Determinação do conteúdo de cinzas	2021	Madeira Sólidos Contaminados Plástico/Papelão
Amostragem de Resíduos	ABNT NBR 10007	Amostragem de Resíduos Sólidos	2004	Madeira Sólidos Contaminados Plástico/Papelão
Amostragem de Agregados	ABNT NBR 16915	Agregados - Amostragem	2021	Agregados Reciclados

FONTE: A autora (2024).

As amostras ensaiadas tiveram seus resultados comparados com limites de especificação de legislações vigentes ou limites de literatura. Para amostras de gesso, foi possível realizar além do comparativo com limites de especificação, análises estatísticas pelo método ANOVA para avaliar se existem diferenças significativas, entre os resíduos de gesso, gesso natural e gesso sintético. Os dados do gesso natural e gesso sintético foram fornecidos por uma cimenteira para analisar estatisticamente se existem diferenças significativas entre os resíduos de gesso e os 2 gessos já utilizados no processo de produção (Natural e Sintético).

a) Finura

O teor de finos ou finura do material representa a porcentagem da fração retida em massa em relação ao total de massa de agregado cujas dimensões de grãos são superiores a 75 μm (nº 200), segundo a NBR 11579 (ABNT, 2010).

b) Fluorescência de Raios X (FRX) e Perda ao Fogo

Para determinação da composição química dos RCC foi utilizada a técnica de espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX) por meio de um Espectrômetro de Fluorescência de Raio-X, Zetium-Panalytical com o *Software* SuperQ, versão 6, disponível no Laboratório de uma Cimenteira da região. A partir dessa análise química é possível confirmar as composições de cada RCC.

O ensaio de perda ao fogo (PF) foi realizado para identificar a perda de massa das matérias-primas em altas temperaturas, calcinando 1 g do material até 1000 °C em forno mufla Quimis durante uma hora. A partir da verificação da massa resultante, calculou-se a perda ao fogo, correspondente à quantidade de materiais orgânicos, somados à umidade na amostra ensaiada e à liberação de gases como o CO₂.

c) Índice de Atividade Pozolânica com Cimento

Este ensaio foi conduzido de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2012), que prescreve o método de ensaio de atividade pozolânica através do índice de atividade com cimento.

O agregado reciclado foi moído até obter uma finura adequada (0,075 mm), finura inferior a 20%, para testes pozolânicos. O material pozolânico foi seco em estufa a 105 ± 5 °C durante aproximadamente 24 horas.

Amostras de cimento foram preparadas com moldagem de um cimento referência CP II-F-32, substituindo uma porcentagem específica do clínquer pelo agregado reciclado,

conforme disposto na NBR 7215 (ABNT, 2019). A determinação do índice de atividade pozolânica com cimento foi obtida a partir da moldagem de 4 corpos de prova para ruptura aos 28 dias.

O IAP foi determinado pelo teste de resistência à compressão em blocos de cimento com e sem agregado reciclado. Comparações foram feitas com blocos de cimento padrão contendo 100% de clínquer.

d) PCS

Fez-se necessário primeiramente triturar e pulverizar toda a amostra, realizada em triturador de facas Bruno TBS e depois foi pulverizada em moinho Tecnal Wilye, até obtenção de granulometria inferior a 6 mm.

Antes do início do ensaio das amostras de teste, foi utilizado um Material Certificado de Referência (MCR) de ácido benzóico, com resultado conhecido, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados encontrados.

Para análise das amostras, foi utilizada massa de 1 g de amostra, determinada em balança analítica Sartori. A massa da amostra foi inserida no equipamento antes do início do ensaio. O ensaio da amostra foi realizado em Calorímetro de Bomba de Oxigênio de Isoperibol PARR (modelo 6200) durante aproximadamente 6 minutos. O equipamento gerou os resultados automaticamente após a leitura das amostras.

e) Teor de Umidade

Para análise de umidade dos materiais, foram utilizadas cápsulas de porcelana, previamente secas em estufa Quimis a 100 °C, com circulação forçada de ar. Após retirada da estufa, as cápsulas foram armazenadas em dessecador para resfriamento até atingirem temperatura ambiente. Massas de 50 g foram acondicionadas nas cápsulas, as quais foram mantidas em estufa entre 100 e 110 °C até atingirem temperatura constante, por aproximadamente 3 h.

f) Teor de Cinzas

Para análise de cinza dos materiais, foram utilizadas cápsulas de porcelana, previamente secas em estufa a 100 °C durante 2 horas. As cápsulas foram calcinadas em forno mufla a temperatura de 950 ± 50 °C por aproximadamente 30 minutos. Aproximadamente 1 g de amostra, previamente seca em estufa entre 100 e 110 °C, foi acondicionada na cápsula, e inserida no forno mufla a 750 ± 50 °C para combustão completa. A combustão completa é

observada quando não houver pontos pretos na amostra, o que ocorreu em aproximadamente 24 h.

g) Teor de Cloretos

Para análise de cloretos é necessária a abertura da amostra em bomba calorimétrica, utilizando aproximadamente 1 g de amostra. Após a combustão da amostra, realizou-se a análise através do método de Mohr, titulando a amostra até o seu ponto de viragem, utilizou-se solução indicadora de cromato de potássio. Realizou-se a análise de branco, a fim de desconsiderar interferentes.

3.5 PESQUISA EXPLORATÓRIA - FASE 3

Esta fase foi baseada em estudo da literatura e imersão em uma cimenteira por meio de visitas técnicas para entender as etapas de produção e quais seriam as possibilidades de uso dos materiais estudados, possíveis limitações e contribuições em termos de sustentabilidade.

Após os estudos teóricos e obtenção dos resultados desta pesquisa, foram sugeridas rotas potenciais de destino e conclusões sobre a viabilidade do uso dos RCC aplicados à indústria do cimento como alternativa sustentável para destinação final de resíduos sólidos provenientes da construção civil, avaliando qualitativamente quais seriam os ganhos em termos de redução do CO₂ no processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no programa experimental, fluxograma de processos, etapa de amostragem e caracterização das amostras de agregados reciclados e rejeitos são apresentados na sequência. A discussão é iniciada descrevendo as etapas iniciais realizadas, até a realização da proposta de rotas alternativas para o destino desses materiais na indústria do cimento, considerando as contribuições e limitações do uso.

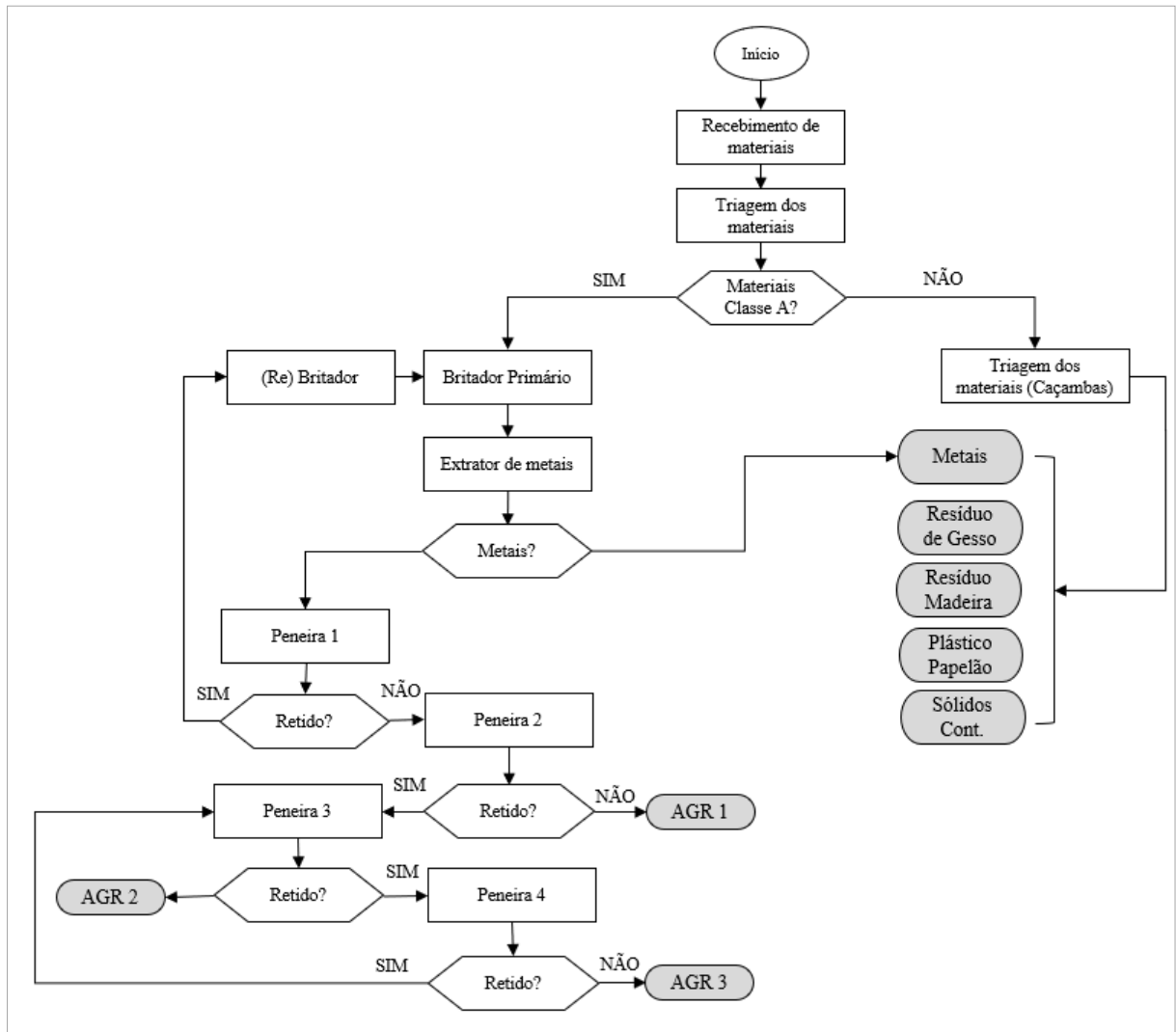
4.1 USINAS DE RECICLAGEM

4.1.1 Fluxograma do processo de triagem e beneficiamento de RCC

Os Resíduos Recicláveis da Construção Civil gerados nas Usinas de Reciclagem estudadas provêm, em grande parte, de grandes obras, prefeituras e concreteiras da região metropolitana de Curitiba. Não fez parte da pesquisa, a quantificação e a análise gravimétrica dos resíduos recebidos nas usinas.

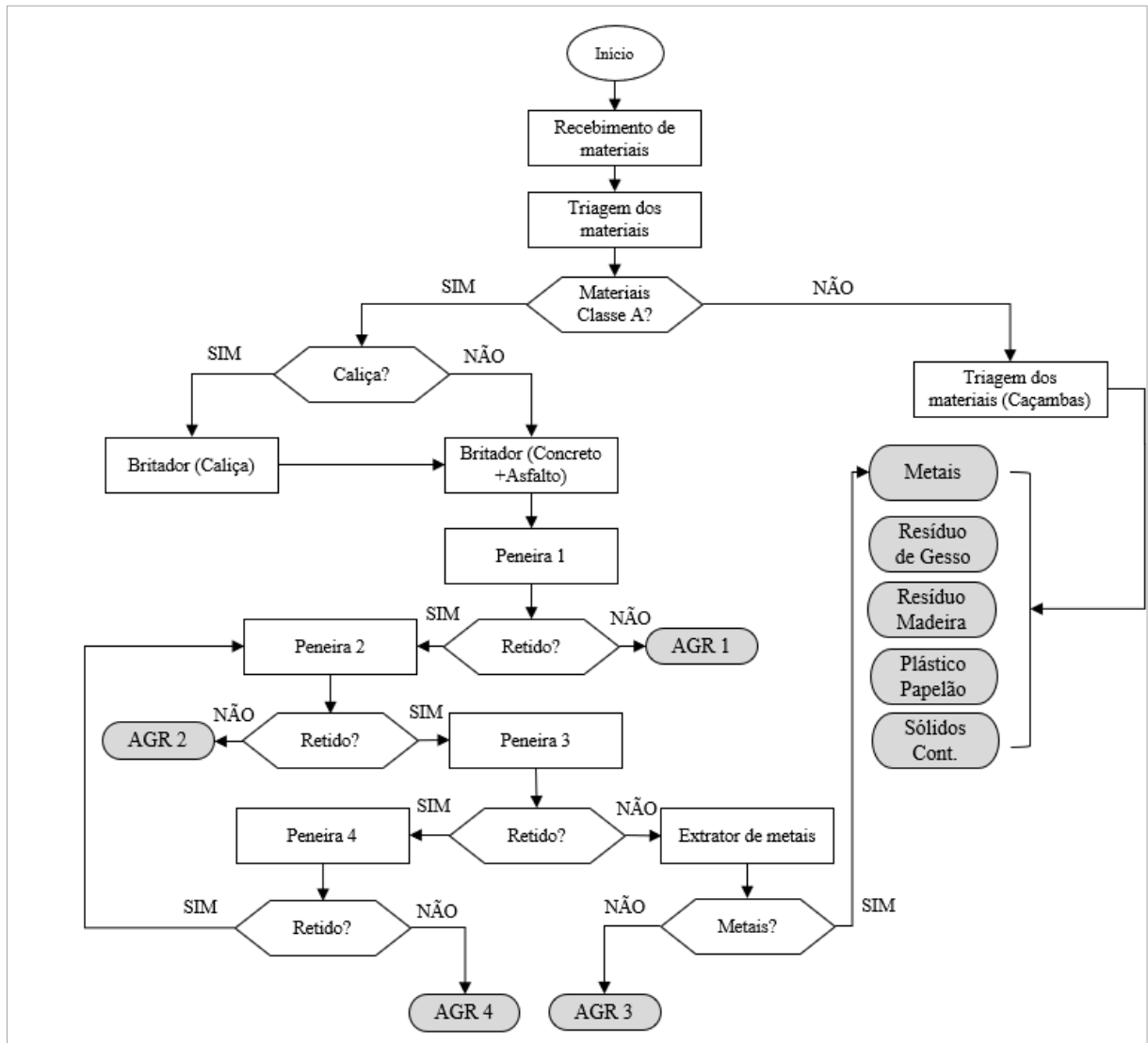
Nas Figura 29 e 30 são ilustrados os esquemas dos sistemas de processamento dos resíduos em cada usina visitada.

Figura 29 - Fluxograma do processo da Usina A de Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil.



FONTE: A autora (2024).

Figura 30 - Fluxograma do processo da Usina B de Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil.



FONTE: A autora (2024).

Os resíduos recebidos nas usinas (Figura 29 e 30) são separados em 2 grupos, sendo os materiais triados, chamados de não inertes (Madeiras, Gesso, Plástico/Papelão/Sólidos Contaminados) e o Recicláveis de Construção Civil, denominados de inertes (Classe A).

Ao receberem os RCC (Figura 31), as usinas A e B realizam a triagem (Figura 32) para remover materiais indesejados para o beneficiamento, tais como metais, madeira, gesso, papel e plásticos. Estes materiais são removidos, separados de acordo com a tipologia e subsequentemente armazenados em caçambas para destinação adequada.

Os materiais não inertes triados recebem destinação após a separação e os Recicláveis da Construção Civil são beneficiados de modo a originar os Agregados Recicláveis.

Figura 31 - Materiais recebidos nas usinas de reciclagem.



FONTE: A autora (2024).

Figura 32 - Realização da triagem manual para separação dos rejeitos.



FONTE: A autora (2024).

Após a triagem, os RCC são encaminhados para uma tremonha para alimentar o britador e peneirados em diferentes peneiras para separar os agregados reciclados em distintas

granulometrias. Nas Figuras 33 e 34 são exemplificados os agregados reciclados após o beneficiamento.

Figura 33 - Agregados Reciclados.



FONTE: A autora (2024).

Figura 34 - Agregados reciclados após beneficiamento.



FONTE: A autora (2024).

Nas usinas de reciclagem visitadas, os resíduos classe C e D são encaminhados para aterros sanitários. Assim como os agregados beneficiados que possuem alto teor de umidade, que normalmente são aqueles que ficaram expostos ao tempo.

Plástico, papelão, madeira e gesso são destinados à reciclagem, e quando muito contaminados com inertes, são destinados a aterros industriais.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

Os agregados reciclados foram caracterizados por meio de análises de finura, FRX e IAP com cimento para avaliar a possibilidade de uso como substituto de matéria prima alternativa e/ou cimentício (substituto do clínquer), na indústria do cimento.

4.2.1 Substituto de matéria prima e/ou clínquer

Nas cimenteiras, os materiais que possam substituir o calcário (fonte de CaCO_3), argila e óxidos de ferro e alumínio são considerados como substitutos de matéria prima, desde que não sejam de extração dos recursos naturais e que sejam gerados em algum outro processo industrial, caracterizados como resíduos ou subprodutos.

Para substituto de clínquer, as características principais, são amostras de materiais com características pozolânicas que atendam os requisitos da NBR 5752 (ABNT, 2014).

4.2.1.1 Caracterização física

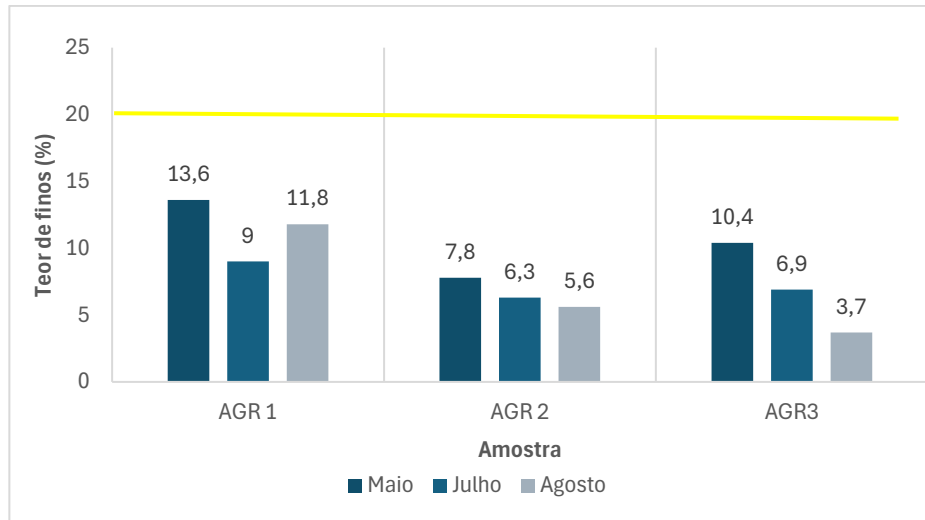
Os resultados obtidos nas caracterizações propostas para o agregado reciclado são apresentados abaixo.

a) Finura do material

Destaca-se a importância do controle da finura, uma vez que partículas grossas são difíceis de reagir no forno, resultando em alto teor de cal livre ou alto consumo de combustível durante a clinquerização (Chatterjee, 2011).

Os resultados obtidos no ensaio para determinação da finura dos agregados reciclados são apresentados na Figura 35.

Figura 35 - Resultados dos ensaios de teor de finos dos agregados reciclados, em percentual.



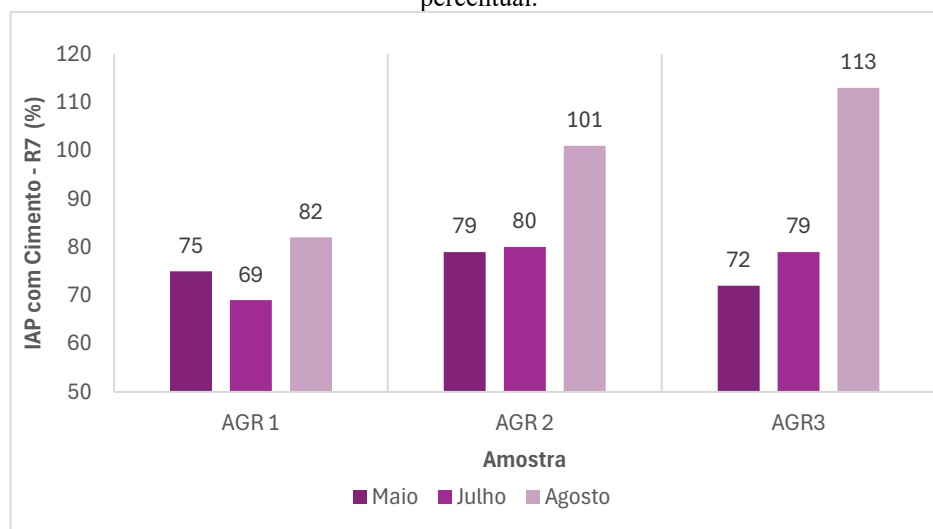
FONTE: A autora (2024).

O teor de finura resultou, em média 11,47% para o AGR 1, 5,6% para o AGR 2 e 7,0% para o AGR 3. Estes resultados foram considerados baixos, representando pequena quantidade de material retido na peneira 75 μ m, de acordo com os limites aceitáveis para agregados reciclados utilizados na produção de cimento, segundo Sajedi e Razak (2011) que recomendam valor de referência máximo de 20% de teor de finos.

b) IAP com cimento

O IAP foi calculado com base na média dos valores obtidos. Os resultados obtidos no ensaio de IAP são apresentados na Figura 36.

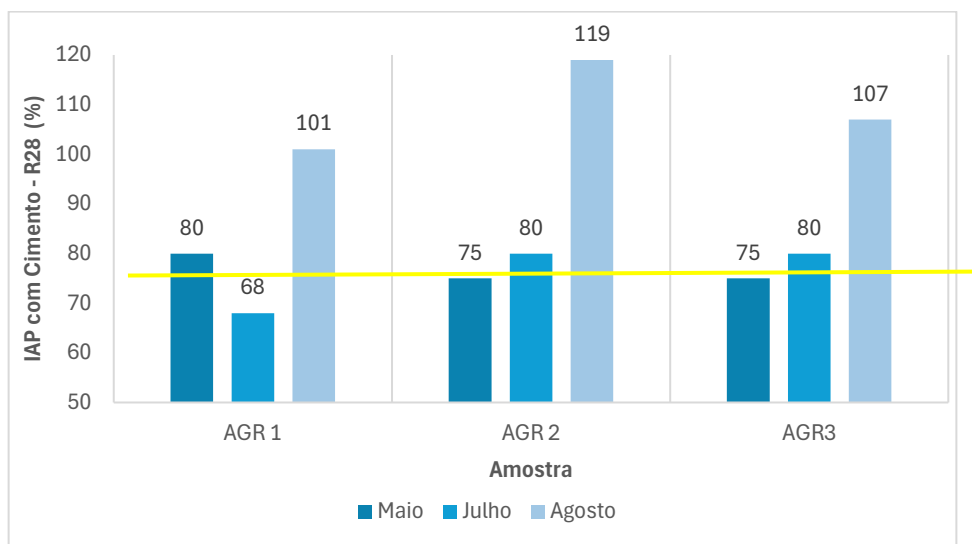
Figura 36 - Resultados dos ensaios do IAP com cimento, dos agregados reciclados em 7 dias (R7), em percentual.



FONTE: A autora (2024).

Na NBR 5752 (ANBT 2014) é sugerida a análise do IAP com cimento em 7 e 28 dias, conforme apresentado nas Figuras 36 e 37, respectivamente.

Figura 37 - Resultados dos ensaios do IAP com cimento dos agregados reciclados em 28 dias (R28), em percentual.



FONTE:A autora (2024).

É possível observar que os valores do IAP atenderam ao mínimo requerido de 75%, em média, para AGR 1, AGR 2 e AGR 3 de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014) para IAP em 28 dias, demonstrando que os agregados reciclados têm potencial para serem usados como substituto do clínquer na produção do cimento. Os agregados reciclados demonstraram alguma atividade pozolânica, porém não tão eficaz quanto o clínquer. Os resultados do IAP com o uso de agregado reciclado indicam que os materiais reciclados possuem menor capacidade de reagir com a cal livre para formar compostos benéficos, podendo haver redução da resistência à compressão com aumento do agregado reciclado, que pode ser atribuída à menor atividade pozolânica e à presença de impurezas ou características indesejáveis no agregado reciclado.

Apesar dos resultados do IAP para os agregados estarem de acordo com o limite técnico da norma, sua utilização ainda oferece benefícios ambientais significativos como a redução da utilização de matérias-primas naturais e a diminuição dos resíduos de construção. Portanto, é uma opção viável quando usada em proporções controladas e em combinação com outros aditivos para melhorar o desempenho do cimento.

A substituição parcial do clínquer por agregado reciclado na fabricação de cimento é uma estratégia promissora para a construção sustentável, com potencial de reduzir os impactos ambientais e promover o uso eficiente de recursos.

4.2.1.2 Caracterização química

a) Fluorescência de Raios-X (FRX)

Nos ensaios de FRX foi detectada a presença dos óxidos de cálcio (CaO), sílica (SiO₂), magnésio (MgO), alumínio (Al₂O₃) e de ferro (Fe₂O₃), necessários para a farinha do clínquer. A partir da quantificação destes óxidos foi possível realizar a avaliação como possível substituto de matéria prima e/ou clínquer. Os resultados da análise da FRX para o agregado reciclado estão apresentados na Tabela 5. Estes resultados fornecem uma visão detalhada da composição química do agregado reciclado e sua adequação para uso na produção de cimento.

Tabela 3 - Composição química dos Agregados Reciclados por Fluorescência de Raios-X (FRX), em percentual.

FRX (% em peso)									
	AGR 1			AGR 2			AGR 3		
Parâmetro	23/05/24	18/07/24	07/08/24	23/05/24	18/07/24	07/08/24	23/05/24	18/07/24	07/08/24
■ SiO ₂	61,41	71,97	69,98	62,46	66,24	62,68	65,3	69,35	63,61
■ CaO	11,82	6,79	8,17	10,92	6,32	8,84	8,64	6,91	7,65
■ Al ₂ O ₃	7,73	6,27	6,23	7,84	11,82	9,18	8,04	8,88	10,93
■ Fe ₂ O ₃	2,94	2,25	2,68	3,08	3,84	3,24	2,81	2,96	3,63
■ MgO	2,43	1,82	2,56	2,67	1,66	2,95	2,4	1,19	2,44
Na ₂ O	1,75	0,4	0,58	1,55	0,76	1,18	1,65	1,1	1,94
K ₂ O	1,89	1,12	1,19	1,67	1,67	1,83	1,72	1,86	1,94
SO ₃	0,85	0,52	0,36	0,64	0,43	0,33	0,63	0,29	0,26
TiO ₂	0,64	0,45	0,49	0,66	0,86	0,56	0,58	0,58	0,72
P ₂ O ₅	0,1	0,05	0,09	0,11	0,08	0,11	0,1	0,07	0,16
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,08	0,01	0,03	0,03
Mn ₂ O ₃	0,05	0,02	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
PF	7,88	8,32	8,57	8,08	6,24	9,11	7,71	6,75	7,27

FONTE: A autora (2024).

Legenda: SiO₂ (óxido de silício), CaO (óxido de cálcio), Al₂O₃ (óxido de alumínio), Fe₂O₃ (óxido de ferro), MgO (óxido de magnésio), Na₂O (óxido de sódio), K₂O (óxido de potássio), SO₃ (trióxido de enxofre), TiO₂ (dióxido de titânio), P₂O₅ (pentóxido de sódio), Cr₂O₃ (óxido de cromo III), Mn₂O₃ (óxido de manganês III) e PF (perda ao fogo).

A concentração de óxido de silício (SiO₂) nas amostras dos AGR1, AGR 2 e AGR 3, em média, resultou superior a 63% e considerada relativamente alta. O silício é um componente chave na formação de silicatos de cálcio, que são cruciais para resistência e durabilidade do cimento. Essa alta concentração pode ser benéfica, contribuindo para as propriedades pozolânicas do cimento, especialmente quando combinada com outras matérias-primas.

A porcentagem média por amostra de até 9% de óxido de cálcio nos agregados reciclados indicaram quantidades relativamente baixas deste elemento. O cálcio é um

componente essencial na formação do clínquer e na criação de compostos cimentícios. No entanto, as quantidades de cálcio nos agregados reciclados são inferiores às encontradas no clínquer convencional, que tipicamente contém cerca de 60-65% de cálcio. Isso sugere que os agregados reciclados podem não fornecer cálcio suficiente por si só e podem exigir uma combinação com outras fontes de cálcio ou aditivos para atingirem as propriedades desejadas do cimento.

Os agregados reciclados não possuem níveis consideráveis de óxidos de alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3) com média de aproximadamente 9,0% e 3,0%, respectivamente.

O óxido de magnésio (MgO), com porcentagem de aproximadamente 2,6%, pode afetar a hidratação e o desempenho do cimento. Traços de elementos menores devem ser monitorados para evitar impurezas indesejadas que possam impactar negativamente a qualidade do cimento.

Como não é possível a separação de elementos, o material é estudado em termos do maior contribuinte, e os demais elementos monitorados, a fim de não impactar na qualidade do cimento.

Devido às concentrações observadas, o alto teor de sílica dos materiais estudados, sugere possível substituição de matérias primas com características silicosas, utilizadas no processo de fabricação de cimento provenientes da extração dos recursos minerais. A combinação dos agregados reciclados, como matéria-prima alternativa, com outras matérias-primas, como calcário ou cinzas volantes, pode ajudar a atingir a composição desejada e otimizar o desempenho do cimento.

A análise de Fluorescência de Raios-X (FRX) revelou que os agregados reciclados possuem composição química que pode ser adequada para seu uso como substituto de matéria-prima na indústria de cimento, com algumas ressalvas. Recomenda-se uso parcial e com realização de ajustes quando necessário. Os agregados reciclados devem ser utilizados em proporções controladas e em combinação com outras matérias-primas para compensar a menor quantidade de cálcio e a presença de outros elementos. Ajustes na formulação e na adição de aditivos são necessários para otimizar a qualidade do cimento. Apesar das limitações, o uso de agregado reciclado oferece vantagens ambientais significativas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS TRIADOS

Os materiais amostrados na etapa de triagem, considerados não inertes (Madeira, Plástico/Papelão/Gesso e Sólidos contaminados), foram avaliados de acordo com suas características técnicas a fim de serem utilizados na indústria do cimento na etapa de

coprocessamento, como combustível alternativo. No caso do gesso, foram avaliadas as características necessárias para uso como aditivo substituto da gipsita, utilizada como aditivo na etapa da moagem.

Os parâmetros Poder Calorífico Superior, Teor de Umidade, Teor de Cloretos e Teor de Cinzas foram determinados para materiais com características de substituição de combustíveis alternativos (Madeira, Plástico/Papelão e Sólidos contaminados).

Avaliou-se a possibilidade de adição do gesso ao cimento por meio de análises específicas para esse material na indústria do cimento, tais como índice de acidez, teor de umidade e FRX para caracterização de CaO , SO_3 e P_2O_5 .

4.3.1 Combustível Alternativo

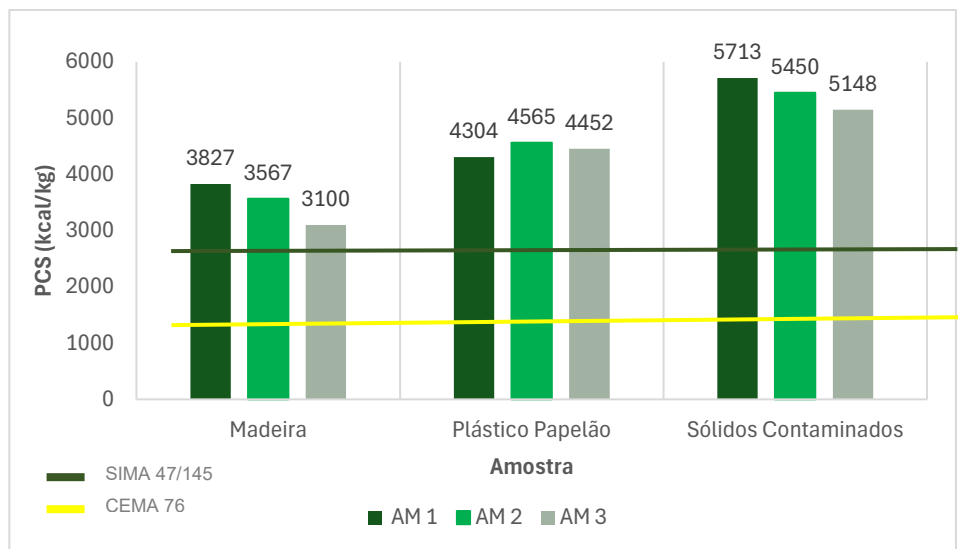
Os resíduos triados que possuem características para uso no coprocessamento de resíduos são madeira, papel/papelão e sólidos contaminados. Esses materiais devem passar por trituração para redução da granulometria, que pode ser realizada nas cimenteiras que possuam trituradores específicos ou serem direcionados para unidades de preparos de resíduos para queima em fornos de cimento.

A granulometria requerida pelas cimenteiras para queima do resíduo no forno de cimento é de aproximadamente 50 mm. Este limite depende de cada canal de alimentação no forno e de cada cimenteira e essas especificações são determinadas por estudos de fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD), com simulação numérica para escoamentos de fluidos, transferência de calor e demais fenômenos relacionados com combustão, aerodinâmica, reações, dentre outros, visando a representação das leis da física (www.dynamis-br.com).

4.3.1.1 Poder Calorífico Superior (PCS)

Quanto maior o poder calorífico de uma substância, maior é a quantidade de energia que o material possui. Para combustíveis alternativos, busca-se oportunidades de materiais com alto poder calorífico. Os resultados do PCS obtidos para as amostras estudadas são apresentados na Figura 38.

Figura 38 - Resultados dos ensaios do Poder Calorífico Superior dos resíduos de madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em kcal/kg.



FONTE: A autora (2024).

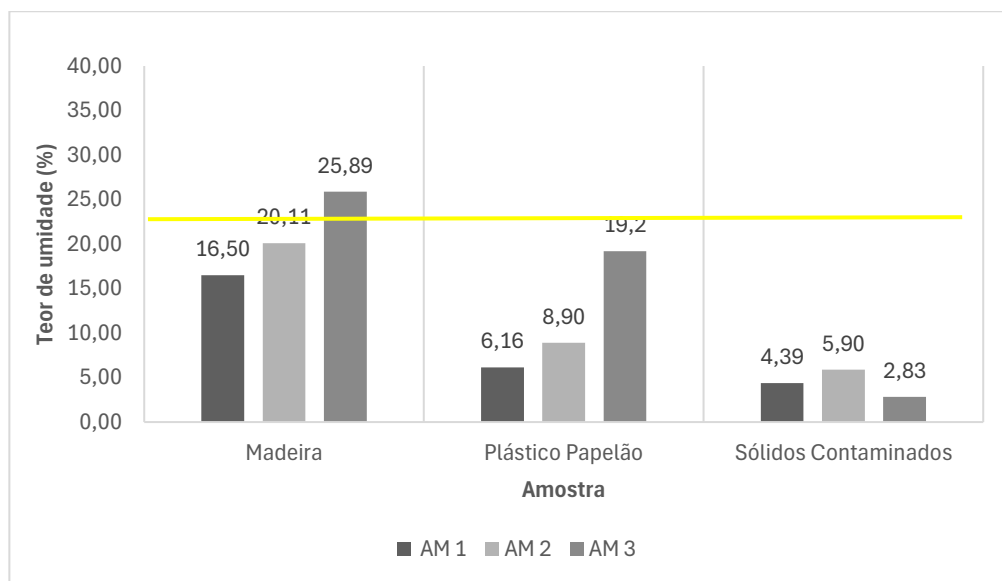
É possível observar que os valores do Poder Calorífico para as amostras (Figura 38) estão de acordo com o limite mínimo especificado na Resolução SIMA nº 47 e na Resolução SIMA nº 145 de 2775 kcal/kg de Poder Calorífico Inferior para coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. E de acordo com o limite especificado na Resolução CEMA nº 76 de no mínimo 1500 kcal/kg para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento para substituição de matéria prima ou aproveitamento energético.

Demais estados não possuem legislação específica para este parâmetro, sendo usadas essas legislações como referências. Pelos resultados obtidos, sugere-se o uso dos resíduos da Madeira, Plástico/Papelão e Sólidos contaminados como combustíveis alternativos, o que reduz o uso do combustível fóssil e consequentemente do nível de emissões de CO₂.

4.3.1.2 Teor de Umidade

Os resultados dos ensaios de teor de umidade dos materiais estudados são apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Resultados do teor de umidade dos resíduos da madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em percentual.



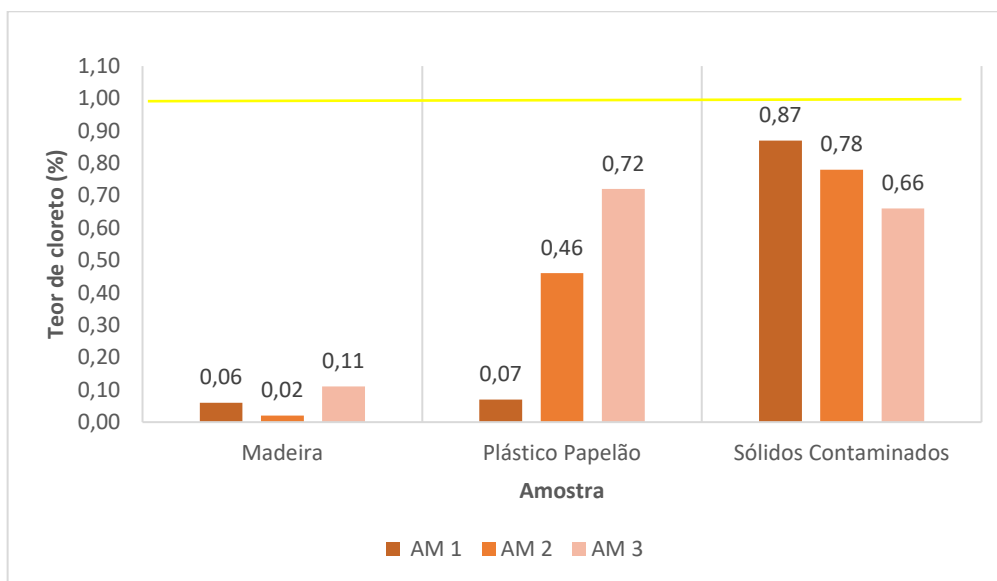
FONTE: A autora (2024).

É possível observar que todos os resultados obtidos para os materiais resultaram inferiores ao limite de 21%, exceto para Madeira AM3. Com esses resultados é recomendado o teste do uso destes materiais na cimenteira. Para a AM3 recomenda-se a mistura com madeira mais seca ou secagem ao tempo para reduzir a umidade. Em média, todas as amostras estudadas, AM1, AM2 e AM3, obtiveram resultados satisfatórios e recomendado seu uso como combustível alternativo.

4.3.1.3 Teor de Cloretos

O teor de cloretos nos combustíveis é um aspecto crucial a ser monitorado e controlado para evitar problemas operacionais e garantir a conformidade ambiental. Na Figura 40 são apresentados os resultados do teor de cloretos.

Figura 40 - Resultados do teor de cloreto dos resíduos da madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

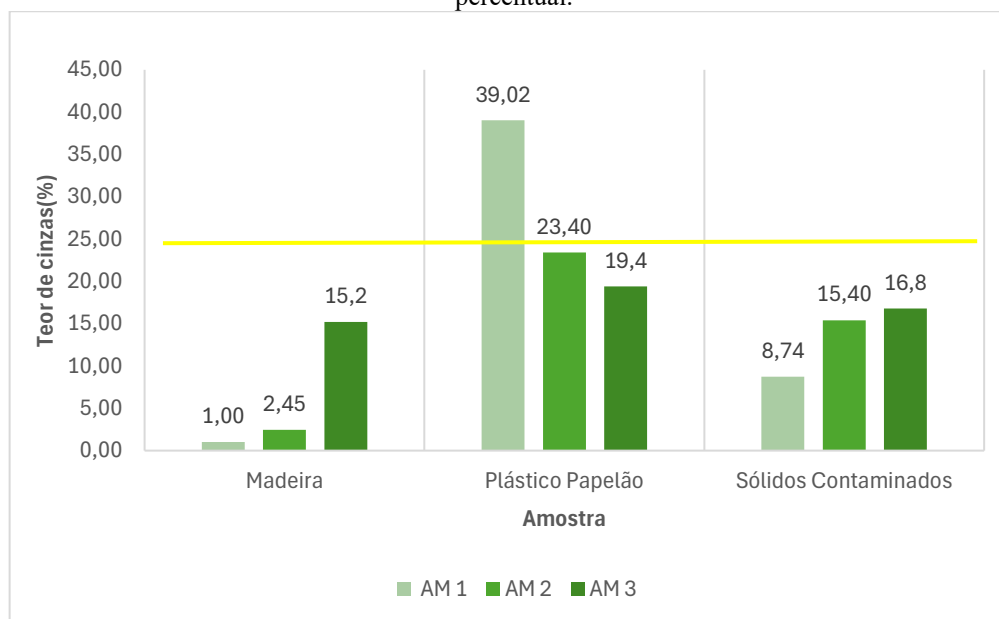
Os resultados do teor de cloretos obtidos nas amostras ensaiadas estão de acordo com o limite máximo de 1,0% disposto nas legislações do estado de São Paulo, sendo possível a utilização destes materiais em fornos de cimento.

A presença de cloretos mais elevada pode exigir sistemas adicionais de controle de cloro no forno, como *by-pass* de cloro, a tecnologia funciona como um filtro que tem a finalidade de retirar do forno de cimento o cloro em excesso proveniente dos resíduos.

4.3.1.4 Teor de Cinzas

O teor de cinzas nos combustíveis alternativos pode afetar diretamente a eficiência da combustão nos fornos de cimento. Na Figura 41 são apresentados os resultados para o ensaio do teor de cinzas.

Figura 41 - Resultados do teor de cinzas dos resíduos da madeira, plástico/papelão e sólidos contaminados, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

A Madeira e os Sólidos contaminados apresentaram teor de cinzas abaixo da especificação de 22%, sendo materiais com potencial para uso como combustíveis alternativos. As amostras de Plástico/Papelão apresentaram teores de cinzas superiores ao limite aceitável, não sendo recomendadas para uso como combustíveis alternativos nas cimenteiras. Estes materiais quando coletados, visualmente apresentaram cimentos e argamassa agregados nas superfícies. Os demais materiais podem ser considerados como combustíveis alternativos e podem apresentar vantagens significativas em comparação com outros materiais, quando utilizados na indústria do cimento. O baixo teor de cinzas da madeira proporciona vários benefícios operacionais e ambientais, destacando-se como alternativa eficiente e sustentável aos combustíveis fósseis tradicionais.

4.3.2 Aditivo ao cimento

4.3.2.1 Caracterização física e química do resíduo de gesso

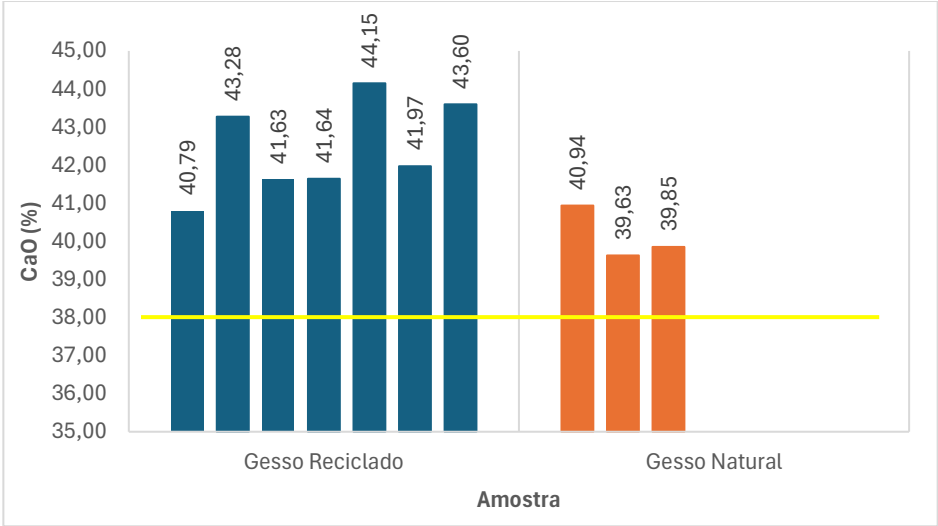
Foram comparadas as principais características dos resíduos de gesso coletados nas Usinas de reciclagens com o Gesso Natural (Convencional) e Gesso Sintético (Fosfogesso) utilizados na indústria do cimento.

Os resultados dos parâmetros CaO , SO_3 , P_2O_3 e Umidade foram comparados com referências da literatura e/ou normas técnicas. Os dados apresentaram distribuição normal, seguindo o método de Shapiro Wilk, portanto realizou-se a análise estatística ANOVA para

comparar se existem ou não diferenças significativas entre as médias dos resultados obtidos entre os Resíduos de Gesso e Gesso Natural e os Resíduos de Gesso e Gesso Sintético.

Os resultados obtidos na análise de FRX para o parâmetro CaO dos Resíduos de Gesso e Gesso Natural são apresentados na Figura 42.

Figura 42 - Resultados dos ensaios de FRX do CaO dos resíduos de gesso reciclado e de gesso natural, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

O parâmetro CaO é necessário para garantir que o gesso desempenhe efetivamente seu papel como retardador para construção civil. O limite mínimo de 38% requerido para testes do material em escala industrial foi atendido para as amostras de Resíduo de Gesso. Os resultados da análise estatística ANOVA, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da análise estatística ANOVA referente ao parâmetro CaO para os Resíduos de Gesso e Gesso Natural.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Gesso Reciclado	7	297,0620041	42,437429	1,5303164
Gesso Natural	3	120,4210014	40,140334	0,4909437

ANOVA

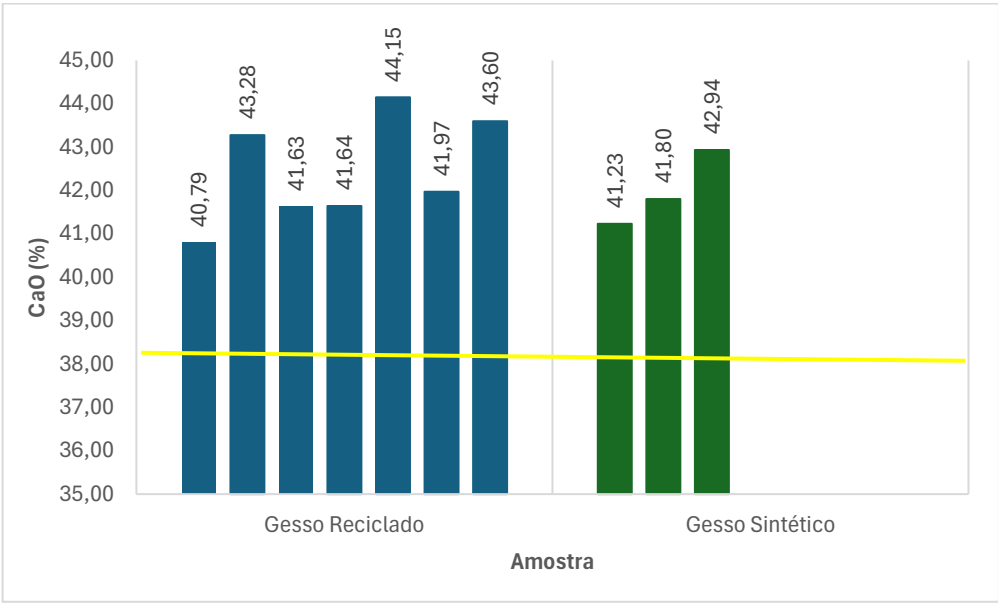
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	11,080959	1	11,080959	8,7219145	0,018333	5,317655
Dentro dos grupos	10,163786	8	1,2704732			
Total	21,244744	9				

FONTE: A autora (2024).

O Resíduo de Gesso quando comparado ao Gesso Natural apresentou F crítico menor que o F calculado para o parâmetro de CaO, indicando que existem diferenças significativas entre as médias dos resultados encontrados.

Os resultados obtidos na análise de FRX para o parâmetro CaO do Resíduo de Gesso e do Gesso Sintético são apresentados na Figura 43.

Figura 43 - Resultados dos ensaios de FRX do CaO, comparativo entre os resultados do Resíduo de Gesso e do Gesso Sintético, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

Foi realizado análise estatística ANOVA (tabela 5), para avaliar se estatisticamente existem ou não diferenças significativas entre as médias encontradas.

Tabela 5 - Resultados da análise estatística ANOVA, referente ao parâmetro CaO, entre Resíduo de Gesso e Gesso Sintético.

Anova: fator único

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Gesso Reciclado	7	297,062	42,43743	1,530316
Gesso sintético	3	125,972	41,99067	0,750334

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,419151	1	0,419151	0,313895	0,59064	5,317655
Dentro dos grupos	10,68257	8	1,335321			
Total	11,10172	9				

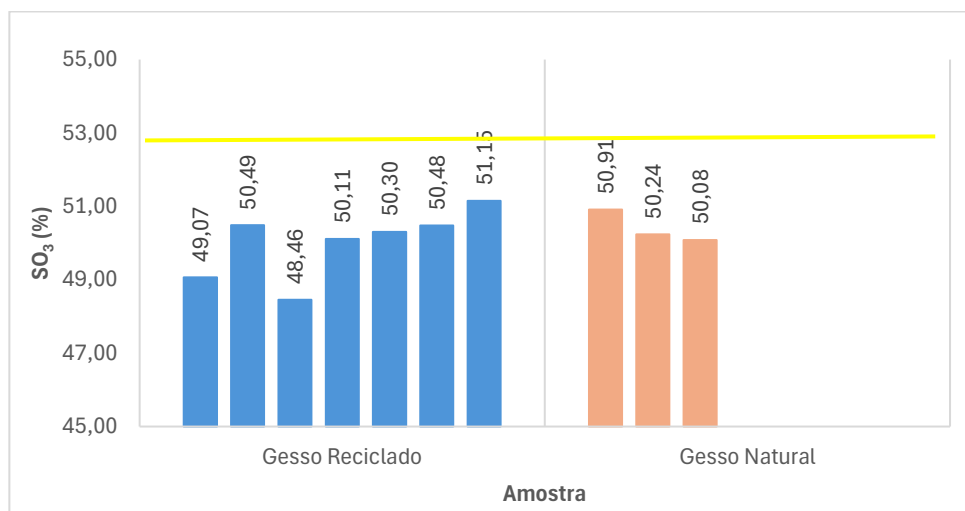
FONTE: A autora (2024).

O Resíduo de Gesso quando comparado com o Gesso Sintético, pela análise estatística ANOVA, apresentou $F_{crítico}$ maior que o F calculado, para o parâmetro de CaO, indicando que não há diferenças significativas entre as médias dos resultados encontrados.

O gesso, principalmente na forma de gesso natural ou sintético, contém SO_3 que desempenha papel essencial na regulação do tempo de pega do cimento, influenciando diretamente a trabalhabilidade e a resistência final do concreto.

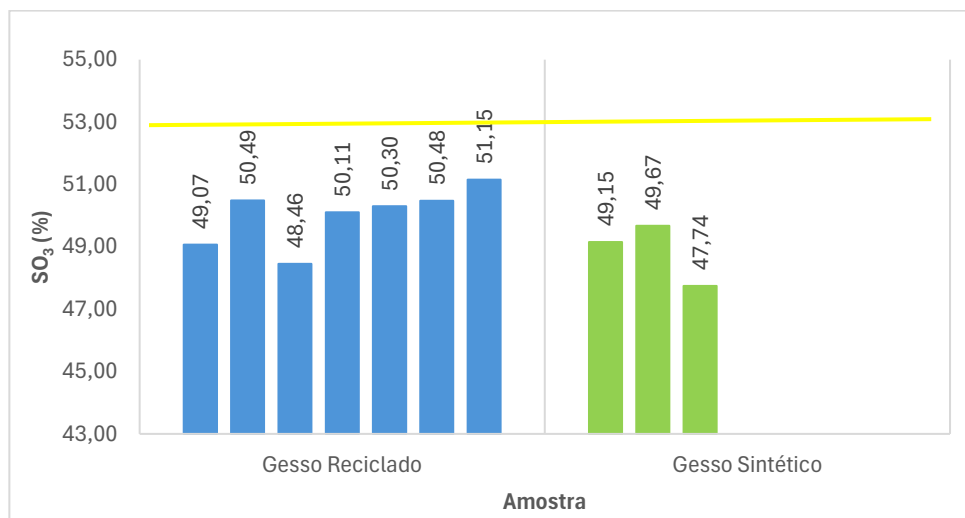
Os resultados obtidos nas análises de FRX para o parâmetro SO_3 do Gesso Natural são apresentados na Figura 44 e para o Gesso sintético na Figura 45.

Figura 44 - Resultados dos ensaios de FRX de SO_3 do Resíduo de Gesso e Gesso Natural, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

Figura 45 - Resultados dos ensaios de FRX de SO_3 do Resíduo de gesso e Gesso Sintético, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

Segundo a NBR 13207 (ABNT, 2017), é recomendado o teor mínimo de 53% de SO_3 para garantir que o gesso desempenhe efetivamente seu papel como retardador de pega, sem comprometer a resistência e a durabilidade do cimento. Nenhuma das amostras estudadas se enquadrou no valor mínimo recomendado na norma.

Foi realizada análise estatística ANOVA, para avaliar se estatisticamente existem ou não diferenças significativas entre as médias encontradas, os resultados foram apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Resultados da análise estatística ANOVA, referente ao parâmetro SO_3 , entre Resíduo de Gesso e Gesso Natural.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Gesso Reciclado	7	350,0470047	50,006715	0,85754
Gesso Natural	3	151,2319984	50,410666	0,1952593

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,3426708	1	0,3426708	0,4952106	0,501577	5,317655
Dentro dos grupos	5,5357583	8	0,6919698			
Total	5,8784291	9				

FONTE: A autora (2024).

Tabela 7 - Resultados da análise estatística ANOVA, referente ao parâmetro SO_3 , entre Resíduo de Gesso e Gesso Sintético.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Gesso Reciclado	7	350,047	50,00671	0,85754
Gesso Sintético	3	146,57	48,85667	0,994714

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,777484	1	2,777484	3,114353	0,115607	5,317655
Dentro dos grupos	7,134668	8	0,891833			
Total	9,912151	9				

FONTE: A autora (2024).

O Resíduo de Gesso quando comparado com o Gesso Natural e Gesso Sintético, pela análise estatística ANOVA, apresentou $F_{\text{crítico}}$ maior que o F calculado, para o parâmetro de SO_3 , indicando que não há diferenças significativas entre as médias dos resultados encontrados.

A limitação para esse processo é que o resíduo de gesso, tal qual é triado nas Usinas de Reciclagem não pode ser utilizado, devido a maior parte dele ser gesso acartonado, para o

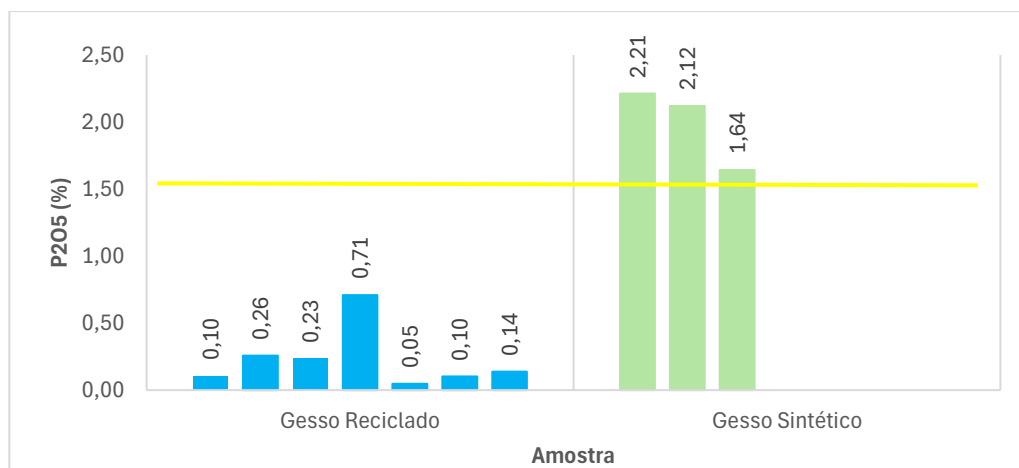
uso como aditivo no cimento, deve-se passar por um processo de reciclagem do gesso para remoção do cartão.

Segundo Erbs (2016), é possível utilizar o resíduo de gesso de construção como matéria-prima em processos de reciclagem, constituídos de etapas de moagem associadas à calcinação. O objetivo do processo de reciclagem de gesso acartonado é remover o papel e outras impurezas de sua composição (Hansen; Sadeghlin, 2020).

A presença de óxidos de fósforo (P_2O_5) deve ser cuidadosamente monitorada para evitar impactos negativos na qualidade do cimento, pois concentrações elevadas podem afetar adversamente a química do cimento e o processo de hidratação.

Os resultados obtidos do parâmetro P_2O_5 no ensaio químico do resíduo de gesso comparados com os resultados de Gesso Sintético são apresentados na Figura 46.

Figura 46 - Resultados do ensaio de P_2O_5 , via FRX, do gesso reciclado e gesso sintético, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

Os resultados obtidos para P_2O_5 atendem a referência de literatura de máximo 1,5% (Taylor, 1997; Hurdowski, 2014).

Foi realizada análise estatística ANOVA para avaliar se estatisticamente existem ou não diferenças significativas entre as médias encontradas, os resultados foram apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da análise estatística ANOVA referentes ao parâmetro P_2O_5 obtido para os Resíduos de Gesso e de Gesso Sintético.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Gesso reciclado	7	1,591	0,227286	0,050756
Gesso sintético	3	5,975	1,991667	0,093862

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,537384	1	6,537384	106,2423	6,77E-06	5,317655
Dentro dos grupos	0,492262	8	0,061533			
Total	7,029646	9				

FONTE: A autora (2024).

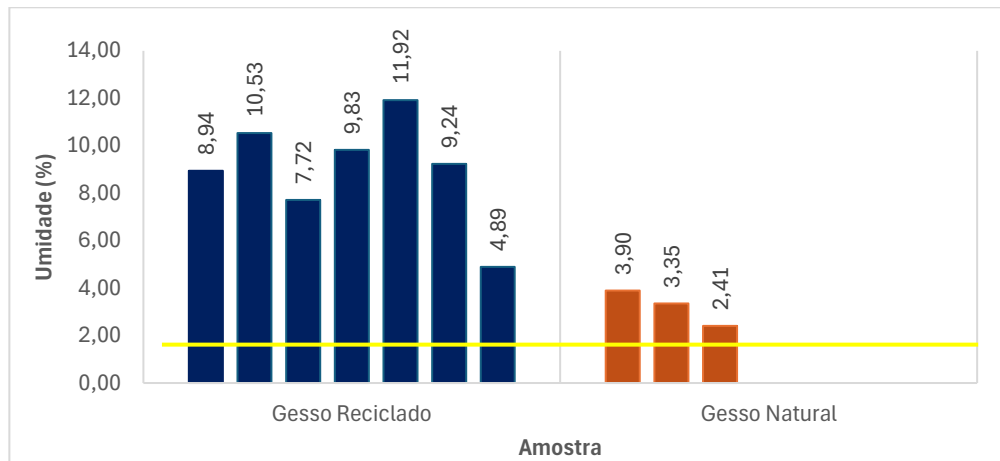
O Resíduo de Gesso quando comparado com o Gesso Sintético apresentou $F_{crítico}$ menor que o F calculado para P_2O_5 , indicando que existem diferenças significativas entre as médias dos resultados encontrados.

Não há especificação técnica em normas, para esse óxido em específico, porém na indústria e a literatura são indicados teores $< 1,5\%$ para não impactar a qualidade do cimento. Observa-se que os resultados desse parâmetro para o gesso reciclado foram significativamente menores, se comparados com os teores de P_2O_5 do gesso sintético usado rotineiramente na indústria do cimento.

Outro parâmetro estudado e de extrema importância é a umidade presente no gesso que pode influenciar sua capacidade de regular o tempo de pega do cimento. O gesso é utilizado para controlar o tempo de solidificação do cimento, e a presença de umidade pode alterar a forma como o gesso reage com o clínquer, afetando o tempo de pega e a qualidade do cimento.

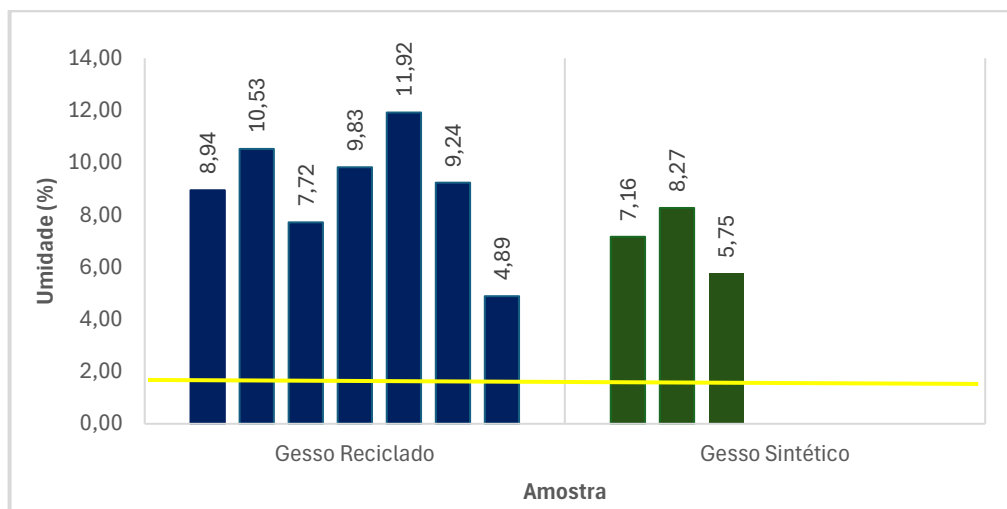
Na Figura 47 são apresentados os resultados do ensaio de umidade realizado nas amostras de gesso estudadas.

Figura 47 -Resultados do Teor de Umidade do gesso reciclado e gesso natural, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

Figura 48 - Resultados do Teor de Umidade do gesso reciclado e gesso sintético, em percentual.



FONTE: A autora (2024).

Os valores resultaram em teor de umidade mais elevado para o Resíduo de Gesso quando comparado com os materiais Gesso Natural e Gesso Sintético.

Tabela 9 - Resultados da análise estatística ANOVA referentes ao Teor de Umidade dos Resíduos de Gesso e Gesso natural.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Gesso Reciclado	7	63,07000017	9,01	5,0259282
Gesso Natural	3	9,657999992	3,2193333	0,5676804

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	70,416824	1	70,416824	18,003127	0,002826	5,317655
Dentro dos grupos	31,29093	8	3,9113663			
Total	101,70775	9				

FONTE: A autora (2024).

Tabela 10 - Resultados da análise estatística ANOVA referentes ao Teor de Umidade dos Resíduos de Gesso e Gesso Sintético

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Gesso Reciclado	7	63,07	9,01	5,025928
Gesso Sintético	3	21,177	7,059	1,595712

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,993441	1	7,993441	1,91764	0,20351	5,317655
Dentro dos grupos	33,34699	8	4,168374			
Total	41,34043	9				

FONTE: A autora (2024).

O Resíduo de Gesso quando comparado com o Gesso Natural, pela análise estatística ANOVA, apresentou $F_{crítico}$ menor que o F calculado, para o parâmetro teor de Umidade, indicando que existem diferenças significativas entre as médias dos resultados encontrados, já o comparativo do Resíduo de Gesso com o Gesso Sintético, pela análise estatística ANOVA, apresentou $F_{crítico}$ maior que o F calculado, para o parâmetro de Umidade, neste caso não existem diferenças significativas entre as médias dos resultados encontrados.

Os parâmetros de CaO e P_2O_5 , atender os limites especificados em normas técnicas e/ou literatura. Já os parâmetros de SO_3 e Umidade, não estão dentro do esperado.

O comparativo estatístico, se mostrou interessante, pelo fato de quando o Resíduo de Gesso é comparado estatisticamente com o Gesso natural, existem diferenças significativas entre as médias de resultados encontrado. Por outro lado, não existem diferenças significativas entre os resultados obtidos para o Resíduo de Gesso comparado estatisticamente com o Gesso

Sintético. E ambos os materiais Gesso Natural e Gesso Sintético já são utilizados rotineiramente em fábricas de cimento.

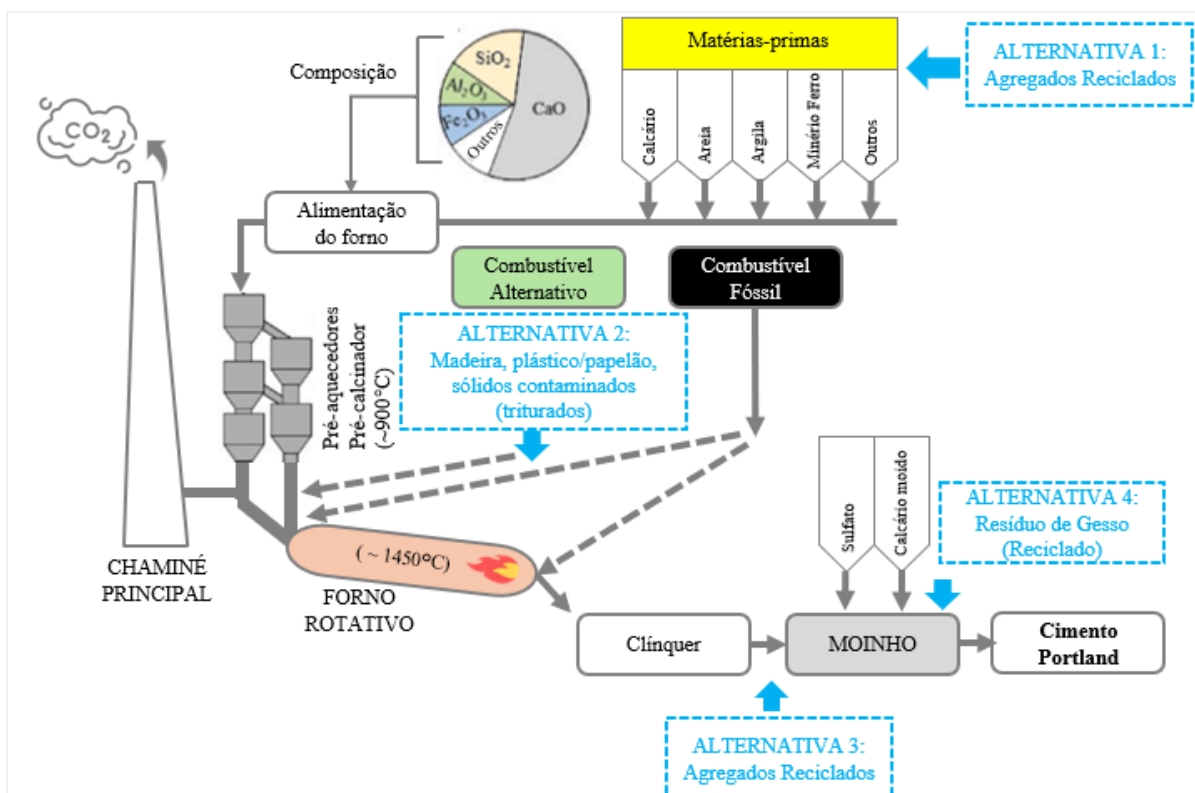
Neste caso, um teste industrial, com diferentes percentuais de adições ao cimento é de extrema importância para viabilizar a solução de uso desse material. Sendo uma possibilidade emergente, devido ao características do Resíduo de Gesso serem semelhantes ao Gesso Sintético já utilizado no processo industrial como aditivo ao cimento.

O uso de gesso triado na Usina de Reciclagem de Resíduos da construção civil emerge como uma possibilidade sustentável para uso na indústria do cimento como aditivo, desde que passe por um processo de reciclagem de gesso para remover o cartão do material e seja adicionado de maneira controlada no processo.

4.4 PROPOSTA DE ROTA ALTERNATIVA, POTENCIAL DE APLICAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES EM TERMOS DE SUSTENTABILIDADE

Com base nos dados obtidos na caracterização dos materiais são propostas rotas alternativas para destino dos materiais estudados na indústria do cimento (Figura 49).

Figura 49 - Proposta de rota sustentável para destinação dos Resíduos Recicláveis da Construção Civil



FONTE: Adaptado de Schindler (2014).

Os agregados reciclados são recomendados para uso em dois pontos do processo por apresentarem alto teor de sílica e características pozolânicas ($IAP > 75\%$). Para os agregados recicláveis, há duas potenciais possibilidades, destacadas na Figura 49 como alternativas 1 e 3.

A alternativa 1 para agregados reciclados é a possibilidade de uso via matéria prima, como fonte de sílica. Dependendo da característica da composição da mina, estes podem ser recomendados quando há necessidade de aumento do teor de sílica. Como fonte descarbonatada de matéria prima, o teor de CaO é baixo, para utilização com essa finalidade, recomenda-se o uso de materiais com CaO acima de 30% como fonte descarbonatada.

Para os agregados reciclados, também foi considerada a alternativa 3, na qual foram considerados como materiais substitutos de clínquer. O objetivo de utilizar materiais cimentícios suplementares (MCS) no cimento é reduzir custos e a emissão total de CO₂ na produção de cimento (Trumer *et al.*, 2019). A produção de cimento é responsável por grandes emissões antropogênicas de CO₂ na atmosfera, em parte devido à descarbonação da rocha calcária. Reduzir a relação clínquer/cimento é uma alternativa viável para diminuir o impacto ambiental da construção (Baggio *et al.*, 2024). Os pequenos elementos, considerados impurezas para formação do clínquer, devem ser monitorados e o controle deve ser na dosagem do material alternativo substituto.

Para essa possibilidade de uso, RCC como substituto de clínquer, a atividade pozolânica deve ser constantemente monitorada, garantindo o mínimo de especificação desejada. Para não alterar a qualidade do cimento é recomendado monitoramento da adição, entendendo os perfis de dosagem que não afetem a qualidade do cimento.

A utilização de agregado reciclado é uma prática sustentável que reduz a demanda por matérias-primas naturais e promove a reutilização de materiais. Com os ajustes apropriados na formulação, o agregado reciclado pode contribuir significativamente para produção mais ecológica e econômica do cimento.

Para os materiais com características combustíveis, madeira, papel/papelão e sólidos contaminados, considerados como rota de destino a alternativa 2, canal onde são alimentados resíduos como combustíveis alternativos, visando a redução do uso de combustível fóssil e o destino de resíduos sem a geração de passivos ambientais, prolongando assim a vida útil dos aterros. Nesta etapa, as cinzas geradas na queima dos materiais ficam agregada na composição do clínquer, sendo necessário um padrão inicial de qualidade para os materiais a serem coprocessados em fornos de cimento para evitar possíveis impactos de processo e qualidade do clínquer e do cimento.

A transição para combustíveis alternativos na indústria de cimento representa um avanço significativo em direção à produção mais sustentável e ecológica. Os benefícios associados ao uso desses combustíveis como fonte redutora de dióxido de carbono (CO₂) são notáveis e multidimensionais, refletindo não apenas a contribuição para mitigação das mudanças climáticas, mas também ganhos econômicos e operacionais.

Os combustíveis alternativos, como plástico, papel, papelão, sólidos contaminados e resíduos de madeiras podem melhorar a eficiência energética do processo de fabricação de cimento e reduzir os custos operacionais. Muitas vezes, esses combustíveis oferecem características energéticas compatíveis com os requisitos do processo de calcinação e moagem do cimento. Além disso, a disponibilidade local e o custo reduzido de muitos combustíveis alternativos podem resultar em economias significativas, contribuindo para maior competitividade e viabilidade econômica da indústria.

O limitante dessa prática, é a necessidade de trituração dos materiais (plástico, papel, papelão, sólidos contaminados e resíduos de madeiras) a aproximadamente 50 mm para garantir queima efetiva no calcinador.

O Resíduo de Gesso foi considerado como substituto de Gesso Natural e Gesso Sintético, demonstrado como alternativa 4 na Figura 49. Gesso Natural e Sintético são materiais já utilizados na indústria do cimento e a recomendação é o teste em escala industrial para substituição destes materiais pelo Resíduo de Gesso proveniente das usinas de reciclagem. O fator limitante desta prática está associado à remoção do cartão agregado a maior parte deste resíduo de gesso, em grande parte o resíduo de gesso é composto de gesso acartonado, esse resíduo, com essas características devem ser triados e enviados a usinas específicas de Reciclagem de Gesso para remoção do cartão.

No Quadro 3 é apresentado um resumo dos Resíduos Reciclados da Construção Civil (RRCC), possíveis rotas alternativas, contribuições e limitações.

Quadro 3 - Quadro resumo sobre as possíveis rotas alternativas para os RRCC, abordando as principais contribuições e limitações.

RRCC	Potencial rota para utilização do RRCC na indústria do Cimento	Principais contribuições em termos de Sustentabilidade	Principais limitações do uso
Agregados reciclados	<i>a)</i> Matéria-prima alternativa; <i>b)</i> Material Cimentício Suplementar.	<i>a)</i> Reduz a exploração dos recursos naturais <i>b)</i> Reduz emissões de CO ₂ e indiretamente reduz a exploração dos recursos naturais.	Proporção de uso deve ser bem avaliada, para que não impacte na qualidade e perda de desempenho do cimento.
Resíduos de Gesso	Material Cimentício Suplementar (aditivo)	Reduz emissões de CO ₂ ; Reduz a exploração dos recursos naturais;	Necessidade de um processo específico de reciclagem de gesso para remoção de impurezas.
Resíduos de Madeira Plástico/Papelão Sólidos contaminados	Combustível Alternativo	Reduz a utilização de combustíveis fósseis; Redução de geração de passivos ambientais; Menor pegada de carbono que combustíveis fósseis.	Necessidade de um processo de trituração a fim de ter uma granulometria adequada para a queima em fornos de cimento.

FONTE: A autora (2024).

Esse quadro, exibe de forma resumida, a avaliação do potencial da indústria cimenteira, como alternativa sustentável para destinação final dos resíduos recicláveis provenientes de construção civil, as principais contribuições em termos de sustentabilidade e as principais limitações para uso.

As rotas propostas são soluções que visam a sustentabilidade e descarbonização na indústria do cimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa serve como ponto de partida para uma série de estudos sobre o uso de resíduos recicláveis na indústria cimenteira e parte como referencial para um futuro teste em escala industrial.

A metodologia utilizada para caracterização dos materiais confirmou a possibilidade do uso desses materiais dentro da cimenteira.

Nas análises e FRX para avaliação da composição química, foi possível observar que os agregados reciclados são ricos em SiO_2 e com baixo teor de CaO , possibilitando o uso em determinadas dosagens como matéria-prima alternativa, porém não como contribuinte para descarbonatação devido ao baixo teor de CaO . A contribuição em termos de sustentabilidade dessa rota é a redução da extração de recursos minerais e consequentemente de emissões de CO_2 na etapa de extração e diminuição do descarte inapropriado destes resíduos, aumentando a vida útil dos aterros.

Os agregados reciclados podem ter uma segunda alternativa de rota na indústria do cimento, que é a substituição do clínquer para fabricação do cimento, ou seja, o uso dos agregados no lugar do clínquer, é uma alternativa emergente, em vista da etapa de produção de clínquer dentro do processo de fabricação de cimento. Esta é a etapa que gera a maior contribuição em termos de CO_2 . Através dos resultados de Índice de Atividade Pozolânica foi possível constatar que esse material apresenta a especificação mínima, em média, para uso nesta rota de destinação.

Os resíduos de madeira, plástico, papel e sólidos contaminados apresentaram características combustíveis, adequados para o uso como combustível alternativos, através da tecnologia de coprocessamento em fornos de cimento, contribuindo com a redução do uso de combustíveis fósseis.

O Resíduo de Gesso oriundo das usinas de reciclagem de RCC apresentou teores de CaO e P_2O_5 de acordo com os limites especificados em normas e na literatura. Estatisticamente, o Resíduo de Gesso se semelha as características do Gesso sintéticos. Para viabilizar essa prática, o Resíduo de Gesso gerado na usina de reciclagem de RCC deve passar por um processo específico de reciclagem de gesso por conter em sua composição o cartão, sendo esta a limitação do seu uso provindo diretamente da Usina de Reciclagem de RCC.

A incorporação de agregados reciclados como substituto de matéria-prima e clínquer, gesso como aditivo para cimento, juntamente com o uso de madeira, papel e papelão como combustíveis alternativos na indústria de cimento, representa uma abordagem inovadora e

sustentável para a gestão de resíduos da construção civil. Essa prática não apenas contribui para a diminuição da pressão sobre os recursos naturais, mas também reduz significativamente a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários e contribui com os objetivos do setor para redução de emissões de CO₂.

Em termos de sustentabilidade, os benefícios são amplos e variados. Primeiro, a utilização de agregados reciclados diminui a necessidade de extração de matérias-primas virgens, preservando ecossistemas e reduzindo a degradação ambiental associada à mineração. Além disso, a adoção de combustíveis alternativos, provenientes de resíduos reciclados, resulta em menores emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o combate às mudanças climáticas.

Por fim, conclui-se que, a indústria do cimento como alternativa sustentável para destinação de resíduos provenientes da construção civil é uma proposta emergente, para redução de emissões de CO₂, neste estudo, para a destinação dos resíduos reciclados da construção civil, provenientes de usinas de reciclagem, não apenas representa uma solução viável para a indústria de cimento, mas também um compromisso com um futuro mais sustentável e responsável em relação ao meio ambiente. Com o fortalecimento de parcerias com usinas de reciclagem e a implementação de tecnologias adequadas, o setor pode maximizar esses benefícios, contribuindo para a construção de uma economia circular e mais resiliente, em conformidade com os ODS globais.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se ampliação do tema proposto através do estudo dos temas seguintes:

- Teste em escala laboratorial do IAP com cimento em diferentes concentrações de agregado reciclado, para se conhecer e recomendar proporção para substituição do clínquer que não impacte na qualidade e na perda de desempenho do cimento.
- Abranger esse estudo para os resíduos de construção civil em geral, não somente os gerados pelas usinas de reciclagem de RCC, para mapeamento gravimétrico e caso sejam com características diferenciadas, nova avaliação das possibilidades de uso dentro da indústria do cimento.

6 REFERÊNCIAS

ABBASS, K.; QASIM, M.Z.; SONG, H.; MURSHED, M.; MAHMOOD, H.; YOUNIS, I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. **Environmental Science and Pollution Research**. v.29, p.42539-42559, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-19718-6>. Acesso em: 30 ago. 2024.

ABRECON. Pesquisa Setorial Abrecon 2020. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. Disponível em: <http://www.abrecon.org.br> . Acesso em: 10 mai. 2024.
ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <http://www.Abrelpe.org.br> . Acesso em: 10 mai. 2024.

Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA).

Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. Patricia Pereira de Abreu Evangelista Dayana Bastos Costa Viviana Maria Zanta Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 23-40, jul./set. 2010. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

ÂNGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concreto**. 2005. 167f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18112005-155825/pt-br.php> >. Acesso em: 14 out. 2023.

ANTZARAS, A.N.; PAPALAS, T.; HERACLEOUS, E.; KOURIS, C. Techno-economic and environmental assessment of CO2 capture technologies in the cement industry. **Journal of Cleaner Production**. v. 428, 2023. Disponível em: [https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/](https://www.sciencedirect.com.ez48.periodicos.capes.gov.br/). Acesso em: 15 jan. 2024.

ASLAM, F.; SHAHAB, M, Z. Supplementary cementitious materials in blended cement concrete: Advancements in predicting compressive strength through machine learning. **Materials Today Communications**. v.30, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Guia básico de utilização do cimento Portland. 7. ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. A Indústria do Cimento e o do Brasil. Disponível em: < <https://abcp.org.br/> >. Acesso em: 15 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo: ABRELPE, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768-2**, Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 2 Ensaios de desempenho. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8952**, Coleta e preparação de amostras de materiais pozzolânicos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (nº200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio de peneira. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozzolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias primas – Análise química por espectrometria de raios-X. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915**: Agregados – Reciclagem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais Pozzolânicos –Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

BAGGIO, T.F.; POSSAN, E.; ANDRADE, J.J.O. Physical-chemical characterization of construction and demolition waste powder with thermomechanical activation for use as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**. v. 437, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 07 jul. 2024.

BAGGIO, TF; Possan, E; Andrade, JJD (2024). Physical-chemical characterization of construction and demolition waste powder with thermomechanical activation for use as supplementary cementitious material. *Construction and building materials*. v.76, 2024.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136907>. Acesso em: 20 mar. 2024.

BARBHUIYA, S.; DAS. B. B.; ADAK, D. Roadmap to a net-zero carbon cement sector: Strategies, innovations and policy imperatives. **Journal of Environmental Management**. v.359, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

BATTAGIN A. **Uma breve história do cimento Portland**. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Folheto coprocessamento, 2009. Disponível em: <https://abcp.org.br/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>. Acesso em: 19 mai. 2024.

BELATO, M. N., **Análise da Geração de Poluentes na Produção de Cimento Portland com o Coprocessamento de Resíduos Industriais**. 2013. 192 f. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/795> . Acesso em 08 jan. 2024.

BENACHIO, G. L. F.; FREITAS, M. C. D.; TAVARES, S.F. Circular Economy in the construction industry: A systematic literature review. **Journal of Clear Production**. v. 260, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 10 mai. 2024.

BENHELAL, E.; SHAMSAEI, E.; RASHID, M.I. Challenges against CO2 abatement strategies in cement industry: A review. **ScienceDirect**. v. 104, p.84-105, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em 20 mai. 2024.

BERNARDO, A. C. S. M. **Otimização Estocástica Multi-Objetivos na Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Resíduos e Adição de Mineralizadores**, Itajubá, 205 p. 2009. Tese (Doutorado em Conversão de Energia) Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1526>. Acesso em: 02 dez. 2023.

BILYK, M. **Gerenciamento de resíduos da construção civil no município de Guarapuava – PR: Percepção de gestores de obras**. 2021. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**. v.61, p. 178-189, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/8v5cGYtby3Xm3Snd6NjNdtQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 01 set. 2024.

BRUM, E.C.; PANDOLFO, A.; BERTICELLI, R.; KALIL, R.M.L.; PASQUALI, P.B. Economic, social and environmental aspects of the sustainability of a construction waste

recycling plant. **Gestão e Produção**. v. 28, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/gp/a/xzTp7CCC7MRvHbNns3rCTbt/?lang=en>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

BRYANT, E., 1997. *Climate Process and Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

BUIS, A., 2019. **The atmosphere: getting a handle on carbon dioxide**. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

CAMPOS, V. F. TQC – Controle da qualidade total: no estilo japonês. Minas Gerais: 5º ed., 1992.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: *Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro* [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 13-21. ISBN: 978-65-87108-26-1.

Cembureau, 2012. Cement for low-carbon Europe. **A review of the diverse solutions applied by the European cement industry through clinker substitution to reducing the carbon footprint of cement and concrete in Europe**. Brussels, Belgium. Disponível em: https://cembureau.eu/media/iffd23bq/cembureau_cementslowcarboneyurope.pdf .Acesso em: 10 jun. 2024.

Cembureau, 2013. *The Role of Cement in the 2050 Low Carbon Economy*. Brussels, Belgium.

Cembureau, 2020. *Cementing the European Green Deal. Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050*. Brussels, Belgium.

Cembureau, 2022. Thermal energy efficiency. <https://lowcarboneyconomy.cembureau>.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; DA SILVA, R. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CHATTERJEE, A. K. Chemistry and engineering of the clinkerization process — Incremental advances and lack of breakthroughs. *Cement and Concrete Research*, v. 41 (7), p. 624-641, 2011.

CIOCA, L, I; *et al.* Sustainable development model for the automotive industry. **Sustainability**. v. 11, n. 22, p. 6444, 2019.

Climate Change, 2007a. **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge Univ Press, pp. 211–272.

Climate Change, 2007b. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge Univ Press, pp. 747–785.

COELHO, A.; BRITO DE, J. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part II: environmental sensitivity analysis. **Waste Management**.

v. 33, p. 147–161, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 14 mai. 2024.

COELHO, A.; BRITO DE, J. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: Energy consumption and CO2 emissions. **Waste Management**. v.33, p. 1258-1267, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 14 mai. 2024.

COELHO, G.R.O. **Análise dos Parâmetros dos Combustíveis utilizados em fornos de uma empresa cimenteira**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO n.º 307**. julho, 2002. Disponível em: <<https://conama.mma.gov.br/>>. Acesso em: 08 de nov. 2023.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO n.º 431**. maio, 2011. Disponível em: <<https://conama.mma.gov.br/>>. Acesso em: 08 de nov. 2023.

COSTA, B.V.; ROSADO, L.P.; PENTEADO, C.S.G. Geração e caracterização dos resíduos da construção civil no Brasil - análise do estado da arte. **V Simpósio sobre Resíduos Sólidos (SIRS)**. Escola de Engenharia de São Carlos- USP, São Carlos-SP. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320907738>. Acesso em: 15 jan. 2024.

COSTA, F. N. **Valorização do resíduo de construção civil por meio de sua incorporação ao processo de clínquerização**. 2020. 197 f. Tese (doutorado). Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica.

COSTA, F. N.; RIBEIRO, D.V.; Caracterização de resíduo de construção civil (RCC) visando sua aplicação como matéria-prima alternativa na fabricação de cimento Portland. 2019. Congresso Brasileiro de Cerâmica.

COX, B.; MUTEL, C.L.; BAUER, C.; MENDONZA Beltran, A.; VAN Vuuren, D.P. Uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles. **Environ. Sci. Technol.** v.52, 4989–4995, 2018.

CSI. Global Cement Database on CO2 and Energy Information, WBCSD, Genebra. Disponível em: www.wbcsdcement.org/index.php/key-issues/climateprotection/gnr-database. Acesso em: jan. 2017.

CUADRADO, G. T.; TAHIR, F.; NURDIWATI, A.; ALMARSHOUD. A.; AL-GRAMDI, S.G. Current and potential materials for the low-carbon cement production: Life cycle assessment perspective. *Journal of Building Engineering*. v.96, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 12 set. 2024.

DA SILVA, SR; Andrade, JJD. A Review on the Effect of Mechanical Properties and Durability of Concrete with Construction and Demolition Waste (CDW) and Fly Ash in the Production of New Cement Concrete. **Sustainability**, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su14116740>. Acesso em: 20 mar. 2024.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. 1, p.261–309, 2011. Disponível em: https://scholar.google.com.br/citations?view_op=list_works&hl=pt-BR&hl=pt-BR&user=sUL_XOYAAAAJ&pagesize=80. Acesso em: 25 mar. 2024.

DE LENA, E.; SPINELLI, M.; GATTI, M.; SCACCANARROZZI R.; CAMPANARI, S.; CONSONNI, S.; CINTI, G.; ROMANO, M.C. Techno-economic analysis of calcium looping processes for low CO₂ emission cement plants. **Internacional Journal Greenhouse Gas Control**. v. 82, 244–260, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.01.005>. Acesso em: 20 mar. 2024.

DE LENA, E.; SPINELLI, M.; MARTINEZ, M.; GATTI, M.; SCACCANARROZZI R.; CINTI, A.; ROMANO, M.C. Process integration study of tail-end Ca-Looping process for CO₂ capture in cement plants. **Internacional Journal Greenhouse Gas Control**. v. 67, 71–92, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.10.005>. Acesso em: 20 mar. 2024.

DYMANIS, <https://dynamis-br.com/queimador-para-combustao-dynamis-cfd/>, acesso em Outubro de 2024.

EA, 2021. **Global energy review 2021**. Paris, France. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

ERBS, A. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado provenientes de chapas de gesso acartonado e gesso comum ao longo dos ciclos de reciclagem**. 2016. 127f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ERDOGAN, S. LHV and HHV prediction model using regression analysis with the help of bond energies for biodiesel. **Fuel**. v.301, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

FAVIER, A.; WOLF, C.; SCRIVENER, K.; HEBERT, G. 2018. A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry: Technology Assessment for Full Decarbonisation of the industry by 2050. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

FILHO, J.H.; Gobbi, A.; Pereira, E.; Tanaka, R. S.; Medeiros, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). *Revista Matéria*. v.22, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0207>. Acesso em outubro de 2024.

FYFFE, J.R; BRECKEL, A.C.; TOWNSEND, A.K.; WEBBER, M.E. Use of MRF residue as alternative fuel in cement Production. **Waste Management**. v. 47, 276-284, 2016.

GALBINES, C.T.; S. Tsimas. Use of construction and demolition waste as raw materials in cement clinker production. **China Particuology**. V. 4, No. 2, 83-85, 2006.

GALLEGO-SCHMID, A.; CHEN, H.M., SHARMINA, M., Mendoza, J.M.F. Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment. **Journal Clean**.

v.260, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 10 mai. 2024.

GCCA, 2019. **Get the numbers right database**. <https://gccassociation.org/gnr/>. Acesso em: 10 mai. 2024.

GCCA. **The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete**. 2021. Disponível em: <http://www.gccassociation.org>. Acesso em: 10 mai. 2024.

GEORGIOPOULOU, M.; LYBERATOS, G. Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: a case study. **Journal of Environmental Management**. v.216, p. 224-234, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

GIL, Antônio Carlos, 1946, **Como elaborar projetos de pesquisa**, 4. Ed. São Paulo: atlas 2002.

Global CCS Institute. Projects database. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/projects> Acesso em: ago. 2017.

GOKCE, A.; BEYAZ, C.; OZKAN, H. Influence of fines content on durability of slag cement concrete produced with limestone sand. **Construction and Building Materials**. V.111, p. 419-428, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

GOONAN, T.G. Recycled Aggregates – profitable resource conservation. **U. S. Geological Survey**. FS-181-99, 2p. 2000. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-0181-99/fs-0181-99so.pdf> . Acesso em: 15 dez. 2023.

HARRINGTON, J. **Business process improvement workbook: documentation, analysis, design and management of business process improvement**. New York: McGraw-Hill, 1997. HO, H; IZUMI, Y.; IIZUKA, A. A CO₂ removal technology based on mineral carbonation and the stability of product carbon storage in a cement matrix. **Environmental Technology & Innovation**. v.34, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 15 set. 2024.

IEA (International Energy Agency) statistics, 2019. **CO₂ emissions from fuel combustion highlights**. Disponível em: www.iea.org/CO2highlights. Acesso em 15 dez. 2023.

IEA and WBCSD (2009), Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050, OECD/IEA and WBCSD, Paris and Geneva. Disponível em: www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf. Acesso em 15 dez. 2023.

IEA and WBCSD (2018), Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA and WBCSD, Paris and Geneva. Disponível em: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>. Acesso em 15 dez. 2023.

J. Schoon et al. Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production. **Construction and Building Materials**, V. 36, p. 391 403, 2012.

KERMELI, L.; EDELENBOSCH, O.Y.; CRIJNS-GRAUS, W. VAN RUIJVEN, B.J.; MIMA, S.; VAN VUUREN, D.P.; WORRELL, E. The scope for better industry representation in long-term energy models: modeling the cement industry. **Appl. Energy**. v. 240, p. 964-985, 2019. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

KHAN, A.Z.; BALUNAINI, U.; COSTA, S.; NGUYEN, N.H.T. A review on sustainable use of recycled construction and demolition waste aggregates in pavement base and subbase layers. **Cleaner Materials**, v. 13, 2024. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 30 ago. 2024.

KIHARA, Yushiro. Contribuição ao Estudo de Pozolanas no Brasil. **Cerâmica**. V.28, 1982. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/2c6f4e58-13b0-4646-b14e-6d5a87bfb3d5/1615091.pdf>. Acesso em Outubro de 2024.

KUMBHAR, S.A.; GUPTA, A.; DESAI, D.B. Recycling and reuse of construction and demolition waste for sustainable development. **OIDA International Journal of Sustainable Development**. v. 06, p. 83-91, 2013. Disponível em: <https://oidaijsd.com/wp-content/uploads/2019/04/06-07-07.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2024.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 4rd ed. London: Arnold, 1998.

LIMA, Adriana Sampaio; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE)**. Fortaleza – Ceará. 2012.

LINDSEY, R.; DAHLMAN, L. Climate Change: Global Temperature. **News & Features**. v.13, n 11, 2021. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>. Acesso em: 10 de mai. 2024.

MAHMOUD, A.; SHUHAIMI, M.; ABDEL, S.M. Acombined process integration and fuel switching strategy for emissions reduction in chemical process plants. **Energy**. v. 34, p. 190–195, 2009.

MALI, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**. v.31, 2013. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X12471707>. Acesso em: 10 de mai. 2024.

MARMIER, A. Decarbonization Options for the Cement Industry. **Publications Office of the European Union**, Luxembourg, 2023. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC131246>. Acesso em 30 mai. 2024.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3ª Ed. Nova Iorque: Mcgraw Hill Professional, 2006. Disponível em: <https://worksaccounts.com/wp-content/uploads/2020/08/Concrete-Microstructure-Properties-and-Materials.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2024.

MILLER, S. A.; HABERT, G.; MYLES, R.J.; HARVEY, J.T. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. **One Earth**

Perspective. v.04, 2021. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em 15 ago. 2024.

NAGALLI, A. **Resíduos Sólidos na Construção Civil: quantificação e gerenciamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

NBRNM18:2012 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de Perda ao fogo.

NETO, J.A.; Costa, R.P.; Matos, P.R; Kirchheim, A.P. O efeito do teor de Fósforo (P_2O_5) no clínquer Portland na liberação de Calor durante a hidratação de Pastas de Cimento. Simpósio Brasileiro da Ciência do Cimento. 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/274342>. Acesso em: outubro de 2024.

NOOR-UI-Amin, 2012. Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases. *Constr. Build. Mater.* 34, 381–384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.022>.

OLIVEIRA, B. T. **Uso de resíduos de construção e demolição em argamassa para revestimento de alvenaria.** 2015, 68f. Projeto de Graduação (Engenharia Civil). Escola Politécnica do Rio de Janeiro.

OSMANI, M. **Construction Waste. In: Waste - A Handbook for Management.** Burlington, MA, USA: Academic Press, 2011. Chapter 15. p. 207 – 218.

PANOS, E.; KANNAN, R.; HIRSCHBERG, S.; KORBER, T. An assessment of energy system transformation pathway to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland. **Communications Earth & Environmental.** v.4 (1), 2023. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

PINHO, A.F; LEAL, F.; MONTENCCHI, J. A. B.; ALMEIDA, D. A. **Combinação entre técnica de fluxograma e mapa de processo no mapeamento de um processo produtivo.** XXVII Encontro Nacional de Engenharia de produção. 2007.

PINTO, T. P.; GONZÁLEZ, J. L. R. (Coord.) **Manejo e gestão de resíduos da construção civil.** 196 p.: il., v. 1, Brasília, DF: Caixa Econômica Federal, 2005. ISBN: 85-86836-04-4.

PISCIOTTA, M.; PILORGÉ, H.; DAVIDS, J.; PSARRAS, P. Opportunities for cement decarbonization. **Cleaner Engineering and Technology,** v. 15, 202. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 30 ago. 2024.

PITRE, V.; LA, H., BERGERSON, J.A. Impacts of alternative fuel combustion in cement manufacturing: Life cycle greenhouse gas, biogenic carbon, and criteria air contaminant emissions. **Journal of Cleaner Production.** v. 475, 2024. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/> Acesso em: 18 set. 2024.

POTGIETER, J.H.; POTGIETER, S.S.; MCCRIANDLE, R.I. A comparison of the performance of various synthetic gypsums in plant trials during the manufacturing of OPC clinker. *Cement and Concrete Research.* v.34, p. 2245-2250, 2004. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais Marco Ferretti* Revista CPC, São Paulo, n. 7, pp. 74-98, nov. 2008.

PUERTAS, F. et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. *Cement and Concrete Composites*. V. 30, 798–805, 2008.

PUERTAS, F. et al. Resíduos cerâmicos para suposible uso como materia prima em la fabricación de clínker de cemento Portland: caracterización y activación alcalina. **Materiales de Construcción**. V. 56, 281, 73-84, 2006.

RAMASAMY, V.; KANNAN, R.; MURALIDHARAN, G.; SIDHARTHAN, R.; VEERASAMY, G.; VENKATESH, S.; AMIRTHARAJAN, R. A comprehensive review on Advanced Process Control of cement kiln process with the focus on MPC tuning strategies. *Journal of Process Control*, v.12, p 82-102, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 30 ago. 2024.

RAMOS, M. Estudo da Formação, Emissão e Dispersão de Poluentes na Atmosfera Originários do Coprocessamento de Resíduos em Fábricas de Cimento. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Itajubá, 2015.

REGUEIRA, L.N.; AÑON, J.A.R.; CASTIÑEIRAS, J.P.; DIZ, A.V.; SANTOVEÑA, N.M. Determination of calorific values of forest waste biomass by static bomb calorimetry. *Thermochimica Acta*. v. 371, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em 15 ago. 2024.

RESOLUÇÃO CEMA nº 76, de 30 de Novembro de 2009.

RESOLUÇÃO SIMA nº145, de 22 de Dezembro de 2021.

RESOLUÇÃO SIMA nº47, de 06 de Agosto de 2020.

RISSMAN, J.; BATAILLE, C.; MASANET, E.; ADEN, N.; MARROW III, W. R.; ZHOU, N.; et al., 2020. Technologies and policies to decarbonize global industry: review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*. v.266, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

ROCHA, J.H.A.; FILHO, R.D.T.; CHILENO, N.G.C. Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review. **Materials Today: Proceedings**. v.57, p. 436-439, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

SAJEDI, Fathollah; RAZAK, Hashim Abdul. Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 2036-2045, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

SANTOS, E. **Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) em estrutura de solos reforçados**. 2007. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTOS, E.C.G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RDC-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo.

SCHINDLER, A.; DUKE, A.; GALLOWAY, W. Co-processing of end-of-life wind turbine blades in portland cement production. **Waste Management**, v.182, p. 207-214, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X24002496>. Acesso em: 02 set. 2024.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**. v.114, p. 2-26, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Alternativas Para a Destinação de Resíduos da Construção Civil**. 2ª Edição. Civil. 2ª Edição. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2008. 84 p.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2020. Disponível em: Acesso em 31 jan. 2024.

SNIC. **Relatório Anual**. Sindicato Nacional da Indústria do cimento, 2022. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_an.ual_2022.pdf. Acesso em: 20 mar. 2024.

SWARNA, S.K., T.P., T., SIVA, S.K. Implementing construction waste management in India: an extended theory of planned behaviour approach. **Environmental Technololy & Innovation**. v. 27, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102401> Acesso em: 15 mai. 2024.

THIVES, L. P.; GHISI, E.; JÚNIOR, J.J.T. An outlook on the management of construction and demolition waste. **Cleaner Materials**. v.6, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 10 mai. 2024.

THOMAZ, E. C.S. **Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção- Cimentos e Concretos**. Instituto Militar de Engenharia. Disponível em: [Prof. Eduardo Thomaz \(eb.br\)](http://Prof.EduardoThomaz(eb.br)). Acesso em: 25 mai. 2024.

TRUMER, A.; LUDWING, H.M.; SCHELLHORN, M.; DIEDEL, R. Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete. **Applied Clay Science**. v. 18, p. 36-42, 2019. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

ULUBEYLI, S.; KAZAZ, A.; ARSLAN, V. Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issue. **ScienceDirect**. v.172, p. 1190-1197, 2017. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 14 mai. 2024.

VIEIRA, G.L.; DAL MOLIN, D.C.C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção civil. **Ambiente Construído**. v 04, p. 47-63, 2004. Disponível em:

<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3575/1979>. Acesso em: 15 dez. 2023.

Vieira, L.B.P.; Figueiredo, A.D.; Cirilo, F.; Verdiani, V.B; Lima, L.M. Analysis of CO2 emissions and waste elimination capacity of different recycling strategies applied in ready-mixed concrete plants. *IBRACON Structures and Materials Journal*. V. 15, 2022.

WANG, D.; TANG, Y.; HE, J.; YANG, F.; ROBINSON, D. Generalized models to predict the lower heating value (LHV) of municipal solid waste (MSW). **Energy**. v.216, 2021. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 01 set. 2024.

WANG, L.; WU, X.; GAO, X.; WU, Y.; CEN, K. A method for in-situ measurement of calorific value of coal: a numerical study. **Thermochimica Acta**. v.703, 2021. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2024.