



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ROBERTA DE SOUZA DA PAIXÃO

**IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS NA FABRICAÇÃO DO
CIMENTO PORTLAND E USO DE RESÍDUOS COMO ALTERNATIVA
PARA MITIGÁ-LOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA**

Cruz das Almas

2022

ROBERTA DE SOUZA DA PAIXÃO

**IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS NA FABRICAÇÃO DO
CIMENTO PORTLAND E USO DE RESÍDUOS COMO ALTERNATIVA
PARA MITIGÁ-LOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal do
Recôncavo da Bahia como requisito básico
para a conclusão do curso de Engenharia
Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Fernanda
Nepomuceno Costa

Cruz das Almas

2022

Paixão, Roberta de Souza

Impactos ambientais gerados na fabricação do cimento Portland e uso de resíduos como alternativa para mitigá-los: uma análise bibliométrica, UFRB, Cruz das Almas - BA. / Roberta de Souza da Paixão. - Cruz das Almas, 2022.

62 p.: 30 cm

Orientador(a): Fernanda Nepomuceno Costa.
TCC (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2022.

1. Clínquer Portland. 2. Indústrias cimenteiras. 3. Soluções sustentáveis. 4. Subprodutos. I. Roberta, Fernanda. II. Impactos ambientais gerados na fabricação do cimento Portland e uso de resíduos como alternativa para mitigá-los: uma análise bibliométrica.

DEDICATÓRIA

A Deus, por nunca desistir de mim, aos meus pais, por tudo que fizeram para que eu chegasse até aqui, as minhas irmãs, e a minha orientadora, por todo incentivo e compreensão.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DE

ROBERTA DE SOUZA DA PAIXÃO

APRESENTADA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA, EM 17 DE NOVEMBRO
DE 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Profª Dra FERNANDA NEPOMUCENO COSTA - Orientadora
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
CETEC - UFRB

Engº M.Sc VINÍCIUS ALMEIDA COELHO
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Profº Dr. TIAGO ASSUNÇÃO SANTOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
Centro Universitário Maria Milza - UNIMAM

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes.

Marthin Luther King

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, porque sem ele eu sei que não teria chegado até aqui. Agradeço ao meu pai, José Carlos, por sempre me incentivar e acreditar que eu era capaz; a minha mãe, Maria da Paixão, por nunca ter aberto mão da gente e sempre nos motivar e por ter sido forte na luta contra o câncer. As minhas irmãs, Camila, Daniela e Manoela, minhas companheiras e cúmplices de toda vida. Gratidão a Fernanda, minha orientadora, pelos incentivos, compreensão, conselhos dados e por ter me acompanhado durante todos esses meses de orientação. Um agradecimento especial as minhas amigas Larissa e Valéria; a Luísa, uma amiga legal que eu conheci. Aos meus tios(as), em especial Vitoriana, Maria, Benedita, Valdomiro e João, por todo apoio e por sempre acreditarem que eu conseguiria. Também, as minhas primas e primos que me ajudaram muito.

Agradeço, também, a todos os amigos(as) que a UFRB me deu e que tornaram a minha jornada na universidade menos pesada, pessoas que me incentivaram e que, independente do tempo sem nos vermos e falarmos, sempre estávamos disponíveis um para os outros, amigos que levarei para a vida. Agradeço aos meus colegas do Grupo de Pesquisa e de TCC por toda colaboração e amizade, com destaque para Ademilton e Medson. E a todos os professores que com suas sábias palavras nos ensinaram muito.

Serei sempre grata também ao pessoal da FEM Construções, local onde estagiei e que conquistei muitas amizades; foi um período muito importante para minha formação! Agradeço, principalmente, a Elaine, Fred, Júlio, Flávio e Cristóvão.

Jamais poderia deixar de agradecer a PROP AE pelo auxílio financeiro que me permitiu continuar na Universidade e aproveitei para reforçar a importância das cotas em Instituições públicas de ensino superior. Agradeço também ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do CETEC/UFRB e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo apoio financeiro para realização da pesquisa a qual é fruto deste trabalho.

Enfim, muito obrigada a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta conquista, é como diz Marianna Moreno: “A vida não é fácil, mas ter as pessoas certas ao nosso lado faz tudo ser melhor”. GRATIDÃO!

IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E USO DE RESÍDUOS COMO ALTERNATIVA PARA MITIGÁ-LOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

RESUMO

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, considerado o material mais consumido no ramo da construção civil, o qual é obtido através da moagem do clínquer Portland e seu modo de produção acarreta diversos danos socioambientais. Com isso, o objetivo dessa pesquisa é quantificar estudos sobre o tema, demonstrando a partir de dados e indicadores de publicações nacionais e internacionais a importância dos resíduos de outros setores industriais na fabricação de cimentos como alternativa para mitigar os impactos ocasionados durante o seu processo fabril. A metodologia empregada consistiu de duas principais etapas: a primeira consta de um levantamento de publicações nacionais e internacionais, entre 2011 e 2021, através da base de dados do Scopus. Foram inseridas no campo de busca palavras-chave as quais eram voltadas para o objeto de estudo desta pesquisa, sendo que a consulta se delimitou ao “título, resumo e palavras-chave” dos trabalhos. Além disso, o tipo de documento era apenas artigos e em fase final de publicação. A segunda e última etapa consta de uma pesquisa refinada, onde foi realizada uma análise bibliométrica acerca dos estudos. Com base nos resultados, tem-se que na última década houve um aumento no número de trabalhos publicados a respeito do tema e que países como o Brasil, Espanha, China e Índia são os que mais publicaram artigos que retratam sobre o uso de resíduos na produção de cimento. Dentre os subprodutos pesquisados pelos autores cita-se: resíduos da construção civil (RCC), de vidro, de cerâmica vermelha, de Estação de Tratamento de Água (ETA), de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), provenientes da agroindústria, da mineração, cinzas (de bagaço de cana de açúcar, de casca de arroz, etc.), da indústria de papel e celulose, dentre outros. Por fim, com a alta demanda por cimento Portland, a tendência é que haja um aumento no número de estudos voltados para soluções sustentáveis no processo fabril pelas indústrias cimenteiras, entretanto, a quantidade de resíduos disponíveis ainda não é suficiente para atender o alto consumo deste material.

Palavras-chave: *Clínquer Portland; Indústrias cimenteiras; Soluções sustentáveis e Subprodutos.*

ENVIRONMENTAL IMPACTS GENERATED IN THE MANUFACTURE OF PORTLAND CEMENT AND USE OF WASTE AS ALTERNATIVE TO MITIGATE THEM: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

ABSTRACT

Portland cement is a hydraulic binder, considered the most consumed material in the field of civil construction, which is obtained through the grinding of Portland clinker and its production method causes several socio-environmental damages. With this, the objective of this research is to quantify studies on the subject, demonstrating from data and indicators of national and international publications the importance of waste from other industrial sectors in the manufacture of cement as an alternative to mitigate the impacts caused during its manufacturing process. . The methodology employed consisted of two main stages: the first consists of a survey of national and international publications, between 2011 and 2021, through the Scopus database. Keywords that were related to the object of study of this research were inserted in the search field, and the query was limited to the “title, abstract and keywords” of the works. In addition, the document type was articles only and in the final stages of publication. The second and last stage consists of a refined research, where a bibliometric analysis of the studies was carried out. Based on the results, it can be seen that in the last decade there has been an increase in the number of works published on the subject and that countries such as Brazil, Spain, China and India are the ones that most published articles that portray the use of waste in cement production. Among the by-products researched by the authors, the following can be cited: waste from civil construction (RCC), glass, red ceramics, Water Treatment Station (ETA), Sewage Treatment Station (ETE), from agroindustry, mining, ashes (from sugarcane bagasse, rice husks, etc.), from the pulp and paper industry, among others. Finally, with the high demand for Portland cement, the tendency is for an increase in the number of studies aimed at sustainable solutions in the manufacturing process by the cement industries, however, the amount of waste available is still not enough to meet the high consumption of this material.

Keywords: *Portland clinker; Cement industries; Sustainable solutions and By-products.*

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 – Micrografia mostrando os cristais de alita.....	5
Figura 2 – Micrografia de uma amostra de clínquer Portland.....	7
Figura 3 – Forno rotativo usado na calcinação durante o processo de fabricação do clínquer Portland.....	10
Figura 4 – Esquema das etapas de fabricação do cimento Portland.....	11
Figura 5 – Diferentes indústrias que podem ser provedoras de resíduos para o coprocessamento.....	18
Figura 6 – Diagrama das principais etapas de desenvolvimento da pesquisa.....	22
Figura 7 – Quantidade de artigos publicados no Scopus baseado nos termos “Portland cement” AND “Waste” OR “Alternatives fuels”, entre 2011 e 2021.....	25
Figura 8 – Comparação entre o total de artigos gerados e os que tratam diretamente do “uso de resíduos na fabricação de cimentos”, entre 2011 e 2021.....	26
Figura 9 – Diagrama de palavras-chave de acordo com o número de ocorrência dos artigos publicados.....	27
Figura 10 – Diagrama de coautoria baseado em publicações sobre “o uso de resíduos na fabricação de cimentos”.....	30
Figura 11 – <i>Ranking</i> dos dez 10 países com maior índice de publicações sobre “o uso de resíduos na produção de cimento”, entre 2011 e 2021.....	31
Figura 12 – Diagrama de colaboração do país baseado na coautoria de artigos sobre “o uso de resíduos na produção de cimento”, entre 2011 e 2021.....	31
Figura 13 – Principais resíduos utilizados nas pesquisas pelos autores dos artigos.....	32

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 - Produção e consumo de cimento por região do Brasil, em 2021.	12
Tabela 2 – Resíduos que podem ser utilizados no coprocessamento, em fábricas de cimento.....	19
Tabela 3 - Palavras-chave utilizadas no campo de busca da plataforma Scopus. ...	24
Tabela 4 – <i>Ranking</i> das dez palavras-chave de maior ocorrência nos trabalhos de acordo com as palavras-chave “ <i>Portland cement</i> ” AND “ <i>Waste</i> ” OR “ <i>Alternatives fuels</i> ” (Tabela 3).....	28
Tabela 5 – Os 10 principais autores com base em artigos publicados e citações. ...	29
Tabela 6 – Análise do trabalho de Ruviano <i>et al.</i> (2021).	34
Tabela 7 – Análise do trabalho de Her <i>et al.</i> (2021).	36
Tabela 8 – Análise do trabalho de Costa e Ribeiro (2020).....	37
Tabela 9 – Análise do trabalho de Mariani <i>et al.</i> (2019).....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BBC	<i>British Broadcasting Corporation</i>
CANACEM	<i>Cámara Nacional Del Cemento</i> (Câmara Nacional do Cimento)
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
CSI	<i>Cement Sustainability Initiative</i> (Iniciativa pela Sustentabilidade do Cimento)
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases do efeito estufa
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IES	Instituição de Ensino Superior
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i> (Associação Internacional de Resíduos Sólidos)
MCS	Material Cimentício Suplementar
RCC	Resíduos da Construção Civil
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 CIMENTO PORTLAND	4
2.1.1 Definição.....	4
2.1.2 Principais matérias-primas	4
2.1.3 Processo de fabricação	8
2.2 INDÚSTRIAS DE CIMENTO NO BRASIL.....	11
2.3 PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	13
2.3.1 Emissão de gases poluentes.....	13
2.3.2 Exploração de jazidas naturais.....	13
2.3.3 Lançamento de materiais particulados.....	14
2.3.4 Consumo energético.....	14
2.4 ALTERNATIVAS DE MITIGAÇÃO	15
2.5 USO DE RESÍDUOS NAS INDÚSTRIAS CIMENTEIRAS	18
2.5.1 Uso de resíduos pelas indústrias cimenteiras como alternativas de mitigação.....	18
3 METODOLOGIA	21
3.1 ESTRATÉGIA DA PESQUISA.....	21
3.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	22

Etapa 1: Levantamento de dados.....	22
Etapa 2: Análise bibliométrica dos dados	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
4.1 TERMOS INSERIDOS NO CAMPO DE BUSCA DO SCOPUS	24
4.2 PALAVRAS-CHAVE DE MAIOR OCORRÊNCIA.....	26
4.3 PRODUTIVIDADE DOS AUTORES	28
4.4 PAÍSES COM MAIOR PRODUTIVIDADE CIENTÍFICA SOBRE O TEMA	30
4.5 RESÍDUOS ESTUDADOS PELOS AUTORES	32
4.6 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES SOBRE O TEMA.....	33
4.6.1 Resíduos utilizados como MCS	33
4.6.2 Resíduos utilizados como matéria-prima alternativa	35
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
7 REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O cimento é um dos produtos mais utilizados no mundo e sua demanda vem aumentando cada vez mais. Segundo Abrão (2019), a produção de cimento deverá crescer nos próximos 40 anos e esta crescente produção será responsável pela emissão de um grande volume de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera.

A utilização do cimento pode ser considerada como uma espécie de marca da civilização atual, pois desde o início do século XX tem sido a solução econômica e em grande escala tanto para o problema de moradia e assentamentos humanos, como para a construção de grandes obras da engenharia moderna. Entretanto, a sua produção gera impactos tanto ao meio ambiente quanto a saúde humana, em quase todas as fases de fabricação (MAURY e BLUMENSCHHEIN, 2012).

O cimento Portland foi inventado por Joseph Aspdin, um construtor inglês que em 1824 queimou conjuntamente pedras calcárias e argila e, a seguir, moeu-as, transformando-as num pó fino. Feito isso, percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, era tão dura quanto às pedras empregadas nas construções daquela época. Aspdin nesse mesmo ano patenteou como “Cimento Portland” devido ao fato deste apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (ISAIA, 2011). Após a descoberta do cimento, diversos experimentos foram realizados e a partir daí foram surgindo os diferentes tipos existentes hoje no mercado.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2022), a indústria cimenteira, globalmente, responde por cerca de 7% de todo o CO₂ equivalente emitido pela ação humana. Já no Brasil, a participação do setor nas emissões nacionais é de 2,3%, cerca de um terço da média mundial. Ainda de acordo com a ABCP (2022), o esforço de redução das emissões no setor cimentício se deve a três fatores, principalmente: uso de matérias-primas alternativas ao clínquer, chamadas de adições, como escórias siderúrgicas, cinzas de termoelétricas e pó de calcário; uso de combustíveis alternativos, como biomassas e resíduos; e medidas de eficiência energética, ao investir em linhas e equipamentos de menor consumo térmico e elétrico. Essas medidas

foram responsáveis pela redução de 18% na intensidade de carbono do setor de 1990 a 2019, enquanto a produção de cimento cresceu cerca de 220% (ABCP, 2022).

É válido citar a Conferência das Partes (COP), a qual é um encontro anual em que se reúne quase 200 países com objetivo de discutir as mudanças climáticas e como os países pretendem combatê-la (BBC, 2021). Em 2021 ocorreu a vigésima sexta edição da COP, onde os principais pontos abordados foram garantir que o mundo reduza as emissões de carbono até 2030 e manter a meta de não ultrapassar o aumento de temperatura global em 1,5°C; mobilização de finanças, que consiste basicamente em países desenvolvidos canalizarem ao menos US\$100 bilhões por ano para as nações em desenvolvimento investirem na redução de gases do efeito estufa (GEE); realização de trabalho em conjunto, etc. Dentre esses pontos abordados, a principal meta é fazer com que os países se comprometam a zerar suas emissões de carbono até meados do século (BBC, 2021). Ainda, de acordo com a BBC (2021), o maior obstáculo para um acordo eficaz são as relações entre os principais participantes internacionais, com destaque para países como a China e os Estados Unidos que respondem por quase 40% das atuais emissões globais de GEE.

Devido ao aumento de impactos ambientais causados durante o processo de fabricação do cimento Portland e ao maior interesse em pesquisas voltadas para mitigação desses impactos, esta pesquisa foi proposta com o intuito de quantificar esses estudos, demonstrando a importância do tema, bem como fazer o levantamento dos impactos ambientais gerados e a utilização de subprodutos como alternativas para mitigá-los.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar a quantificação de estudos realizados relacionados ao uso de resíduos de diferentes procedências como alternativas de mitigação dos impactos ambientais ocasionados durante o processo de fabricação do cimento Portland, através de análise bibliométrica.

Para o cumprimento do objetivo geral, delimitam-se os seguintes objetivos específicos:

- Demonstrar, a partir de dados e indicadores de publicações nacionais e internacionais, a importância dos resíduos tanto como MCS quanto como matéria-prima do clínquer Portland, na fabricação de cimentos como alternativa para mitigar os impactos proporcionados pela indústria cimenteira;
- Realizar o levantamento dos principais impactos ambientais ocasionados pela produção do cimento, levando em consideração as emissões de CO₂, exploração de jazidas minerais, e a alta demanda pelo consumo de energia;
- Realizar uma análise bibliométrica acerca de trabalhos nacionais e internacionais publicados no Scopus sobre o tema.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho foi dividida em seis capítulos que serão sintetizados a seguir:

O capítulo 1 trata da Introdução, onde são descritos a importância, os objetivos, a justificativa e estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, a qual aborda sobre o cimento Portland, seu modo de produção, suas principais matérias-primas, formas de adições minerais; bem como os impactos gerados pela sua fabricação e as alternativas para mitigá-las. Além disso, tratará do uso de resíduos como matéria-prima alternativa em indústrias cimenteiras.

O capítulo 3 consiste na metodologia empregada para o desenvolvimento de cada uma das etapas deste trabalho, com o intuito de alcançar os objetivos traçados. Tratará também sobre o estudo bibliométrico, técnica utilizada para obtenção e análise dos resultados.

O capítulo 4 discorre os resultados obtidos com base nos dados coletados, e suas respectivas discussões, enquanto no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais.

O capítulo 6 aponta sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CIMENTO PORTLAND

2.1.1 Definição

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento Portland é definido como um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, do qual se adiciona durante a fabricação a quantidade necessária de uma ou mais formas de adições minerais e sulfato de cálcio. É considerado um material ligante/aglomerante, pois tem a propriedade de unir outros materiais; e hidráulico, pois reage ao se misturar com água.

2.1.2 Principais matérias-primas

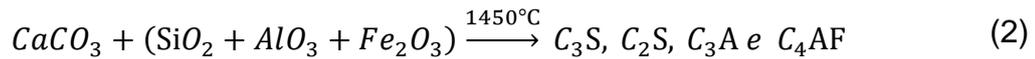
As principais matérias-primas que constituem o cimento são o clínquer Portland e as adições. Todos os tipos de cimentos possuem o clínquer, por isso, este é considerado o seu principal componente, e as adições são responsáveis por distinguir os variados tipos existentes.

2.1.2.1 Clínquer Portland

O clínquer tem como matérias-primas mais comuns o calcário (75 a 80%) - CaCO_3 e os materiais argilosos (20 a 25%) a base de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , os quais são obtidos de jazidas, que na maioria dos casos ficam próximas as fábricas (ISAIA, 2011). Após calcinação a 1450°C , as moléculas destes materiais, principalmente do calcário, se quebram liberando uma grande quantidade de CO_2 (a 900°C) para o meio ambiente (QUEIROZ, 2018), como apresentado na equação 1:



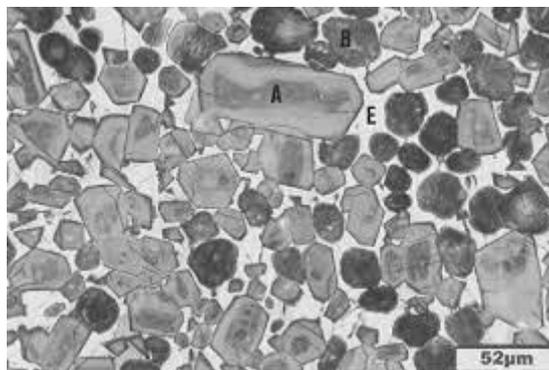
A seguir, a equação 2 mostra os componentes formados durante o processo de clinquerização (ISAIA, 2011).



Microscopicamente, o clínquer de cimento Portland após queima contém quatro minerais principais (COSTA, 2020), são eles:

- Alita ($3CaOSiO_2$): é considerado o principal constituinte do clínquer e corresponde cerca de 50 a 70% deste, em massa; é formado a partir da reação por difusão iônica entre as partes sólidas dos cristais de cal (CaO) que não reagiram, ou seja, CaO livre. Exerce um papel importante no endurecimento e resistência mecânica da pasta de cimento endurecida nas primeiras idades, isto é, até 28 dias (RODRIGUES, 2018). A Figura 1 apresentada a seguir mostra uma micrografia dos cristais de alita com feições típicas de condições normais de queimabilidade (ISAIA, 2011), esta foi obtida por meio de microscopia óptica de luz refletida, que é um método muito utilizado no Brasil como técnica complementar no controle de fabricação do cimento Portland. A alita pode ser abreviada como C_3S .

Figura 1 – Micrografia mostrando os cristais de alita.



Fonte: ISAIA, 2011.

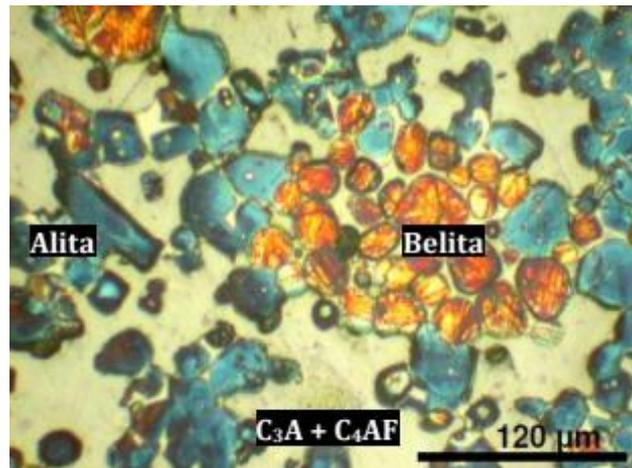
- Belita ($2CaOSiO_2$): constitui de 15 a 30% do clínquer e desempenha um papel muito importante para as resistências finais (acima de 28 dias) da pasta de cimento endurecida, por apresentar taxa de hidratação mais lenta (RODRIGUES, 2018). Por possuírem vazios intersticiais menores, esta é considerada menos reativa que a alita e pode ser abreviada como C_2S .

- Aluminato tricálcico ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$): faz parte da fase intersticial do clínquer Portland, preenchendo os vazios entre os cristais de alita e belita. O aluminato é responsável pela pega do cimento, em decorrência de ser o componente mais reativo do clínquer, e constitui cerca de 5 a 10% em massa (RODRIGUES, 2018). O aluminato tricálcico pode ser abreviado como C_3A .

- Ferro-aluminato tetracálcico ($4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$): assim como os aluminatos, este faz parte da fase intersticial do clínquer Portland, preenchendo os vazios entre os cristais de alita e belita. O ferro-aluminato (C_4AF) exerce um papel importante na resistência química do cimento, com destaque ao ataque de sulfatos às estruturas de concreto (ISAIA, 2011), além disso, é responsável pela cor do cimento, e constitui de 3 a 8% do clínquer (RODRIGUES, 2018). Pode ser abreviada como C_4AF .

A Figura 2 compreende uma amostra de clínquer Portland, que foi obtida por meio de microscópio óptico de luz refletida; observando-a pode-se perceber que a alita é o mineral mais presente no clínquer, sua morfologia mais frequente é em forma de cristais tabulares, hexagonais em seções transversais (ISAIA, 2011). A belita, por sua vez, possui uma estrutura mais estável que a alita, contribuindo menos com o calor de hidratação; além disso, seu formato desejável e predominante é em cristais arredondados de seções transversais regulares (ISAIA, 2011). Os aluminatos (C_3A) e ferro-aluminatos (C_4AF) são os compostos fundentes que atuam preenchendo os espaços intersticiais deixados pela alita e belita durante o processo de clinquerização (RODRIGUES, 2018).

Figura 2 – Micrografia de uma amostra de clínquer Portland.



Fonte: Gobbo, 2009.

Em pequenas quantidades ainda estão presentes no clínquer a cal livre, o periclásio e sulfetos e sulfatos alcalinos.

- Cal livre: a cal livre é formada pela descarbonatação do CaCO_3 da farinha e serve como parâmetro de controle das condições de fabricação do clínquer, em teores maiores que 3% esta já se torna indesejável. Vale-se ressaltar que segundo literaturas vigentes a cal livre pode afetar negativamente a resistência mecânica, aumentar o calor de hidratação e ocasionar problemas de expansibilidade no cimento.

- Periclásio (ou óxido de magnésio): no cimento Portland é derivado de calcários magnesianos usados como matéria-prima para a produção do clínquer e em pequenas quantidades melhora a queimabilidade do mesmo (ISAIA, 2011), este surge quando o teor de magnésio é superior a 2%, em massa (COSTA, 2020).

- Sulfatos alcalinos: A formação dos compostos alcalinos no clínquer é decorrente do ciclo de gases dentro do forno durante o seu processo de fabricação; estes são facilmente solubilizáveis na água de amassamento enquanto os álcalis contidos nos aluminatos e nos silicatos serão liberados mais lentamente durante o processo de hidratação (ISAIA, 2011). Além disso, estes podem causar problemas de durabilidade nos fornos.

2.1.2.2 Adições

Para a obtenção do cimento faz-se a moagem do clínquer com diversas adições dentre estas tem-se: a gipsita, a escória de alto forno, as pozolanas, as cinzas volantes, e etc. A seguir, apresentam-se algumas definições das principais adições utilizadas nos cimentos Portland no Brasil.

- Escória granulada de alto-forno: é um subproduto da fabricação de ferro gusa nos altos-fornos, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, na forma vítrea, constituído em sua maior parte de silicatos e alumino-silicatos de cálcio (NBR 16697 ABNT, 2018).

- Materiais Pozolânicos: segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), são os materiais silicosos ou sílico-aluminosos que não possuem atividade hidráulica, mais que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. Estes podem ser naturais, que são aqueles materiais de origem vulcânica ou sedimentar, como as cinzas volantes; ou artificiais, são os provenientes de tratamento térmico ou de subprodutos industriais com atividade pozolânica, a exemplo das cinzas silicosas de resíduos de alguns vegetais e de rejeitos de carvão mineral, as argilas calcinadas, etc. (RODRIGUES, 2018).

- Gipsita ou sulfato de cálcio: pode ser encontrada em grandes jazidas sedimentares, também chamados de evaporitos, sob a forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4) (LIMA, 2011), a proporção adicionada no cimento é entre 2 e 5%, e varia em função do teor e da reatividade do C_3A do clínquer, bem como da presença de álcalis, além da finura do cimento (ISAIA, 2011). Este é adicionado na moagem final do cimento e está presente em todos os seus tipos, tendo por finalidade regular o tempo de pega.

2.1.3 Processo de fabricação

A seguir, estão listadas as etapas de fabricação do cimento Portland.

1) Extração de matérias-primas: o calcário e a argila são extraídos das jazidas, as quais geralmente ficam localizadas próximas as fábricas de cimento. Nessa etapa, além da elevada exploração de jazidas não renováveis, ainda há um gasto energético para o beneficiamento das matérias-primas;

2) Britagem: com o objetivo de reduzir a granulometria, as matérias-primas são submetidas ao processo de britagem; em seguida são transportadas para as fábricas, onde são armazenadas em silos (QUEIROZ, 2018). Esse processo consome bastante energia, logo contribui para o aumento dos gastos energéticos na fabricação cimentícia;

3) Pré-homogeneização: procura garantir uma composição definida ao longo de todo o depósito para o material a ser enviado ao moinho. Mediante o conhecimento prévio da composição físico-química e mineralógica das matérias-primas determina-se a quantidade de cada constituinte (LUIZ, 2016);

4) Moagem da mistura crua e pré-aquecimento: é a fase onde são moídas as matérias-primas; resultando na “farinha”, que antes de entrar no forno é levada para uma torre de ciclones, onde é pré-aquecida (RODRIGUES, 2018);

5) Produção do clínquer no forno rotativo: essa é a principal etapa do processo de fabricação do cimento Portland; e a que emite uma grande quantidade de CO₂ para a atmosfera, segundo Abrão (2019) são liberados em média 866 kg de CO₂/tonelada de cimento produzido. Nessa fase a farinha pré-aquecida e parcialmente calcinada entra pela extremidade superior do forno em rotação contínua e é transportada para a parte inferior a uma velocidade controlada pela inclinação e velocidade de rotação do forno (NÓBREGA, 2009). Um combustível é injetado pela extremidade inferior da zona de calcinação, onde uma temperatura de cerca de 1450°C é atingida e as reações químicas envolvendo a formação dos compostos do cimento Portland são completadas, e os clínqueres são formados (NÓBREGA, 2009). Só ressaltando que é na combustão que ocorre a reação-chave do processo de fabricação de cimento, onde se transforma as matérias-primas em clínquer (COPROCESSAMENTO, 2022). Vale-se lembrar de que o forno rotativo consiste de um cilindro de aço inclinado revestido com tijolos refratários (NÓBREGA, 2009).

A Figura 3 ilustra um forno rotativo de uma fábrica de cimento Portland. Durante a queima das matérias-primas são utilizados nos fornos combustíveis fósseis que emitem gases poluentes para a atmosfera (CANACEM, 2022).

Figura 3 – Forno rotativo usado na calcinação durante o processo de fabricação do clínquer Portland.



Fonte: CANACEM, 2022.

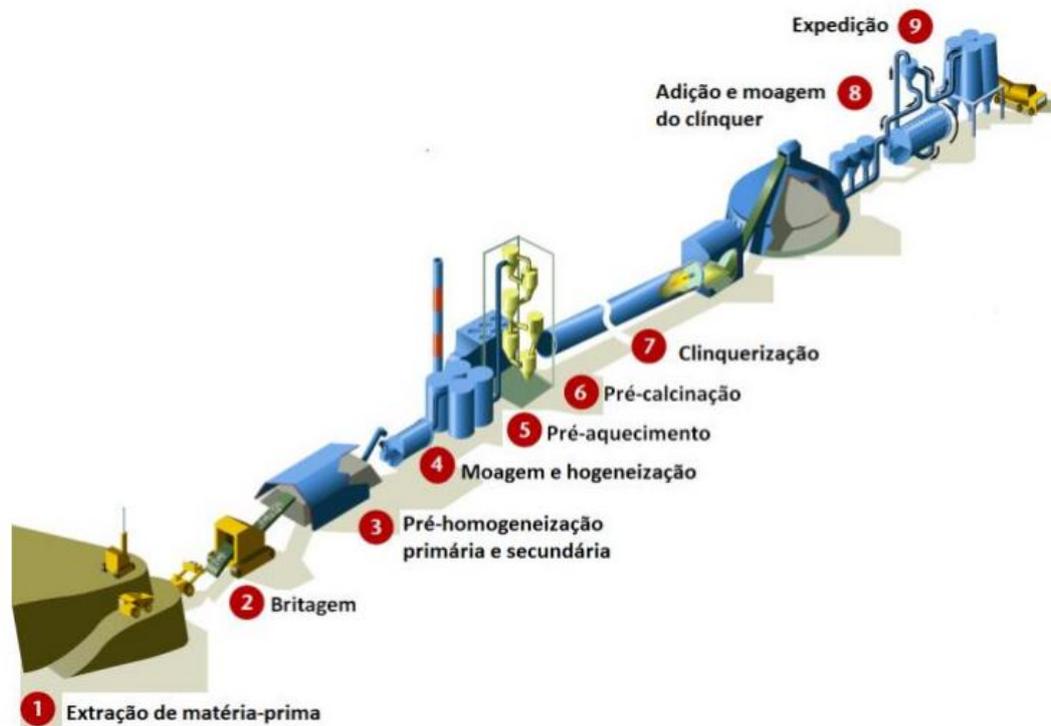
6) Resfriamento e armazenagem: após sair do forno rotativo, o clínquer é tratado com resfriadores de ar que reduzem a temperatura para 100 °C. Este processo influencia a composição e as características do cimento (CANACEM, 2022);

7) Adições e moagem do cimento: após resfriado o clínquer é finamente moído e são feitas as adições de gipsita (LUIZ, 2016), a qual deverá estar presente em todos os cimentos Portland (cerca de 3 - 5%); e outros tipos de adições que dependem do tipo específico de cimento como as escórias granuladas de alto-forno e as pozolanas;

8) Armazenamento e despacho/expedição: o produto final é ensacado ou armazenado em silos, para posterior despacho (NÓBREGA, 2009).

A Figura 4 mostra as etapas de fabricação do cimento Portland, estas são consideradas complexas, tendo como base as fases de moagem, homogeneização e queima da mistura (BERTANHA, 2019).

Figura 4 – Esquema das etapas de fabricação do cimento Portland.



Fonte: WBCSD, 2009.

2.2 INDÚSTRIAS DE CIMENTO NO BRASIL

Segundo dados do SNIC (2022), há cerca de 91 fábricas produtoras de cimento no Brasil, controladas por 22 grupos industriais, distribuídas entre 80 municípios em 23 estados, com uma produção em 2021 de 65,8 milhões de toneladas e consumo aparente de 64,5 milhões de toneladas, no mesmo ano. A Tabela 1 apresenta a produção de cimento por região do país, em 2021.

Tabela 1 - Produção e consumo de cimento por região do Brasil, em 2021.

Região	Consumo aparente (t)	Produção (t)
Sudeste	27.866.217	30.623.443
Nordeste	14.159.066	13.442.443
Sul	12.160.541	11.572.230
Centro-Oeste	6.452.284	7.626.806
Norte	3.886.028	2.618.592

Fonte: SNIC, 2022.

Como pode-se perceber, a região Sudeste é a maior produtora e consumidora de cimento no Brasil e isto pode estar relacionado ao fato da crescente urbanização e a conseqüente necessidade de consumo deste material; vale ressaltar que o estado de Minas Gerais é o maior produtor e São Paulo o maior consumidor de cimento do país. Em seguida vem a região Nordeste e Sul, respectivamente. As regiões Centro-Oeste e Norte são as que, além de terem uma produção menor, também, foram as que menos apresentaram consumo aparente em 2021.

A indústria do cimento brasileira desenvolveu o Roadmap Tecnológico do Cimento, uma ferramenta que mapeia diferentes cenários e alternativas capazes de acelerar a transição de baixo carbono do setor a curto, médio e longo prazo até 2050. Com a medida, a indústria espera reduzir em 33% suas emissões projetadas. Entre as alternativas propostas, o uso de matérias-primas alternativas, ou adições, representaria 69% do potencial de redução do setor, enquanto os combustíveis alternativos respondem por 13% (ABCP, 2021).

O Brasil tem buscado por uma produção de cimento mais sustentável, principalmente por ser um país cuja urbanização vem crescendo, aumentando assim o consumo e a demanda por cimento, e conseqüentemente a emissão de poluentes. De acordo com o Vizado e Pacchio (2019), para alcançar uma redução de emissões compatível com os compromissos globais de menor impacto climático serão necessários, ainda, esforços adicionais no desenvolvimento e implantação de tecnologias inovadoras e emergentes.

2.3 PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

2.3.1 Emissão de gases poluentes

O cimento Portland é produzido a partir da queima das matérias-primas a uma temperatura de 1.450°C, o que leva à geração de uma grande quantidade de GEE que, somada à produção mundial de cimento, corresponde a, aproximadamente, 5% de todas as emissões globais (SAENSE, 2021). Durante a produção do clínquer são liberados em média 866 kg de CO₂/tonelada de cimento produzido. Cerca de 40% deste valor se deve a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia e o restante da decomposição do carbonato de cálcio na fase de calcinação das matérias-primas (ABRÃO, 2019).

Além da geração de CO₂ a produção de cimento, também, é responsável pela emissão de monóxido de carbono prejudicial, material particulado, dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e emissões baseadas em metais pesados (LEI *et al.*, 2011).

2.3.2 Exploração de jazidas naturais

O calcário e a argila são os principais constituintes do clínquer, sendo que este primeiro contribui de 75 a 80% na fabricação, enquanto que a argila apresenta cerca de 20 a 25% do total da mistura e é um componente usado para fornecerem silicatos de alumínio e ferro (ISAIA, 2011). Além disso, quando o carbonato de cálcio (calcário – CaCO₃) apresenta muitas impurezas é necessário fazer uma correção por meio da adição de minerais como a bauxita, xisto, minério de ferro ou quartzito (ISAIA, 2011). Com isso, pode-se perceber que para a fabricação do cimento é necessário a extração de um grande volume de calcário, o qual é um recurso não renovável, muito explorado pelas indústrias cimenteiras e o responsável pela maior parte da emissão de CO₂ durante o processo de clinquerização, por isso a importância da substituição parcial do clínquer e, conseqüentemente, do calcário, por materiais cimentícios suplementares para que se haja uma redução na liberação de GEE para o meio

ambiente. É importante ressaltar que na fase de extração das matérias-primas além da exploração de recursos não renováveis, ocorrem à degradação e alteração nos habitats próximos as fábricas. Ainda de acordo com Cement Sustainability Initiative (2012) durante a extração do calcário ocorrem impactos significativos no solo, alterações no relevo, possíveis erosões, danos à flora, fauna e recursos hídricos e produção de resíduos.

2.3.3 Lançamento de materiais particulados

Principalmente nas fases de pré-aquecimento (torre de ciclones) e moagem, uma grande quantidade de pó de cimento é lançada na atmosfera representando uma grande ameaça tanto para as pessoas quanto para o meio ambiente, pois contém cerca de 80% de partículas em suspensão, cuja finura não ultrapassa dez microns (STRIZHENOK e IVANOV, 2017). Segundo Meharj e Bhat (2013) o pó de cimento pode gerar um impacto negativo em todos os componentes do ambiente natural, afetando de forma aguda a biosfera e degradando a cobertura vegetal em decorrência dessa poluição do ar atmosférico.

2.3.4 Consumo energético

A fabricação de cimento requer um uso intensivo de energia, e isso se deve principalmente ao seu grande consumo na produção de clínquer, principal matéria-prima do cimento Portland (PAULA, 2009). De acordo com Rodrigues (2017) o consumo térmico pode chegar a 3.300 MJ/t de clínquer produzido, e o consumo de energia elétrica é estimado em 90 e 120 kWh/t de cimento produzido.

Portanto, de acordo com Stajanca e Estoková (2012), as principais questões ambientais associadas à produção do cimento são o consumo de matérias-primas, o elevado consumo de energia, na fase de moagem do clínquer, bem como elevadas emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera, durante a calcinação da farinha crua e proveniente dos combustíveis

fósseis usados no forno. Ahmed *et al.* (2021), ainda, apontam que a dependência excessiva do carvão e calcário, a utilização de fornos obsoletos, a calcinação direta e a falta de tecnologias mais recentes estão também como os principais fatores que contribuem para o impacto ambiental negativo causado pela fabricação do cimento Portland.

2.4 ALTERNATIVAS DE MITIGAÇÃO

Medidas como melhorar a eficiência energética e uso de combustíveis alternativos, em combinação com a redução do teor de clínquer no cimento e a implantação de tecnologias emergentes e inovadoras, como a captura de carbono e o uso de materiais de ligação alternativos, são os principais métodos de mitigação de carbono disponíveis na fabricação de cimento (IEA, 2018).

A seguir são apresentadas algumas das principais medidas de mitigação dos impactos ocasionados pelas indústrias cimenteiras.

a) Eficiência energética

Melhorias na eficiência energética fornecem uma visão para economizar 0,26 Gt de CO₂ ou aproximadamente 3% do valor acumulado das emissões de CO₂ até 2050 (ZHANG *et al.*, 2021). De acordo com Ahmed *et al.* (2021) a melhoria mais significativa pode ser feita através da modificação ou modernização dos fornos. Uma alternativa seria trocar o forno antigo por um sistema de forno com maior eficiência energética que garanta uma maior produtividade e boa queima (DUIC *et al.*, 2016). Valderrama *et al.* (2012) ainda afirmam que para melhorar a eficiência energética a implementação das melhores tecnologias disponíveis se fazem necessárias, e que reduzir a quantidade de combustível utilizado para produzir a mesma quantidade de clínquer é extremamente importante.

Estudos envolvendo o uso de materiais mineralizantes vêm sendo feitos por diversos autores, segundo Mariani (2018) estes elementos reduzem a temperatura de clínquerização, devido à aceleração de formação das fases do clínquer, reduzindo assim, o consumo de energia durante este processo. Resíduos da construção civil e resíduos de minério não reagido (provenientes da

produção de dióxido de titânio) são exemplos de subprodutos mineralizantes, e possuem potencial para contribuir na eficiência energética durante a fabricação do cimento Portland.

b) Substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS)

A fase de produção do clínquer é responsável pela maior parcela dos impactos ambientais, devido à energia demandada nos altos fornos e as emissões de CO₂ liberadas na decomposição do carbonato de cálcio para a produção das fases minerais do clínquer, por esse motivo a sua substituição parcial por MCS vem sendo estudada e praticada por muitos pesquisadores e indústrias do ramo, devido ao fato de reduzir os impactos causados durante a produção destes; além disso, muitos materiais utilizados são subprodutos de outras indústrias, colaborando para o reaproveitamento dos mesmos (ABRÃO, 2019). E, ainda, de acordo com Bhushan (2010), a redução da proporção de clínquer ajuda na redução das emissões totais por tonelada de cimento, uma vez que tanto o consumo de combustível quanto as emissões específicas do processo dependem da proporção de clínquer-cimento adotada.

Vários trabalhos apontam a viabilidade da utilização da substituição de parcelas representativas de clínquer (até 50%) por argila calcinada em composição com filler calcário (QUEIROZ, 2018). Ainda de acordo com Queiroz (2018) os baixos teores de clínquer podem ser alcançados usando cimentos em que o clínquer seja substituído por uma combinação de MCS, como é o caso do cimento LC³, onde este é desenvolvido a partir da mistura sinérgica entre argila calcinada, clínquer, filler calcário e sulfato de cálcio, em proporções específicas.

c) Coprocessamento

De acordo com o SNIC (2022), os fornos da indústria do cimento, pelas altíssimas temperaturas alcançadas no seu interior, representam uma alternativa amplamente difundida e reconhecidamente adequada e segura para a destruição térmica de resíduos industriais e passivos ambientais. A prática do coprocessamento de resíduos na indústria de cimento tem se expandido devido

à necessidade crescente de uma destinação ambiental e socialmente mais adequada de resíduos perigosos provenientes de diversos processos industriais (ROCHA *et al.*, 2011).

Alguns dos materiais usados são resíduos do agronegócio, ossos de animais, lama de esgoto, pneus inservíveis, resíduos da perfuração de poços de petróleo, escórias, cinzas e dentre outras (ABCP, 2020). Algumas vantagens do coprocessamento, segundo o SNIC (2022), são: substituição de combustíveis fósseis não renováveis por combustíveis alternativos; preservação de jazidas, pela incorporação dos compostos inorgânicos à estrutura do clínquer em substituição a parte das matérias-primas, sem nenhuma alteração das características e qualidade do produto; redução das emissões de gases de efeito estufa, através do uso de combustíveis alternativos com menor emissão de CO₂; redução do volume de aterro, e contribuição à saúde pública, como, por exemplo, no combate aos focos de dengue com a destruição de pneus inservíveis.

Atualmente, já se tem uma resolução específica para tratar sobre essa alternativa, que é a resolução do CONAMA nº 499, de 06 de outubro de 2020, a qual dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer. Este documento propõe que o cimento resultante da utilização de resíduos no coprocessamento em fornos de clínquer não deverá agregar substâncias ou elementos em quantidades tais que possam afetar a saúde humana e o meio ambiente. Além disso, afirma que para se utilizar resíduos como combustíveis alternativos é necessário se comprovar o ganho de energia e, no caso de substitutos de matérias-primas, podem ser usados desde que apresentem características similares às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer, incluindo materiais mineralizadores ou fundentes (CONAMA, 2020).

A Figura 5 apresenta os diferentes ramos industriais que podem fornecer subprodutos para o coprocessamento em fornos de clínquer Portland. Como se podem notar diversos resíduos são gerados durante o processo produtivo nas indústrias, como por exemplo, os provenientes de polos petroquímicos, das indústrias de papel e celulose, metalúrgica, siderúrgica, automotores, dentre outros.

Figura 5 – Diferentes indústrias que podem ser provedoras de resíduos para o coprocessamento.



Fonte: Coprocessamento, 2022.

De acordo com o modo de vida da sociedade contemporânea, a produção de cimento mostra-se indispensável, porém traz consigo impactos tanto ao meio ambiente quanto as pessoas. Pensando nisso, as fábricas de cimento têm movido recursos para investir em um processo fabril mais eficiente, e com menos consequências danosas (AMDA, 2022). Atualmente, diversos estudos vêm sendo feito para comprovar a eficácia da utilização de resíduos como matéria-prima na fabricação de cimentos.

2.5 USO DE RESÍDUOS NAS INDÚSTRIAS CIMENTEIRAS

2.5.1 Uso de resíduos pelas indústrias cimenteiras como alternativas de mitigação

2.5.1.1 Uso de resíduos como MCS

Com o intuito de reduzir o consumo de energia, as emissões de CO₂ e aumentar a produção, reduzindo simultaneamente o custo, os materiais cimentícios suplementares têm sido cada vez mais utilizados como substitutos do clínquer na produção de cimento (STONGBO *et al.*, 2015 *apud* QUEIROZ, 2018).

Segundo a ABCP (2020), as indústrias cimenteiras oferecem o coprocessamento como técnica de gestão de grande variedade de resíduos, reinserindo-os na cadeia produtiva de acordo com o mais amplo conceito da economia circular, mitigando assim os impactos ambientais provocados pela fabricação do cimento. No coprocessamento destroem-se os resíduos de forma controlada economizando matéria-prima e combustível, contribuindo assim para a sustentabilidade (ABCP, 2020).

A Tabela 2 apresenta os principais resíduos que podem ser utilizados após tratamento adequado na produção de cimento Portland, tanto como matérias-primas quanto como combustível alternativo. Como se pode notar, diversos subprodutos derivados de fontes de alumínio, ferro, sílica, provenientes do agronegócio, lamas de esgoto, resíduos urbanos, pneus inservíveis, e etc., possuem potencial para serem coprocessados em fornos de clínquer Portland.

Tabela 2 – Resíduos que podem ser utilizados no coprocessamento, em fábricas de cimento.

Combustível	Matérias-primas
Solventes, resíduos oleosos e resíduos têxteis	Lama com alumina (alumínio) e Lamas siderúrgicas (ferro)
Pneus usados e resíduos de picagem de veículos	Areia de fundição (sílica)
Graxas, lamas de processos químicos e de destilação	Terras de filtragem (sílica)
Resíduos de empacotamento e de borracha	Refratários usados (alumínio)
Resíduos plásticos, de serragem e de papel	Resíduos da fabricação de vidros (flúor)
Lama de esgoto, ossos de animais e grãos vencidos	Gesso, Cinzas e Escórias
Resíduos do agronegócio	Resíduos da perfuração de poços de petróleo
Combustíveis derivados de resíduos urbanos	Solos contaminados dos postos de combustíveis

Fonte: ABCP, 2020.

2.5.1.2 Uso de resíduos como matérias-primas

De acordo com o *Internacional Solid Waste Association* (2022), as iniciativas de prevenção e reciclagem de resíduos contribuem para a redução da demanda por matérias-primas virgens e, conseqüentemente, das emissões de GEE da extração e refino desses materiais. Tais iniciativas, somadas a substituição de combustíveis fósseis mediante a utilização de materiais secundários a partir dos fluxos de resíduos, são capazes de reduzir até 20% das emissões globais de GEE.

Tem-se que as emissões de CO₂ resultantes de clínquerização podem ser substancialmente reduzidas ao aumentar o índice de substituição de clínquer (QUEIROZ, 2018). Segundo Martirena e Scrivener (2015) os cimentos convencionais com substituição de até 30% permitem a redução de aproximadamente 15 – 20% das emissões de CO₂.

Estudos já apontam diversos resíduos que possuem potencial para substituírem as matérias-primas tradicionais do clínquer. Atualmente, pesquisas envolvendo o chamado cimento LC³ vêm sendo discutidas devido este ser um produto viável com grande potencial para colaborar na redução da utilização do clínquer na fabricação de cimentos, tendo que os parâmetros mais importantes para sua fabricação são o teor de substituição, a proporção entre os materiais, e a quantidade de argila utilizada, relacionada ao teor de caulinita (JOSEPH *et al.*, 2015).

Tem-se que a indústria do cimento mostra-se como local possível para uma destinação ambientalmente adequada para os resíduos das mais diversas procedências e, principalmente, para aqueles que não são recicláveis. Além disso, através do aproveitamento energético ou como matéria-prima, a destinação final dos resíduos no processo de fabricação de cimento impacta positivamente na conservação e na racionalização de recursos minerais e energéticos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo foi descrito o método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento do trabalho, a partir do qual foi apresentada a estratégia de pesquisa adotada e, em seguida, seu delineamento.

3.1 ESTRATÉGIA DA PESQUISA

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados estudos bibliométricos o qual têm sido cada vez mais requisitados e utilizados para a quantificação da produção e também para outras finalidades, como identificar grupos e áreas de excelência acadêmica (RAVELLI *et al.*, 2009).

Para Soares *et al.* (2016), a análise bibliométrica é um método que permite situar um país em relação ao mundo, uma instituição em relação a um país e cientistas individuais em relação às próprias comunidades científicas. Esta se baseia na contagem de artigos publicados, patentes e citações; além disso, os dados elaborados por meio de seus estudos mensuram a contribuição do conhecimento científico derivado das publicações em determinadas áreas (SOARES *et al.*, 2016). De acordo com Magalhães (2006), alguns dos indicadores mais conhecidos e de maior importância no cenário da bibliometria dizem respeito ao número de trabalhos, citações, coautorias e mapas dos campos científicos. Assim, a dinâmica da pesquisa numa área do conhecimento pode ser monitorada e sua tendência traçada, ao longo do tempo, pelo número de trabalhos divulgados nesse campo.

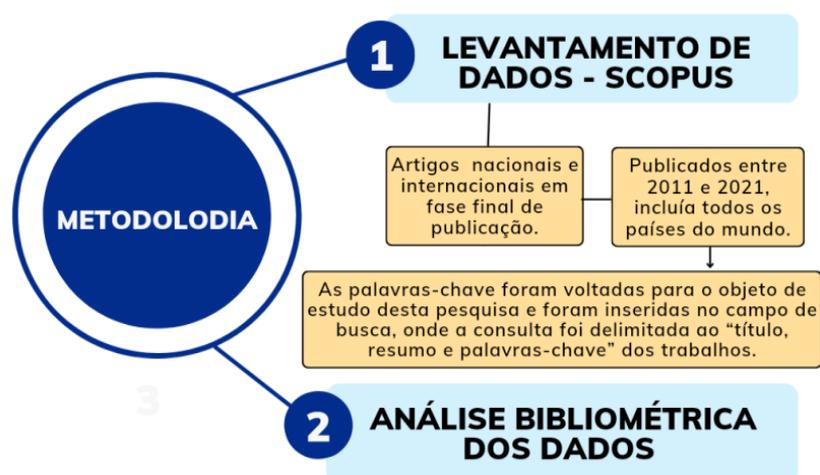
Para a construção dos diagramas, visualização de redes bibliométricas e complementação da metodologia, foi utilizado o *software* denominado VOSVIEWER versão 1.6.8 (VOSVIEWER, 2018). Segundo Zarhri (2022), as informações que podem ser extraídas deste são a frequência da palavra-chave, que é exibida com base na área dos círculos. Os menores representam palavras-chave que não são tão relevantes, enquanto os maiores representam palavras-chave de maior relevância nos diferentes artigos publicados. Além disso, é possível também verificar a ocorrência de coautorias, a frequência de países e autores que mais publicaram, dentre outras. É importante lembrar de

que este diagrama fornece uma visão geral dos tópicos estudados e não reflete nenhum resultado final, é um procedimento prévio à filtragem (ZARHRI, 2022).

3.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Para o presente estudo a metodologia empregada consistiu de quatro principais etapas, dispostas na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama das principais etapas de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autor, 2022.

Os passos a seguir apresentam a descrição de cada uma das etapas conforme o diagrama da Figura 6.

Etapa 1: Levantamento de dados

Para o desenvolvimento da primeira etapa foi realizado um levantamento de publicações nacionais e internacionais, entre 2011 e 2021, por meio da base de dados do Scopus. As palavras-chave foram voltadas para o objeto de estudo desta pesquisa e foram inseridas no campo de busca, onde a consulta foi delimitada ao "título, resumo e palavras-chave" dos trabalhos, além disso, o tipo de documento era apenas artigos em fase final de publicação e incluída todos os países do mundo. Só ressaltando que as palavras-chave inseridas no campo de

busca foram: *“Portland Cement” and “Waste” or “Portland clinker”, “Portland cement” and “Waste” or “Alternatives fuels”, “Cement Production” and “Waste” or “Alternative fuels”* e *“Portland cement Production” or “Portland cement manufacturing” and “Waste” or “Alternatives fuels” or “Portland clinker”*.

Etapa 2: Análise bibliométrica dos dados

A segunda e última etapa consta de uma pesquisa refinada, onde foram analisados todos os artigos filtrados e que estavam relacionados diretamente com o tema, feito isso, foi realizada uma análise bibliométrica com os dados coletados. Além disso, apresenta uma análise das principais contribuições dos autores sobre a temática.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TERMOS INSERIDOS NO CAMPO DE BUSCA DO SCOPUS

A Tabela 3 apresenta os termos que foram inseridos no campo de busca do Scopus, conforme estivessem presentes no “título, palavras-chave e resumo” dos trabalhos nacionais e internacionais, publicados na última década. Analisando as palavras-chave da Tabela 3, tem-se que com base no critério de seleção, aquelas que mais se adequam ao tema desta pesquisa são “*Portland cement*” AND “*Waste*” OR “*Alternatives fuels*”, e, portanto, os artigos gerados a partir destas que foram utilizados para maiores discussões no decorrer desta seção. Quando se utiliza apenas a palavra cimento Portland, são gerados 11.196 resultados, o que mostra que há um número bastante elevado de estudos que envolvam esse material. Em contrapartida, quando se utilizam termos que se referem à fabricação ou produção de cimento Portland, esses números diminuem drasticamente (Tabela 3).

Tabela 3 - Palavras-chave utilizadas no campo de busca da plataforma Scopus.

Palavras-chave	Artigos
<i>“Portland cement”</i>	11.196
<i>“Portland cement” AND “Waste” OR “Portland clinker”</i>	2.364
<i>“Portland cement” AND “Waste” OR “Alternatives fuels”</i>	2.346
<i>“Cement Production” AND “Waste” OR “Alternatives fuels”</i>	506
<i>“Portland cement Production” OR “Portland cement manufacturing” AND “Waste” OR “Alternatives fuels” OR “Portland clinker”</i>	43

Fonte: Próprio Autor, 2022.

A Figura 7 apresenta os dados obtidos pela busca das palavras-chave, “*Portland cement*”, “*Waste*” e “*Alternatives fuels*”. A partir desta pode-se perceber que entre 2012 e 2016 houve um aumento de publicações, sendo que no ano seguinte apresentou uma pequena queda e logo em seguida, em 2017, voltou a

criar. Como se pode perceber, o ano de maior atividade científica foi em 2021 com um total de 467 artigos publicados, o equivalente a mais de 100% da quantidade total publicada em 2011, isso mostra que a tendência sobre o assunto tem aumentado substancialmente ao longo dos anos.

Figura 7 – Quantidade de artigos publicados no Scopus baseado nos termos “*Portland cement*” AND “*Waste*” OR “*Alternatives fuels*”, entre 2011 e 2021.



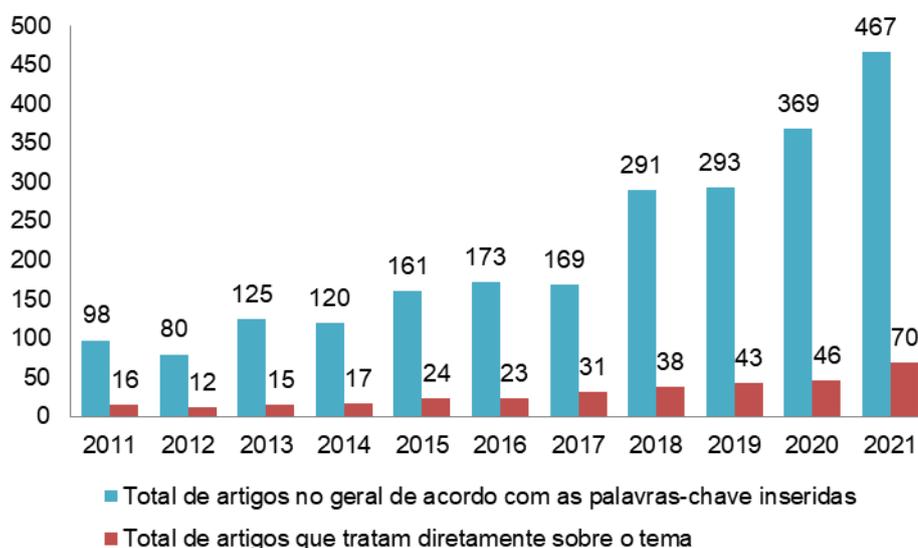
Fonte: Próprio Autor, 2022..

Todos os trabalhos gerados a partir das palavras-chave “*Portland cement*”, “*Waste*” e “*Alternatives fuels*” (Figura 7) foram refinados de forma mais detalhada, isto é, realizou-se uma leitura em cada artigo, por ano de publicação, feito isso, selecionou-se aqueles que estavam retratando diretamente sobre o tema em questão. Com isso, tem-se que desse total filtrado, cerca de 14%, o equivalente a 335 artigos, falavam do uso de resíduos como alternativas para substituir parcialmente o clínquer e/ou cimento Portland e também como combustível alternativo em indústrias de cimento.

A Figura 8 apresenta uma comparação entre a quantidade total de artigos gerados após inserção das palavras-chave (*Portland cement*, *Waste* e *Alternatives fuels*) e a quantidade de artigos que realmente retrata sobre o uso de diferentes resíduos em fábricas de cimentos. No período de 2017 a 2021,

houve um aumento na publicação de trabalhos que envolvam o uso de resíduos, o que resulta em uma maior produtividade de artigos, e aparentemente a tendência é que continuará crescendo nos próximos anos, devido esta ser atualmente uma alternativa para mitigar a poluição global causada pela fabricação do cimento.

Figura 8 – Comparação entre o total de artigos gerados e os que tratam diretamente do “uso de resíduos na fabricação de cimentos”, entre 2011 e 2021.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

4.2 PALAVRAS-CHAVE DE MAIOR OCORRÊNCIA

A Figura 9 mostra diferentes termos gerados a partir das palavras-chave “Portland cement” AND “Waste” OR “Alternatives fuels” (2.364 trabalhos) utilizadas pelos autores dos artigos e que estão relacionadas com a produção de cimento e o uso de resíduos como alternativas para o desenvolvimento sustentável e a redução da emissão de poluentes. Como se pode notar, a palavra *Portland cement* (cimento Portland) é a que mais se destaca no diagrama, ou seja, foi o termo de maior relevância entre os trabalhos publicados.

Tabela 4 – *Ranking* das dez palavras-chave de maior ocorrência nos trabalhos de acordo com as palavras-chave “Portland cement” AND “Waste” OR “Alternatives fuels” (Tabela 3).

Palavras-chave	Ocorrência
<i>Portland cement</i> (Cimento Portland)	1.376
<i>Compressive strength</i> (Resistência à compressão)	846
<i>Fly ash</i> (Cinzas volantes)	484
<i>Ordinary Portland cement</i> (Cimento Portland comum)	421
<i>Slags</i> (Escórias)	339
<i>Cements</i> (Cimentos)	307
<i>Hydration</i> (Hidratado)	301
<i>Concretes</i> (Concretos)	282
<i>Mortar</i> (Argamassa)	275
<i>Cement</i> (Cimento)	259

Fonte: Próprio Autor, 2022.

4.3 PRODUTIVIDADE DOS AUTORES

A Tabela 5 apresenta um refinamento dos dez autores com maiores publicações associados ao uso de resíduos na produção de cimentos, bem como o número de citações. Com relação à produtividade, Payá possui 211 citações e 5 documentos publicados, entre 2011 e 2021, ou seja, além de ter uma quantidade maior de autorias em seu nome, é o mais citado, tornando-o o autor com maior produtividade científica. Em contrapartida, Pavlik ocupa o último lugar dos dez primeiros, com 3 documentos e 57 citações. É importante lembrar que nem sempre os autores com maior índice de publicações são os que possuem maior número de citações, como, por exemplo, Borrachero é o segundo autor mais citado, com 124 citações, porém, é o quinto do *ranking* de publicação.

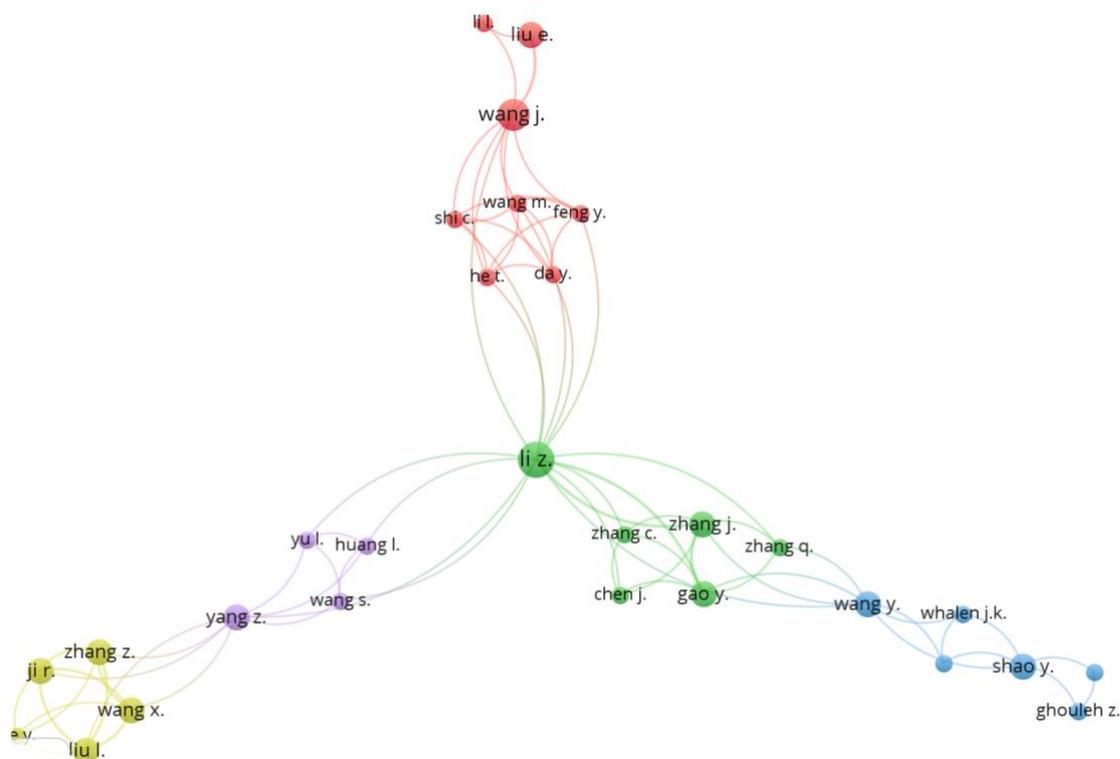
Tabela 5 – Os 10 principais autores com base em artigos publicados e citações.

Autores	Documentos	Citações
Payá, J.	5	211
Garcez M. R.	5	59
Lo K.	5	28
Lin K.	5	28
Borrachero M. V.	4	124
Tsakiridis P. E.	4	52
Li Z.	4	34
Chang Y.	4	28
Cheng T.	4	25
Pavlik Z.	3	57

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Segundo Zarhri (2022), o diagrama da Figura 10 visa mostrar a coautoria, que se reflete na produtividade. Isso ajuda a fornecer um ponto de partida para saber quais autores consultar para realizar uma pesquisa na área de produção de cimento com adição de resíduos.

Figura 10 – Diagrama de coautoria baseado em publicações sobre “o uso de resíduos na fabricação de cimentos”.

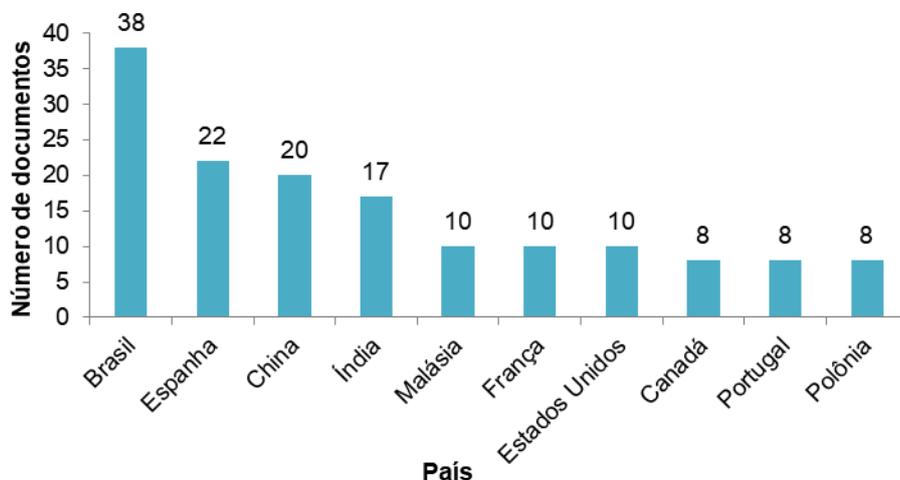


Fonte: Próprio Autor, 2022.

4.4 PAÍSES COM MAIOR PRODUTIVIDADE CIENTÍFICA SOBRE O TEMA

A Figura 11 apresenta o *ranking* dos dez países com maior número de contribuições sobre o tema, estes foram selecionados com base na quantidade de artigos publicados, de acordo com as palavras-chave “Portland cement” AND “Waste” OR “Alternatives fuels”, após o refinamento (Figura 8). Como se pode notar, o Brasil é o país com maior produtividade em pesquisas da área, com cerca de 38 trabalhos já publicados, na plataforma Scopus, enquanto, no Canadá, Portugal e Polônia esse número é bastante baixo quando comparado ao Brasil, Espanha e China, respectivamente. Vale-se ressaltar que a China é uma das maiores produtoras de cimento no mundo (LAJES CONTIM, 2022), por isso, está entre os países com um maior interesse na busca por alternativas que minimizem os impactos causados por esse setor industrial.

Figura 11 – *Ranking* dos dez 10 países com maior índice de publicações sobre “o uso de resíduos na produção de cimento”, entre 2011 e 2021.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

A Figura 12 apresenta o diagrama de colaboração de cada país baseado na coautoria de publicações sobre o tema “cimento Portland e uso de resíduos” e como eles estão ligados entre si, só ressaltando que esta é caracterizada com base na instituição de publicação dos trabalhos. Como se pode notar, o Brasil é quem apresenta uma esfera maior, quando comparada às outras, ou seja, este foi o país com maior índice de publicações, entre 2011 e 2021, seguidas da Espanha, China e Índia, respectivamente (Figura 11). A Figura 12 é um complemento ao diagrama da Figura 10, mas foca na colaboração entre países na tentativa de especificar quais lugares do mundo têm interesse no assunto em termos de produtividade científica.

Figura 12 – Diagrama de colaboração do país baseado na coautoria de artigos sobre “o uso de resíduos na produção de cimento”, entre 2011 e 2021.

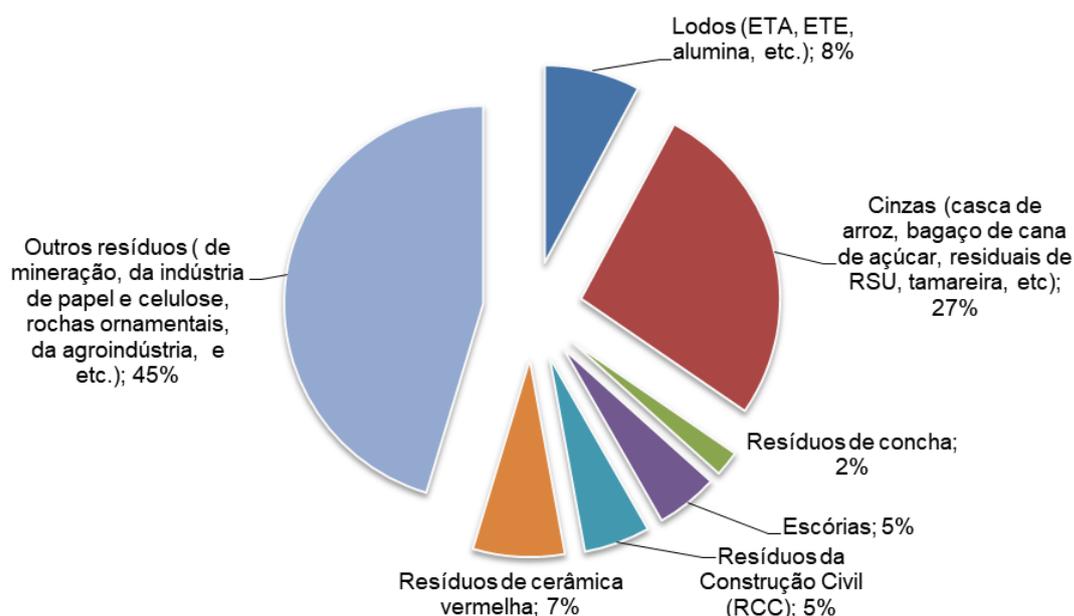


Fonte: Próprio Autor, 2022.

4.5 RESÍDUOS ESTUDADOS PELOS AUTORES

A Figura 13 contém os resíduos estudados com maior frequência pelos autores dos artigos publicados. Como pode-se perceber, o uso de cinzas das mais diversas procedências está sendo bastante investigado; nesse período considerado (2011 – 2021) o uso de resíduos de conchas ainda é pequeno, mas futuramente esses números podem aumentar, à medida que for aumentando o interesse por parte de pesquisadores, principalmente, porque são fontes de carbonato de cálcio, e possuem potencial para substituir o calcário comum, derivados de jazidas.

Figura 13 – Principais resíduos utilizados nas pesquisas pelos autores dos artigos.



Fonte: Próprio Autor, 2022.

Analisando mais detalhadamente os resultados gerados a partir das respectivas palavras-chaves e fazendo um refinamento mais aprofundado destes, percebe-se que diversas pesquisas mostraram que muitos subprodutos industriais, como: as cinzas (volantes, de casca de arroz, de cana de açúcar, etc.), lodos de Estação de Tratamento de Água (ETA) e Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), de alumina, Resíduos da Construção Civil (RCC), resíduos de cerâmica vermelha, resíduos de conchas e dentre outros, possuem potencial

para serem utilizados nas fábricas de cimento como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), substituindo parcialmente o cimento e o clínquer Portland, reduzindo assim as emissões de poluentes para a atmosfera e diminuindo o consumo de energia.

4.6 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES SOBRE O TEMA

As Tabelas 6, 7, 8 e 9, respectivamente, apresentam as principais contribuições dos autores, bem como o tipo de resíduo analisado, título do seu trabalho, país de origem e os principais métodos utilizados para chegar aos resultados. Para a seleção dos trabalhos foram considerados aqueles artigos mais recentes e que usavam os resíduos em formas diferentes.

4.6.1 Resíduos utilizados como MCS

Foi selecionado um trabalho cujo foco era a substituição parcial do cimento por um material cimentício suplementar, como é o caso da pesquisa de Ruviaro *et al.* (2021).

4.6.1.1 Análise do trabalho de Ruviaro *et al.* (2021)

A Tabela 6 apresenta uma análise do trabalho de Ruviaro *et al.* (2021) os quais investigaram o potencial do uso de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) calcinada no cimento Portland para a produção sustentável de compósitos cimentícios. Para isso, foram produzidas pastas com 0 a 45%, em peso, de substituição de cimento por resíduos de lodo de ETA calcinado. Vale-se ressaltar que alguns dos principais constituintes do lodo de ETA (como SiO_2 , Al_2O_3 e FeO_3) também são encontrados no cimento Portland e em materiais pozolânicos, o que torna esse resíduo um potencial candidato a ser usado como MCS (RUVIARO *et al.*, 2021).

Tabela 6 – Análise do trabalho de Ruviaro *et al.* (2021).

Autor (es)	Ruviaro, A.S.; Silvestro, L.; Scolaro, T.P.; de Matos, P.R.; Pelisser, F.
Título do trabalho	Uso de lodo de Estação de tratamento de água (ETA) calcinada para produção sustentável de compósitos cimentícios
País de origem	Brasil
Resíduo analisado	Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) calcinado
Principais contribuições	<ul style="list-style-type: none"> • A incorporação do lodo de ETA calcinado reduziu a resistência da pasta em 1 e 3 dias independentemente do nível de incorporação, enquanto que de 7 a 730 dias, a incorporação de até 20% desse resíduo levou as resistências equivalentes ou superiores à pasta simples; • A substituição de até 20% de cimento por resíduos de ETA levou as pastas com desempenho equivalente ao estado fresco, resistência melhorada a partir de 7 dias e emissão reduzida de CO₂ eq.

Fonte: Ruviaro *et al.*, 2021.

4.6.2 Resíduos utilizados como matéria-prima alternativa

Neste caso foram selecionados três trabalhos cujo foco principal era a substituição das matérias-primas tradicionais por matérias-primas secundárias ou alternativas. Com isso, analisou-se o trabalho de Her *et al.* (2021), o qual tratava de um resíduo que substituiu totalmente o calcário, o qual é o principal vilão na emissão de GEE durante o processo de descarbonatação nos fornos de clínquer Portland; um outro que apresentou um resíduo com potencial para reduzir o consumo de energia no processo de clínquerização, conforme pesquisa de Mariani *et al.* (2019) e, por fim, selecionou-se uma pesquisa que mostrava o quanto era possível reduzir na emissão de CO₂ ao se utilizar matérias-primas alternativas que substituíssem parte da mistura calcário-argila, como no trabalho de Costa e Ribeiro (2020).

4.6.2.1 Análise do trabalho de Her *et al.* (2021)

A Tabela 7 traz uma análise do trabalho de Her *et al.* (2021), onde eles fizeram um estudo acerca do uso de ostras pulverizadas e conchas de vieiras¹. De acordo com Her *et al.* (2021), para a gestão sustentável dos subprodutos do marisco, a ostra pulverizada e o pó de concha de vieira foram utilizados como principais matérias-primas na produção do clínquer, substituindo 100% em peso do calcário. Como se sabe, o calcário é a principal matéria-prima do clínquer e o responsável pela elevada parcela de GEE para o meio ambiente, logo, encontrar um resíduo com potencial para substituir totalmente este material, se torna um grande avanço para o setor industrial cimentício, entretanto, muitos estudos ainda devem ser realizados. Além disso, a produção de cimento demanda uma grande quantidade de matéria-prima, o que pode ser incompatível com a quantidade de resíduos de ostras e conchas de vieiras disponíveis para a substituição total do calcário, não atendendo tal consumo.

¹ São frutos do mar pertencentes ao Filo dos moluscos (Filo Mollusca).

Tabela 7 – Análise do trabalho de Her *et al.* (2021).

Autor (es)	Her, S.; Park, T.; Zalnezhad, E.; Bae, S.
Título do trabalho	Síntese e caracterização de clínquer de cimento usando ostras pulverizadas recicladas e conchas de vieiras como substitutos do calcário
País de origem	Coreia do Sul
Resíduo analisado	Conchas de vieiras e ostras pulverizadas
Principais contribuições	<ul style="list-style-type: none"> • Os cimentos de casca de ostra e de casca de vieira sintetizados foram comparados com os de cimento à base de calcário e cimento Portland comum comercial. Fases cimento-clínquer anidras como C_3S, C_2S, C_3A e C_4AF foram formadas com sucesso em todos os clínquer sintetizados, semelhante ao cimento Portland comum; • Os cimentos de casca de ostra e de casca de vieira produziram os mesmos principais produtos de hidratação (C–S–H e portlandita) do cimento Portland comum, e a morfologia dos produtos de hidratação foram muito semelhantes; • O uso de conchas de ostras e vieiras no processo industrial de produção de cimento-clínquer oferece oportunidades ambientais ao reduzir o uso de recursos subterrâneos e a quantidade de resíduos depositados em aterros.

Fonte: Her *et al.*, 2021.

Alguns outros estudos visando o uso de conchas na produção de cimento Portland já foram desenvolvidos por Dahhou *et al.* (2021), Wang *et al.* (2019) e Chandrasir *et al.* (2019).

4.6.2.2 Análise do trabalho de Costa e Vieira (2020)

A Tabela 8 apresenta a análise do trabalho de Costa e Ribeiro (2020), em que estes estudaram o uso de resíduos da construção civil (RCC) como uma matéria-prima alternativa para substituir parcialmente as matérias-primas tradicionais na produção de clínquer Portland. A partir de pesquisas e experimentos (substituindo parte da mistura calcário-argila por RCC),

conseguiram estimar a quantidade de CO₂ que é possível reduzir tanto na fase de descarbonatação, quanto considerando todo o processo. Para Costa e Ribeiro (2020), a utilização de RCC é uma alternativa viável para a indústria cimenteira, pois reduz a geração de CO₂ e utiliza uma matéria-prima que não agride o meio ambiente.

Tabela 8 – Análise do trabalho de Costa e Ribeiro (2020).

Autor (es)	Costa, F. N.; Ribeiro, D. V.
Título do trabalho	Redução das emissões de CO ₂ durante a produção de cimento, com substituição parcial das matérias-primas tradicionais por resíduos da construção civil (RCC)
País de origem	Brasil
Resíduo analisado	Resíduos da Construção Civil (RCC)
Principais contribuições	<ul style="list-style-type: none"> • Este trabalho propôs o reaproveitamento de resíduos da construção civil (RCC) como matéria-prima alternativa na produção de clínquer Portland, com substituição parcial das misturas calcário-argila; • A substituição parcial da mistura calcário-argila proporciona uma redução de até 8,1% nas emissões de CO₂ das matérias-primas na produção de clínquer (na fase de descarbonatação), pois o RCC atua como fonte alternativa de cálcio na formulação da mistura bruta, substituindo parcialmente o calcário, sem afetar negativamente a formação das principais fases mineralógicas do cimento, principalmente a alita (C₃S); • O uso de RCC reduziu em 4,9% a emissão de CO₂, considerando todo o processo de clinquerização, incluindo a combustão do combustível, quando comparado ao clínquer com matérias-primas tradicionais.

Fonte: Costa e Ribeiro, 2020.

4.6.2.3 Análise do trabalho de Mariani et al. (2019)

A Tabela 9 discorre de uma análise do trabalho de Mariani *et al.* (2019), onde analisaram o uso de resíduos de minério não reagido (MNG), gerados a partir da produção de dióxido de titânio (TiO₂). De acordo com Mariani *et al.*

(2019) devido aos elevados teores de TiO_2 na composição do resíduo, este poderá atuar como mineralizante, favorecendo, assim, a formação da fase líquida e, por conseguinte, da alita, em temperaturas mais baixas.

Tabela 9 – Análise do trabalho de Mariani *et al.* (2019).

Autor (es)	Mariani, B. B; Andrade Neto, J. da S.; Amorim Júnior, N. S. de; Ribeiro, D. V.
Título do trabalho	Efeito da incorporação de resíduo de TiO_2 (MNR) na formação das fases mineralógicas de clínquer Portland
País de origem	Brasil
Resíduo analisado	Resíduos de minério não reagido (TiO_2)
Principais contribuições	<ul style="list-style-type: none"> • Quanto ao desempenho dos clínqueres produzidos, todas as fases principais (C_2S, C_3S, C_3A e C_4AF) foram formadas com a utilização do MNR em substituição parcial ao calcário, em temperaturas mais baixas do que as industrialmente utilizadas; • O MNR atua como mineralizante, acelerando as reações no processo de clinquerização e aumentando o percentual de alita presente no clínquer; • A incorporação do resíduo reduziu a emissão de CO_2 advinda do processo de descarbonatação. Com isso, verificou-se que em proporções específicas, o clínquer produzido com a incorporação de MNR obteve bom desempenho, porém, são necessários estudos complementares para comprovar sua viabilidade técnica e econômica.

Fonte: Mariani *et al.*, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho faz refletir como resíduos, que muitas vezes são descartados em grandes quantidades em aterros, calçadas, lixões e locais inadequados, podem ser utilizados para contribuir na redução da agressão ao meio ambiente pelas indústrias de cimento Portland e outras cadeias produtivas. Portanto, a partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- *Quanto ao índice de publicações sobre o uso de resíduos na produção de cimento:*

- A quantidade de trabalhos publicados na plataforma Scopus voltadas para o uso de resíduos na produção de cimento Portland vem crescendo nos últimos anos. A tendência é que esses números continuem crescendo, pois, há uma maior busca por uma produção de cimento mais sustentável bem como pela necessidade de setores industriais darem um destino adequado aos resíduos gerados, tendo na indústria cimenteira uma oportunidade de reinserção;

- O campo do desenvolvimento de novas tecnologias e produtos acerca do cimento Portland tem ganhado grande destaque na indústria internacional, porém percebe-se que os esforços voltados para o desenvolvimento de novos produtos por empresas ou empreendedores ainda estão bastante incipientes. Isto pode ser visto em uma busca na base de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), onde se percebe que há poucas patentes depositadas sobre essas tecnologias.

- *Quanto aos países que mais se interessam pelo tema:*

- Países mais desenvolvidos e que são os maiores produtores de cimento tendem a investir em novos métodos fabris, principalmente para reduzir as emissões de CO₂, com isso, já se percebe muitos esforços voltados para o desenvolvimento de novos produtos que estejam ligados à sustentabilidade. Entretanto, países menos desenvolvidos como Brasil, Espanha, Portugal, Malásia e etc., também vem se destacando e investindo em pesquisas que possam contribuir para reduzir suas emissões.

- *Quanto ao uso dos resíduos:*

- Resíduos de diferentes procedências possuem potencial para serem usados pelas fábricas cimentícias como matéria-prima alternativa aquelas tradicionalmente utilizadas e podem, também, substituir parcialmente o próprio clínquer e/ou cimento, não afetando suas principais características. Lembrando que o resíduo mais estudado e utilizado nas pesquisas foi às cinzas (de bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, caroço de azeitona, lodos, etc.);

- Pode-se observar mais detalhadamente nos diversos tipos de resíduos utilizados e analisados pelos autores, como o estudo destes para aplicações na construção civil vem crescendo nos últimos anos.

E por fim, conclui-se a partir dos trabalhos analisados, que o uso de resíduos se mostrou uma alternativa bastante viável e capaz de amenizar os impactos ocasionados pelo processo de fabricação do cimento, porém, essa é uma prática pouco utilizada pelo setor, porque a quantidade de resíduos disponíveis não atende toda a demanda pelo consumo do cimento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se:

- Realizar um estudo de forma mais aprofundada sobre os diferentes resíduos que possuem potencial para serem usados como materiais cimentícios suplementares.

7 REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Panorama do coprocessamento: uma tecnologia sustentável**. 2020. 20 p.

_____. Associação Brasileira de Cimento Portland. **COP-26: Indústria brasileira se destaca por pioneirismo**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cop-26-industria-brasileira-se-destaca-por-pioneirismo/>>. Acesso em: 10 nov. 2021.

_____. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697: Aglomerantes de origem Mineral**. Rio de Janeiro, 2018. 16 p.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. 2022. 54 p.

AMDA. Associação Mineira de Defesa do Ambiente. **Ciclo de vida do cimento**. Disponível em: <<https://www.amda.org.br/index.php/comunicacao/ciclo-de-vida/2767-ciclo-de-vida-do-cimento>>. Acesso em: 11 fev. 2022.

BBC. **COP-26: porque 1,5 é o número mais importante da cúpula das mudanças climáticas**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-59090783>>. Acesso em: 09 nov. 2021.

BERTANHA, C. F. **Quem mora aqui se adapta: entendimento público de riscos e práticas de convivência com a poluição do ar na FERCAL-DF**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Sociologia, UnB, Brasília, 2019.

BHUSHAN, C. **Challenge of the New Balance: a study of the six most emissions intensive sectors to determine India's low carbon growth options**. Centre for Science and Environment, 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010: institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

CANACEM. Camara Nacional del Cimento. **Proceso de producción**. Disponível em: <<https://canacem.org.mx/proceso-de-produccion/>>. Acesso em: 06 jan. 2022.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 499, de 06 de outubro de 2020.

COSTA, F. N. **Valorização do resíduo de construção civil por meio de sua incorporação ao processo de clínquerização**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

COSTA, F. N.; RIBEIRO, D. V. **Reduction of CO₂ emissions during cement production, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW)**. Journal of Cleaner Production, v. 276, paper 123302, 11p, 2020.

COPROCESSAMENTO. **O que é coprocessamento?** Disponível em: <<https://coprocessamento.org.br/sobre/o-que-e-coprocessamento/>>. Acesso em: 06 set. 2022.

CSI. Cement Sustainability Initiative. **CSI Progress Report**, 2012. Disponível em: <<http://csiprogress2012.org/>>. Acesso em: 19 dez. de 2022.

DUIC, H. CABEZAS, M. VUJANOVIĆ, AND MIKULČIĆ, H. **Environmental Assessment of Different Cement Manufacturing Processes Based on Energy and Ecological Footprint Analysis**. Journal of cleaner production. Elsevier Science Ltd, New York, 213-221, 2016.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-x e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. São Paulo. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

HER, S.; PARK, T.; ZALNEZHAD, E.; BAE, S. **Synthesis and characterization of cement clinker using recycled pulverized oyster and scallop shell as limestone substitutes**. Journal of Cleaner Production, v. 278, paper 123987, 13p, 2021.

IEA. International Energy Agency. **Cement technology roadmap plots path to cutting CO₂ emissions 24% by 2050**. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/news/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Cap. 6. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2.

ISWA. International Solid Waste Association. **O futuro do setor de gestão de resíduos: tendências, oportunidades e desafios para a década 2021 – 2030.** 2022. 30 p.

JOSEPH, A. M., SHAH, V., BISHNOI, S. **Protocol for prediction of durability of new cements: application to LC³.** Advances in cement research, 2015, pp. 403 – 409.

KLEIB, J.; AOUD, G.; ABRIAK, N. E.; Benzerzour, M. **Production of Portland cement clinker from French Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash.** Case Studies in Construction Materials, v. 15, paper e00629, 10p, 2021.

LAJES CONTIM. **Quem é o maior produtor de cimento do mundo?** Disponível em: < <https://www.lajescontim.com.br/telha/quem-e-o-maior-produtor-de-cimento-do-mundo.html>>. Acesso em: 05 nov. 2022.

LEI, Y.; ZHANG, Q.; NIELSEN, C.; HE, K. 2011. **An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990-2020.** Environ, 2011.

LIMA, André Barbosa de. **O processo produtivo do cimento Portland.** Especialização em Engenharia de Minas. UFMG, Belo Horizonte, 2011.

LUIZ, I. M. C. **Avaliação das emissões atmosféricas do setor de coprocessamento no estado de Minas Gerais: análise dos dados de automonitoramento.** TCC (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental. IFMG, 2016.

MAGALHÃES, F. A. C. **Construção do saber no programa de doutorado em contabilidade no Brasil: plataformas teóricas e motivações.** São Paulo, 2006. 98 p.

MARIANI, B. B.; ANDRADE NETO, J. da S.; AMORIM JÚNIOR, N. S. de; RIBEIRO, D. V. **Efeito da incorporação de resíduo de TiO₂ (MNR) na formação das fases mineralógicas de clínquer Portland.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2019.

MARTIRENA, J. F., SCRIVENER, K. L. **Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba.** Advances in cement research, 2015, pp. 323 – 329.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente.** Sustentabilidade em debate. v. 3, p. 75-96, 2012.

MEHRAJ, S. S., BHAT, G. A. **Cement factories, air pollution and consequences.** Marsland Press, New York, 2013.

NÓBREGA, A. K. C. **Formulação de pastas cimentícias com adição de suspensões de quitosana para cimentação de poços de petróleo.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2009.

PAULA, L. G. **Análise termo econômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de misturas de resíduos.** Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009, 159 p.

QUEIROZ, V. S. **Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO₂ na indústria do cimento:** um estudo comparativo entre o cimento LC³ e o cimento Portland Composto. TCC (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. UnB, 2018.

RAVELLI, A. P. X.; FERNANDES, G. C. M.; BARBOSA, S. F. F.; SIMÃO, E.; SANTOS, S. M. A.; MEIRELLES, B. H. S. **A produção do conhecimento em enfermagem e envelhecimento:** estudo bibliométrico. Florianópolis, 2009. 7 p.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; SANTOS, B. C. E. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.** Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

RODRIGUES, L. H. C. H. **Análise da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente na composição do cimento Portland.** 2018. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-UFES, Vitória, 2018.

RODRIGUES, M. F. C. **Uma análise preliminar da energia embutida no cimento considerando Brasil e Reino Unido.** Monografia (Especialização em Eficiência Energética). Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, Foz do Iguaçu, 2017, 26p.

RUVIARO, A.S.; SILVESTRO, L.; SCOLARO, T.P.; DE MATOS, P.R.; PELISSER, F. **Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production.** Journal of Cleaner Production, v. 327, paper 129484, 13p, 2021.

SAENSE. **Cimento:** produção pode ser menos agressiva ao ambiente. Disponível em: <<https://saense.com.br/2020/08/cimento-producao-pode-ser-menos-agressiva-ao-ambiente/>>. Acesso em: 27 nov. 2021.

SNIC. Sindicato Nacional das indústrias de cimento. **Coprocessamento.** Disponível em: <<http://snic.org.br/sustentabilidade-coprocessamento.php>>. Acesso em: 04 fev. 2022.

_____. Sindicato Nacional das indústrias de cimento. **Números do setor.** Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

SOARES, P. B.; CARNEIRO, T. C. J.; Calmon, J. L.; CASTRO, L. O. da C. de O. **Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 175-185, jan./mar. 2016. ISSN 1678-8621. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

STAJANCA, M.; ESTOKOVÁ, A. **Environmental impacts of cement production.** Technical University of Košice, Civil Engineering Faculty, Institute of Architectural Engineering, 2012.

STRIZHENOK, A. V.; IVANOV, A. V. **Ecological assessment of the current state of environmental components on the territory of the impact of cement production industry.** Journal of Ecological Engineering, v. 18, pp. 160 – 165, 2017.

VALDERRAMA, C., GRANADOS, R., CORTINA, J. L., GASOL, C. M., GUILLEM, M., JOSA, A. Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life – cycle assessment study. Journal Clean, v. 25, pp. 60 – 67, 2012.

VIZEDO, G.; PECCHIO M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da Indústria do cimento brasileira até 2050.** Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64p.

ZARHRI, Z.; ROSADO, M. W.; DOMINGUEZ, L. J.; VEGA, A. R. E.; CHAN, J. M.; PAMPLONA, S. B. (2022). **30 anos de investigações sobre concreto com adição de borracha (1990-2020). Uma análise bibliométrica.** Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 127 – 142.

ZHANG, C.; ZHANG, H.; CAI, X.; CHEN, L.; LIU, M.; LIN, H.; WANG X. **Characteristics of CO₂ and atmospheric pollutant emissions from China's cement industry: a life-cycle perspective.** Journal of Clean Production, v. 282, 10p, 2021.