

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SOROCABA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

LICENCIATURA EM QUÍMICA

Zilda Conceição da Silva

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS DE
CLÍNQUER: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA**

Sorocaba - SP

2021

Zilda Conceição da Silva

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS DE
CLÍNQUER: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como pré-requisito para a conclusão do curso
de Licenciatura em Química.

Orientação: Profa. Dra. Luciana Camargo de
Oliveira.

Coorientação: Mestranda Mayara de Almeida
Ribeiro Carvalho

Sorocaba - SP

2021

Silva, Zilda Conceição da

Coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer: uma revisão sistemática de literatura / Zilda Conceição da Silva -- 2021.
43f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Luciana Camargo de Oliveira

Banca Examinadora: Alexandre Donizeti Martins

Cavagis, Wander Gustavo Botero

Bibliografia

1. Coprocessamento de resíduos industriais . 2. Revisão sistemática de literatura. I. Silva, Zilda Conceição da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA - CCQL-So/CCTS

Rod. João Leme dos Santos km 110 - SP-264, s/n - Bairro Itinga, Sorocaba/SP, CEP 18052-780

Telefone: (15) 32296128 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 8/2021/CCQL-So/CCTS

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ZILDA CONCEIÇÃO DA SILVA

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS DE CLÍNQUER:
REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba

Sorocaba, 10 de novembro de 2021

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientadora	Profa. Dra. Luciana Camargo de Oliveira
Co-orientadora	Mestranda Mayara de Almeida Ribeiro Carvalho
Membro da Banca 1	Prof. Dr. Wander Gustavo Botero
Membro da Banca 2	Prof. Dr. Alexandre Donizeti Martins Cavagis



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Camargo de Oliveira, Docente**, em 10/11/2021, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Donizeti Martins Cavagis, Docente**, em 10/11/2021, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0520854** e o código CRC **063B9B64**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.020410/2021-48

SEI nº 0520854

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a professora Luciana C. de Oliveira pela orientação do trabalho e pela forma acolhedora que ela sempre demonstrou, à Mayara A. R. Carvalho que colaborou construtivamente e ativamente em todo o trabalho de forma precisa, eficaz e esclarecedora, aos professores Alexandre D. M. Cavagis e Wander G. Botero que aceitaram participar da avaliação de forma a contribuir com o crescimento do trabalho e a todos os professores da Universidade Federal de São Carlos – campus Sorocaba que contribuíram para minha formação acadêmica.

RESUMO

Com o avanço da industrialização, o atendimento às demandas atuais de uma sociedade cada vez mais ávida por consumo acaba gerando consequências sérias, como o aumento de rejeitos provenientes de processos industriais, assim como a necessidade de destinação deles. Nesse contexto, enquadra-se o coprocessamento, que faz uso de resíduos como matéria-prima e também na substituição energética, com base no conceito de reciclagem energética, tendo em vista que tais resíduos deixem de ser um problema para fazer parte da solução, como na substituição de combustíveis fósseis. Devido ao fato de tais resíduos apresentarem perigos em potencial, torna-se necessário um controle rigoroso do processo, para garantir conformidade com limites pré-estabelecidos como seguros. Assim, neste trabalho, foi realizada uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), a fim de identificar os riscos potenciais do coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer. A metodologia fundamentou-se na utilização da base de dados *ScienceDirect*, fazendo o uso de filtros específicos para obtenção dos resultados. Os resultados obtidos indicaram os principais riscos em potencial: poluentes orgânicos persistentes (POPs), elementos potencialmente tóxicos (antiga denominação para metais pesados), gases do efeito estufa (GEE) e emissão de dióxido de carbono. Os POPs podem ser gerados com maior frequência com o uso de resíduos industriais e necessitam de controle rigoroso de sua efetiva destruição, devido à sua toxicidade. Os elementos potencialmente tóxicos, devido ao alto potencial de risco ao ambiente e à saúde, devem ser controlados na entrada e saída, para que suas emissões estejam em níveis considerados aceitáveis. Os GEE e CO₂ são emitidos no processo de fabricação de cimento convencional e com uso do coprocessamento, porém, no coprocessamento, há uma diminuição da emissão desses gases, pela substituição dos combustíveis convencionais. Além disso, a adição de compostos provenientes da parte inorgânica do resíduo pode interferir ou não em algumas propriedades do cimento, devido às características específicas desses compostos, podendo ocorrer alterações preocupantes, dependendo da composição do resíduo. A vizinhança das cimenteiras e a saúde dos trabalhadores devem ser monitoradas rotineiramente, a fim de se evitar a contaminação do ambiente e trabalhadores pelos compostos que podem ser emitidos de diversas formas quando o coprocessamento faz parte do processo. Dessa forma, considerando os riscos ambientais e à saúde que o coprocessamento pode gerar, é importante o controle efetivo de todas as etapas, visando a torná-lo o mais seguro possível e efetivar o objetivo principal dessa atividade, que é

a reciclagem energética para benefício ambiental, fazendo com que haja melhor entendimento dos riscos potenciais do coprocessamento de resíduos industriais.

Palavras-chave: coprocessamento; cimento; *blend*; resíduos industriais.

ABSTRACT

With the advance of industrialization, meeting the current demands of a society that is increasingly avid for consumption ends up generating serious consequences, such as the increase in wastes from industrial processes, as well as the need to dispose them. In this context it is included co-processing, which makes use of wastes as raw materials and also in energy replacement, based on the concept of energy recycling, aiming at such wastes no longer be a problem, but rather part of the solution, as in the replacement of fossil fuels. Due to the fact that such residues present potential hazards, a rigorous control of the process must be made, to assure compliance with the pre-defined safe limits. Thus, in this work, a systematic literature review was carried out, in order to identify the potential risks of industrial waste co-processing in clinker kilns. The methodology was based on using the ScienceDirect database, with specific results filters. The results obtained indicated the main potential risks: persistent organic pollutants (POPs), potentially toxic elements (old name for heavy metals), greenhouse gases (GHG) and carbon dioxide emissions. POPs can be generated more frequently with the use of industrial waste and require strict control of their effective destruction, due to their toxicity. Potentially toxic elements, due to the high potential of risk to the environment and health, must be controlled at entry and exit, so that their emissions be at levels considered acceptable. GHG and CO₂ are emitted in the conventional cement manufacturing process and using co-processing, however, in co-processing, there is a reduction in the emission of these gases, by replacing conventional fuels. Furthermore, the addition of compounds from the inorganic part of the residue can or cannot interfere on some cement properties, due to the specific characteristics of these compounds, which may cause unsettling changes, depending on the residue's composition. The surroundings of cement plants, as well as the health of workers must be routinely monitored, in order to avoid contamination of the environment and workers by compounds, which can be emitted in different ways, when co-processing takes part in the process. Thus, considering the environmental and health risks that co-processing can generate, it is pivotal to effectively control all the steps, aiming to make it as safe as possible and consolidate the main objective of this activity, which is the energy recycling for environmental benefit, with a better understanding of the potential risks of co-processing industrial waste.

Keywords: co-processing; cement; blend; industrial waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de preparação de resíduos para coprocessamento	17
Figura 2 – Representação das etapas de fabricação do clínquer.....	19
Figura 3 - Forno rotativo de clínquer.....	20
Figura 4 - Participação na produção de cimento por regiões do Brasil.....	26
Figura 5 - Esquema de etapas da RSL.....	27
Figura 6 – Relação do número de publicações por riscos potenciais do coprocessamento.....	29
Figura 7 - Percentual de emissão de CO ₂ global em 2018 por tipo de indústria.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
As	Arsênio
Ba	Bário
CaO	Óxido de cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
Cd	Cádmio
Co	Cobalto
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Cr	Cromo
CRQ	Conselho Regional de Química
Cu	Cobre
DDT	Diclorodifeniltricloroetano
ECP	Equipamento de Controle de Poluição
EPT	Elemento Potencialmente Tóxico
EVQ	Estudo de Viabilidade de Queima
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro III
GEE	Gases do Efeito Estufa
Hg	Mercúrio
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Mn	Manganês
Ni	Níquel
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
Pb	Chumbo

PCOP	Principais Composto Orgânicos Perigosos
PCDD	Dibenzo- <i>p</i> -dioxinas policloradas
PCDF	Dibenzofuranos policlorados
PCB	Bifenilas policloradas
Pd	Paládio
POP	Poluente Orgânico Persistente
Pt	Platina
PTQ	Plano de Teste de Queima
Rh	Ródio
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
Sb	Antimônio
Se	Selênio
SiO ₂	Dióxido de silício
Sn	Estanho
Te	Telúrio
THC	Hidrocarbonetos Totais
Tl	Tálio
V	Vanádio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 O Coprocessamento	16
2.2 Preparo de Resíduos para Coprocessamento	16
2.3 Produção do Clínquer	18
2.4 Legislação Brasileira	21
3 METODOLOGIA	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Gases do Efeito Estufa (GEE) e Emissão de CO ₂	30
4.2 Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs).....	31
4.3 Elementos potencialmente tóxicos (antiga denominação de metais pesados).....	33
4.4 Propriedades do cimento	34
4.5 Vizinhança das cimenteiras e saúde dos trabalhadores	35
5 CONCLUSÕES/ CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Os processos de todo e qualquer segmento industrial geram resíduos que possuem composição baseada dependendo de sua proveniência e que possuem características diversas e específicas e, como são considerados rejeitos, é necessário que ocorra um gerenciamento correto para que não causem danos ao meio ambiente e à saúde humana. Algumas décadas atrás (até a década de 1970), estes resíduos gerados mundialmente eram livremente manuseados e lançados principalmente em corpos de água e via atmosfera com o intuito de dispersar os poluentes provenientes desses resíduos sem levar em consideração as consequências destas ações e ignorando ou desconhecendo os riscos que poderiam vir a trazer (SIMIÃO, 2011).

Com a conexão dos países por meio da globalização e com a revolução tecnológica, o desenvolvimento sustentável passou a ser amplamente requerido, inclusive para que as empresas, em alguns casos, se mantenham e/ou ingressem no mercado. Isso resultou na incorporação da sustentabilidade pelas grandes empresas para, entre outros motivos, apresentarem maior visibilidade, tendo como maior desafio conciliar sua parte competitiva com sua gestão ambiental, ou seja, produzir com responsabilidades social e ambiental (SOUZA; SILVA, 1997).

Para auxiliar a criação de um sistema de gestão ambiental completo e referenciar um padrão internacional foi criada a série de normas ISO 14000, a qual estabelece requisitos necessários e comuns, dos quais empresas que os seguem de forma adequada podem ser certificadas e com isso se manter, em muitos casos, competitivas no mercado nacional e internacional. O Sistema de Gestão que esta série de normas propõe é baseado principalmente no ciclo PDCA (do acrônimo em inglês *Plan, Do, Check, Action* - planejar, fazer, checar e agir) tendo como objetivo principal a melhoria contínua do processo. Nela, o processo inteiro é considerado, incluindo a disposição e eliminação correta de todos os resíduos gerados (SOUZA; SILVA, 1997).

Desta forma, o gerenciamento de resíduos industriais, principalmente os considerados perigosos, tem-se tornado um tema ambiental muito importante. O crescente número de geração desses resíduos tem acompanhado o crescente número de empresas e isto exige que sejam utilizadas soluções mais eficazes por parte de seus geradores e da sociedade de uma forma geral, para dar-se a destinação mais correta possível de forma que cause o menor impacto ambiental. Como a indústria cimenteira tem uma grande capacidade de operação, ela tem grande potencial na contribuição de destinação desses resíduos gerados, por meio da atividade de coprocessamento (SOUZA; SILVA, 1997)

O cimento é um dos principais *commodities* mundiais e seus principais produtores atualmente são a China, Estados Unidos da América (EUA) e a Índia. Os seus processos de fabricação abrangem etapas conhecidas como calcinação (reação química de decomposição térmica) e fusão (mudança do estado sólido para o estado líquido) a altas temperaturas (aproximadamente 2000 °C) em fornos rotativos utilizados nas indústrias cimenteiras, sendo o principal material calcinado o calcário, que neste processo irá produzir o clínquer que posteriormente passará por outros processos e no final resultará no produto que conhecemos como cimento. Devido, principalmente, às altas temperaturas alcançadas no forno rotativo de clínquer, as cimenteiras demandam um grande consumo de altos volumes de combustíveis, normalmente fósseis, para gerar o calor necessário para manter estas altas temperaturas (ROCHA; LINS; SANTO, 2011). O uso de combustíveis fósseis neste setor, que é muito grande, gera impactos significativos ao ambiente a partir da emissão de gases de efeito estufa, principalmente emissão de dióxido de carbono.

Até aproximadamente 50 anos atrás, no setor cimenteiro, os únicos combustíveis utilizados para garantir a elevada temperatura do forno rotativo eram combustíveis fósseis, sendo o principal deles o coque. Quando o conceito de sustentabilidade começou a ser amplamente discutido, impulsionado principalmente pelo aspecto econômico, novas alternativas foram estudadas. Com isso, algumas cimenteiras passaram a receber os resíduos industriais para destruí-los em seus fornos e contribuir ambientalmente, gerando energia para seu processo por meio da queima desses resíduos. (ROCHA; LINS; SANTO, 2011). Os resíduos industriais também chamados de resíduos sólidos industriais conforme resolução CONAMA 313/2002 são considerados materiais sólidos, semi-sólidos, gases contidos ou líquidos que sobram nos processos industriais e que não possam ter seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d'água. (BRASIL, 2002)

A atividade de coprocessamento corresponde a queima de resíduos e/ou mistura de resíduos, também denominado *blend* em reator rotativo de clínquer. Os resíduos são processados nos reatores rotativos em virtude das condições específicas do processo, como temperatura elevada, ambiente alcalino, atmosfera oxidante, ótima mistura de gases e produtos, e tempo de residência, geralmente suficiente para a destruição de resíduos perigosos. Sendo o uso destes resíduos limitados a uma quantidade que proporcione segurança ambiental (ROCHA; LINS; SANTO, 2011). Essa quantidade varia em função de uma série de fatores, mas principalmente com relação à composição química do resíduo e como esta afeta a qualidade do cimento e a emissão de poluentes gasosos, que deve estar dentro dos níveis da legislação ambiental vigente (BELATO, 2013).

No coprocessamento, a combinação de resíduos é feita de forma a se obter um material combinado com funcionalidade superior a simples mistura de componentes e, neste processo, os resíduos são fisicamente modificados de uma maneira a não alterar a sua estrutura química, ou seja, não é visado que ocorram reações químicas.

Este processo de tratamento de resíduos assemelha-se a incineração, tendo tempos de residência e temperatura maiores que o processo de incineração convencional, além disto, outra diferenciação é que a energia gerada no processo da queima é proveniente do material que seria descartado, resultando em um tipo de reciclagem energética (FERRARI, 2002).

O coprocessamento é um processo que vem sendo utilizado há aproximadamente 45 anos na Europa, Estados Unidos e Japão. Milhares de toneladas de resíduos industriais perigosos e não perigosos são coprocessados em fornos de cimento em todo o mundo anualmente. Já no Brasil, seu início foi mais tardio e se deu no começo dos anos de 1990, sendo a região Sudeste a que possui o maior número de unidades licenciadas para este fim (GUIMARÃES, 2015).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é identificar os riscos potenciais do coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer, a partir da Revisão Sistemática de Literatura (RSL).

2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Coprocessamento

Na modalidade de aproveitamento de rejeitos, também conhecida como coprocessamento, a indústria faz o aproveitamento dos resíduos como fonte energética ou substituição de matéria prima por meio da queima dos mesmos com a agregação do que sobra da queima ao clínquer. A prática favorece a destinação adequada de rejeitos oriundos de outras atividades e processos industriais e, além disso, proporciona a redução da utilização de coque de petróleo ou outros combustíveis não renováveis tradicionais como óleos e gases combustíveis ou o carvão mineral.

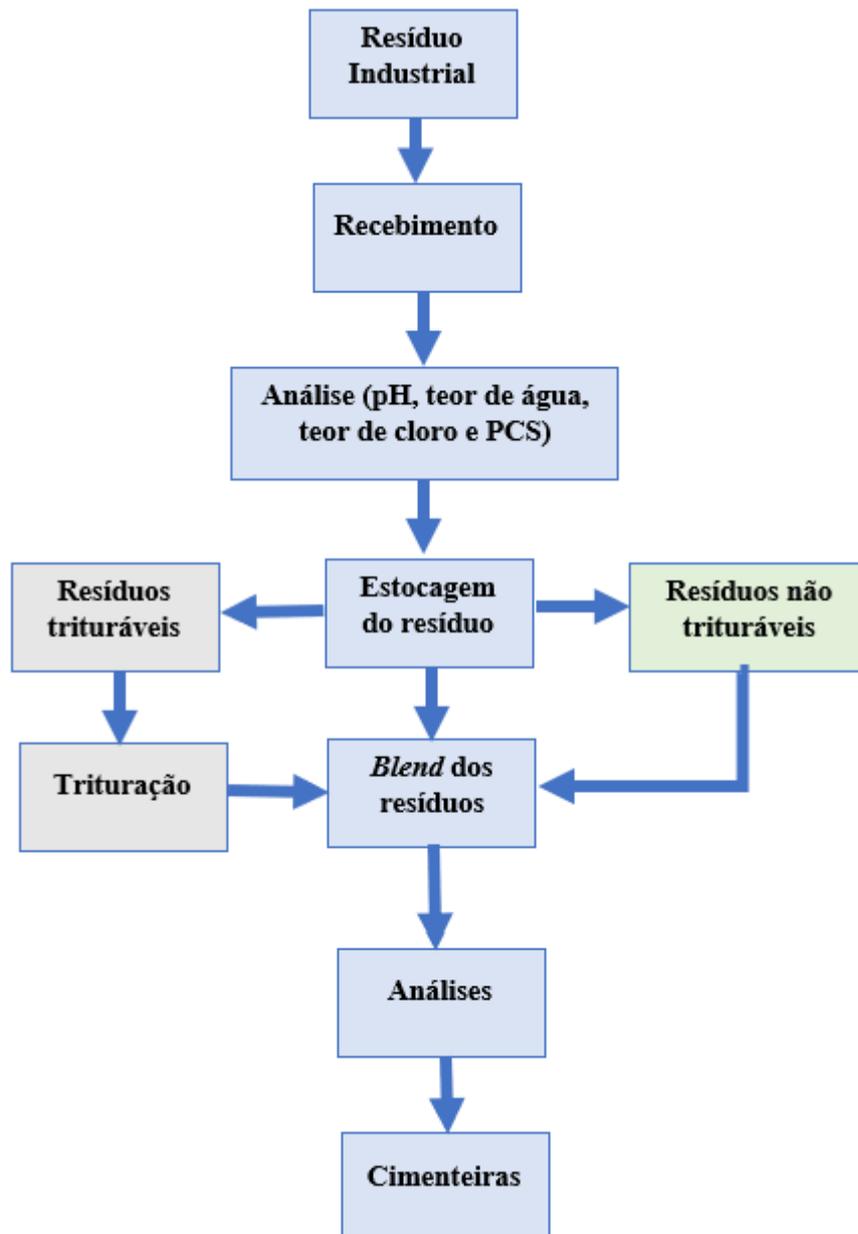
De acordo com o CRQ IV (Conselho Regional de Química, 2015), os fornos industriais apresentam alta eficiência na destruição de materiais por atingirem temperaturas máximas de 2000°C e manterem temperaturas constantes acima dos 1200 °C por períodos de 4 a 6 segundos. Tais condições de temperatura extrema nos fornos de clínquer os tornam eficientes destruidores de resíduos orgânicos e uma alternativa segura, eficaz e adequada para a destruição térmica de resíduos provenientes da indústria bem como de passivos ambientais.

O CRQ IV aponta o pioneirismo da Noruega em destinação de seus resíduos, utilizando a tecnologia de coprocessamento em fornos de clínquer, sendo as indústrias químicas as primeiras a fazer uso dessa prática. Tamanho sucesso desta prática proporcionou a inexistência de incineradores na Noruega devido ao fato de os resíduos industriais serem destruídos em fornos de clínquer.

2.2 Preparo de Resíduos para Coprocessamento

As atividades de preparo dos materiais para coprocessamento compreendem segregação dos materiais, preparo e mistura. Estas etapas têm por objetivo o adequado direcionamento dos materiais às diferentes vias de alimentação dos fornos. De forma geral, as etapas do processo seguem um fluxo genérico conforme esquema indicado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas de preparação de resíduos para coprocessamento



Fonte: Adaptado de LIG Entulho, 2021

Na etapa de blendagem, os resíduos são segregados, descaracterizados, misturados e triturados em proporções determinadas de maneira a ter as características e composições físico-químicas homogêneas e necessárias para enquadramento como um “*blend*” (termo em inglês, que significa composto ou mistura de diversas coisas). Este processo tem por objetivo fornecer energia para a produção de cimentos. Conforme ocorre a queima, o *blend* fornece a energia necessária para a formação do clínquer, que é o precursor do cimento. As cinzas decorrentes da queima também são aproveitadas, sendo agregadas ao produto complementando os demais materiais utilizados.

De acordo com (CRQ IV, 2015),

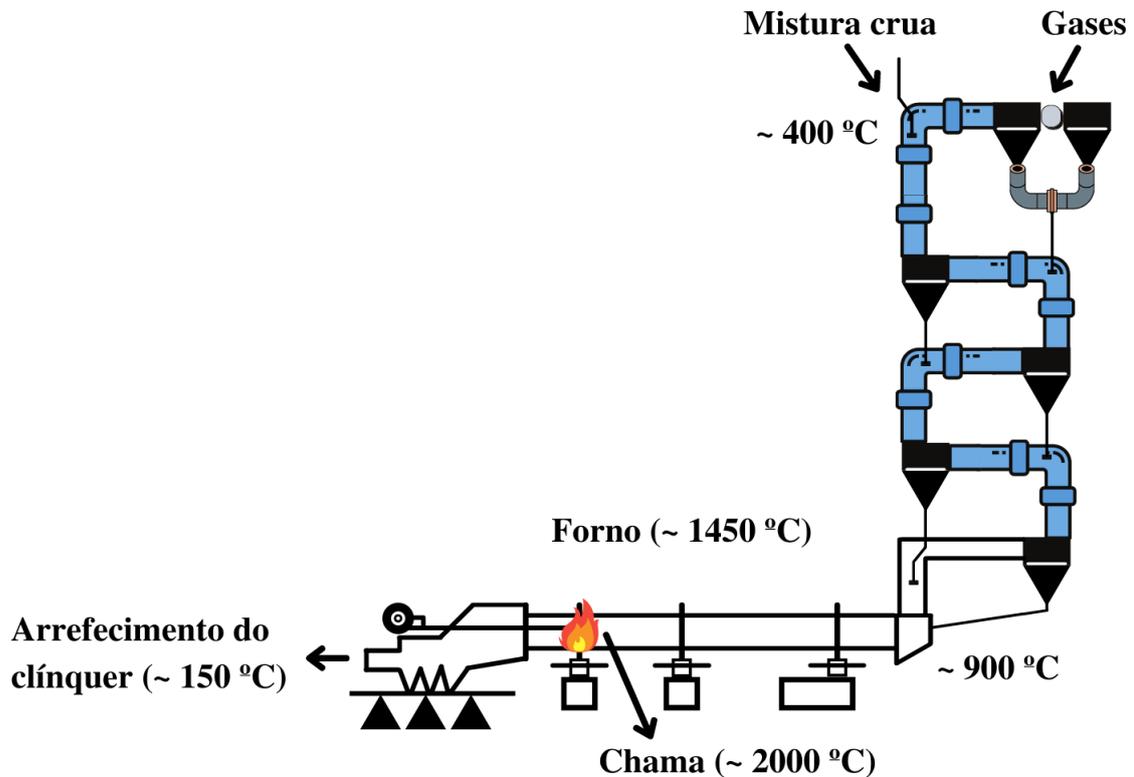
Entre os constituintes da massa bruta que necessitam de especial atenção, tem-se:

- Cloro – forte agente oxidante, podendo corroer chapas, além de ocasionar bloqueios no circuito de gases, especialmente nos ciclones e na caixa de fumaça, e/ou gerar dioxinas e furanos nas emissões;
- Flúor e alumínio – ótimos fundentes; em excesso, podem aderir às partes mais frias do forno;
- Chumbo – retarda a pega do cimento (tempo para início do endurecimento) e, durante o coprocessamento, parte do chumbo é emitida com os gases;
- Zinco – aumenta o tempo de pega do cimento;
- Cromo – reduz a viscosidade do material fundido e provoca coloração no cimento; pode causar dermatite no trabalhador da construção civil;
- Enxofre – degrada o refratário do forno.

2.3 Produção do Clínquer

A fase de produção do clínquer inicia-se no pré-aquecimento nas torres de ciclone onde as temperaturas variam entre 400°C e 900°C. Os fornos são alimentados pelo topo da torre de ciclone, a montante do forno horizontal, conforme esquema indicado na Figura 2.

Figura 2 – Representação das etapas de fabricação do clínquer

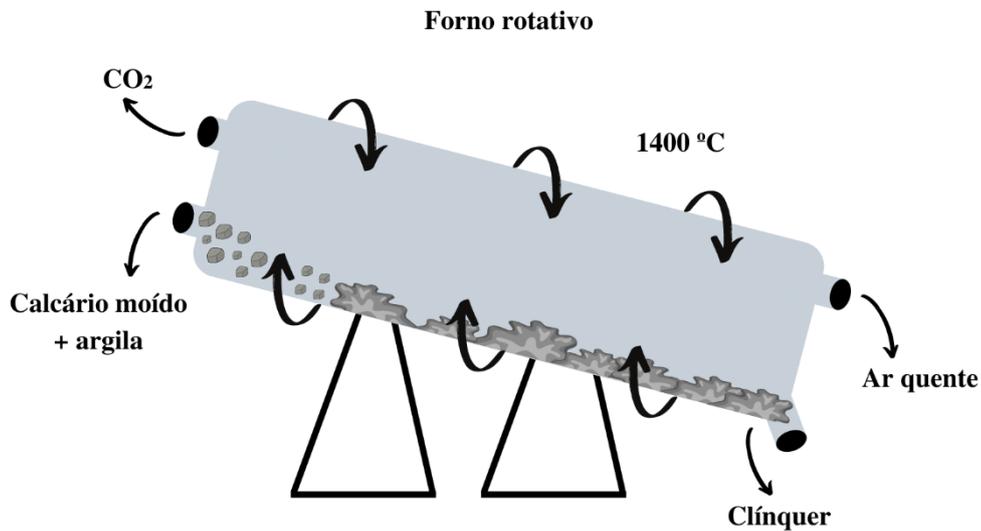


Fonte: Adaptado de Sobrinho, 2016

Durante todo o processo, parte do material que entra na torre transforma-se em gás carbônico. Devido às transformações físico-químicas decorrentes da elevada temperatura proporcionada pelo maçarico, responsável pela queima de combustível, o cru se transforma em um insumo finamente pulverizado, que está pronto para entrar no forno.

A passagem pelo forno, que rotaciona sob inclinação (Figura 3) faz com que o material passe lentamente por cocção. A chama do forno atinge temperatura de 2000° C e o material próximo a queima atinge entre 1300~1500° C. (SOBRINHO, 2016).

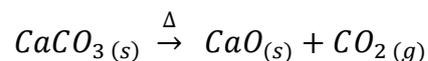
Figura 3 - Forno rotativo de clínquer



Fonte: Adaptado de Timperley, 2018

Desta cocção resulta o clínquer, um produto semelhante a pequenas esferas escuras.

Da calcinação resulta a liberação de CO₂ proveniente da transformação do carbonato de cálcio (CaCO₃) em óxido de cálcio (CaO). Cerca de metade das emissões produzidas pela indústria de cimento são decorrentes da reação de transformação do calcário em cal:



Ao sair do forno, o clínquer passa por arrefecedores onde a massa com temperatura de 1200°C resfria até chegar aproximadamente aos 150°C. O calor liberado nesta etapa é recuperado, melhorando o rendimento térmico do processo. A brusca diminuição de temperatura nos arrefecedores é importante para conferir características desejáveis ao cimento. (SOBRINHO, 2016)

Após o forno de clínquer estar licenciado para a queima de resíduos através do coprocessamento, a alimentação dos resíduos ou *blend* de resíduos pode ocorrer em pontos do processo como a torre de ciclone, porém deve ser levado em consideração as temperaturas alcançadas neste ponto para garantir que seja eficiente na destruição segura do resíduo,

usualmente é instalada a linha de alimentação junto ao maçarico por este ser o ponto de maior temperatura do forno.

2.4 Legislação Brasileira

No Brasil o coprocessamento está regulamentado por resoluções de nível federal, estadual e municipal, sendo os órgãos estaduais competentes responsáveis pela fiscalização e pelo processo de licenciamento dessa prática, cabendo a eles um papel de suma importância na manutenção das práticas corretas e do rigor necessário para desempenho da atividade.

O principal texto a respeito da atividade de coprocessamento a nível federal é:

1. Resolução CONAMA n° 499/20 – Define procedimentos, critérios e aspectos técnicos específicos de licenciamento ambiental para o coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento.

Conforme definição das resoluções, os resíduos detentores de poder calorífico ou que contribuam na substituição de matérias-primas no processo produtivo do clínquer são passíveis de coprocessamento. A variedade de materiais viáveis para destruição nos fornos de clínquer é ampla, sendo alguns deles:

- Pneus usados e emborrachados;
- Tintas e solventes, borras gordurosas, graxas e óleos, resinas, colas e látex;
- Revestimentos de cubas de alumínio;
- Sobras de madeira, papéis e plásticos;
- Lodo de estações de tratamento de efluentes;
- Terras contaminadas;
- Grãos vencidos;
- Rejeitos de varrição de fábrica e partículas geradas ao longo do processo produtivo.

Entretanto existem restrições a alguns materiais com relação aos teores de algumas substâncias e, por motivos que inviabilizam a utilização de certos materiais com potencial de emissão de resíduos tóxicos tais como:

- Resíduos radioativos,
- Resíduos explosivos;
- Resíduos provenientes de serviços de saúde com exceção dos medicamentos;
- Resíduos provenientes do processo de produção da indústria farmacêutica;
- Resíduos descaracterizados para tratamentos que alterem suas propriedades físicas, físico-químicas, químicas ou biológicas.

A Resolução CONAMA/MMA nº 499, de 06 de outubro de 2020 é a resolução que determina como deve ocorrer o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos, nesta resolução são descritas as etapas:

- I - Estudo de Viabilidade de Queima - EVQ;
- II - Plano de Teste em Branco;
- III - Relatório de Teste Branco;
- IV - Plano de Teste de Queima - PTQ;
- V - Relatório de Teste de Queima; e
- VI - Análise de Risco.

Nestas etapas são apresentados o que deve ser verificado, monitorado e controlado visando que todo o processo de licenciamento ocorra da forma mais correta possível em vista que os impactos ambientais sejam minimizados ao máximo.

Um dos pontos apresentado é a seleção dos Principais Compostos Orgânicos Perigosos - PCOPs a serem monitorados no teste de queima a fim de ser comprovado que o processo de queima do resíduo nos fornos rotativos de clínquer irá destruir efetivamente este Composto Orgânico Perigoso selecionado a fim de demonstrar que o processo inteiro será eficiente na sua finalidade. Esta seleção deve ser baseada no grau de dificuldade de destruição, sua toxicidade e concentração no resíduo do PCOPs. Sendo que eles são analisados no resíduo aprovado para o teste de queima antes do início do teste e durante o teste é analisado no efluente gasoso para avaliar essa eficiência da destruição que deve ser de no mínimo 99,99% o que indicará que a destruição do resíduo em si será eficiente naquele processo e condições.

Antes do início dos testes é verificado o correto funcionamento do sistema de intertravamento que é utilizado para interromper a alimentação de resíduo caso algum dos monitoramentos contínuos ultrapassem os valores máximos que devem ser ajustados no equipamento conforme o especificado na legislação. Os monitores contínuos exigidos são para controle e monitoramento de: CO, O₂, temperatura e pressão do sistema forno, taxa de alimentação do resíduo e parâmetros operacionais dos ECPs (Equipamentos de Controle de Poluição). O intertravamento deve estar ajustado para interromper a alimentação de resíduo caso ocorra: emissão acima dos limites previstos nesta resolução dos poluentes monitorados continuamente; queda da temperatura normal de operação, pressão positiva no forno; falta de energia elétrica ou queda brusca de tensão; queda de teor de O₂ no sistema; mau funcionamento dos monitores e registradores de temperatura, O₂, CO ou THC e interrupção do funcionamento do ECP e temperatura de entrada do precipitador eletrostático superior a 200° C.

A etapa I – EVQ: consiste em um planejamento em que são verificadas as capacidades da planta em questão de fabril, de pessoas etc. a fim de ser avaliado se as etapas seguintes têm condições de serem realizadas.

A etapa II – Plano de Teste em Branco: consiste no planejamento e execução do teste em branco que consiste no funcionamento usual da planta com o controle dos parâmetros que também serão avaliados no Teste de Queima de forma a conseguir comparar os resultados.

A etapa III – Relatório de Teste em Branco: consiste na elaboração de um relatório com os resultados dos parâmetros analisados no teste em branco, sendo que as análises são realizadas por terceiros.

A etapa IV – Plano de Teste de Queima: aborda o planejamento do teste com a inclusão de resíduo no processo e tendo os mesmos parâmetros do teste em branco analisados para fins comparativos.

A etapa V – Relatório de Análise de Queima: relatório com os resultados obtidos também por terceiros e com os mesmos parâmetros do Teste em Branco.

A etapa VI – Análise de Risco: abrange a análise comparativa entre os dois testes realizados de forma a avaliar os riscos que serão adicionados junto o processo de coprocessamento para verificar se é viável e se permanece dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

Na Tabela 1 são apresentados os limites máximos de emissão estabelecidos na resolução CONAMA 499/20.

Tabela 1 - Limites máximos de emissão de poluentes para coprocessamento conforme resolução CONAMA/MMA 499 de 06 de outubro de 2020

Poluente	Limites Máximos de Emissão ¹
Material Particulado	50 mg/Nm ³ corrigido a 11% O ₂
HCl	10 mg/Nm ³ corrigido a 10% O ₂
HF	5 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
THC (expresso como propano) ²	39 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
Mercúrio (Hg)	0,05 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
Chumbo (Pb)	0,35 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
Cádmio (Cd)	0,10 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
Tálio (Tl)	0,10 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)	7,0 mg/Nm ³ corrigido a 7% O ₂
NO _x (expresso como NO ₂) ³	800 mg/Nm ³ corrigido a 10% O ₂
SO _x (medido como SO ₂)	280 mg/Nm ³ corrigido a 11% O ₂ , exceto quando o enxofre for proveniente da matéria prima. Nesses casos, o limite máximo se baseará no valor de SO _x calculado da seguinte forma: - Para um teor de até 0,2% de SO ₃ na farinha: 400 mg/Nm ³ , expresso como SO ₂ ; - Para um teor entre 0,2% e 0,4% de SO ₃ na farinha, conforme a fórmula abaixo: 400 /Nm ³ + (%SO ₃ -0,2).4000 mg/Nm ³ , expresso como SO ₂ ; - Para um teor acima de 0,4% de SO ₃ na farinha: 1.200 mg/Nm ³ , expresso como SO ₂ .
Dioxinas e furanos ⁴	0,1 ng/Nm ³ corrigido a 10% O ₂

¹ Valores expressos nas condições normais de temperatura e pressão (0° C e 1 atm), em base seca.
² Considerando o monitoramento contínuo.
³ Fornos licenciados após 02/01/2007 deverão atender ao limite estabelecido na Resolução CONAMA 382/06.
⁴ Dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetraclorodibenzo-p-dioxina).

Fonte: BRASIL, 2020

Na Resolução, as unidades de mistura e pré-condicionamento de resíduos são tratadas como aquelas que promovem a mistura de resíduos a fim de formar um *blend* ou pré condicionar esses resíduos a serem utilizados como substituto energético. Estas unidades podem ser chamadas de blendeiras devido a sua atividade. Para que possam funcionar, é necessário também que sejam licenciadas pelo órgão regional competente. Já o CONAMA 499/20 regulamenta as informações básicas no âmbito federal que devem ser apresentadas para que esse licenciamento ocorra, sendo assim não somente é necessário que a cimenteira esteja

licenciada, a unidade que fizer essa mistura e pré-condicionamento também deve seguir padrões pré-estabelecidos de forma a garantir que o processo, desde geração até destruição térmica desse resíduo, esteja dentro da conformidade ambiental.

Dentre as informações necessárias que devem ser apresentadas para o licenciamento dessas unidades destacam-se:

- Descrição dos principais produtos ou serviços prestados;
- Planta, em escala mostrando a localização das áreas, a fim de identificar as áreas com resíduos que devem ser avaliadas;
- Descrição dos procedimentos de recepção, amostragem e análises, estocagem, manuseio e disposição de resíduos que sejam gerados no processo;
- Caracterização e classificação dos resíduos recebidos, quantificação de cada resíduo;
- Laudos de análises químicas e físicas de cada resíduo e cópia do plano de análise;
- A origem e a caracterização do resíduo;
- Métodos de amostragem e análise utilizados com respectivos limites de detecção, de acordo com as normas vigentes;
- Os parâmetros analisados em cada resíduo;
- Incompatibilidade com outros resíduos a fim de evitar reações indesejadas que possam caracterizar riscos ambientais como liberação de efluentes gasosos e riscos ao processo que incluem riscos à segurança do trabalhador.

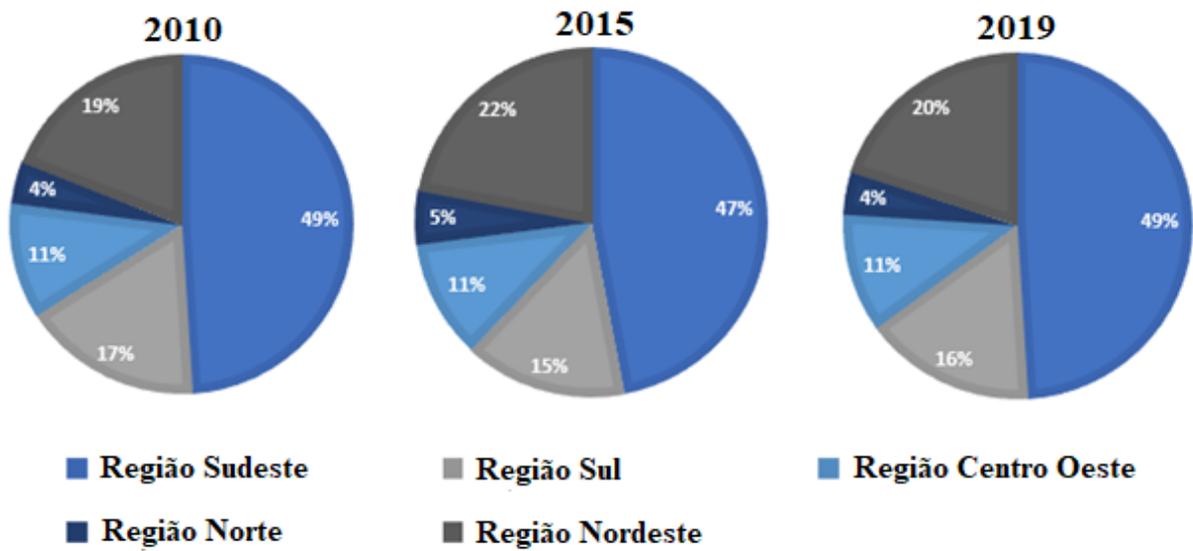
Na Resolução CONAMA 499/20, não são definidos os parâmetros analisados nos resíduos das unidades blendeiras nem a periodicidade a que esses testes devem ser realizados, mesmo tratando-se de resíduos que podem ter uma variação considerável de composição caso o processo do qual é proveniente tenha uma significativa mudança, ou seja, em teoria, o resíduo pode ser o mesmo em nome, mas não em composição.

Pelo teste de queima, acompanhado por órgão regulador competente, é realizada a análise de viabilidade de coprocessamento. Juntamente com as indústrias geradoras o fabricante de cimento deve considerar a viabilidade técnico-comercial levando em consideração a quantidade adequada, estado físico, forma de transporte e acondicionamento na recepção e os parâmetros físico-químicos de interesse para o beneficiamento e atendimento às normas regulatórias (BRASIL, Resolução n.º 499 de 2020).

Já os testes em branco e de queima são gerenciados pelas agências governamentais de cada estado, sendo, por exemplo, a do estado de São Paulo a CETESB e do Paraná o IAP, sendo esses dois órgãos de suma importância por estarem na região Sudeste, onde se tem a maior

participação na produção de cimento e conseqüentemente na de coprocessamento também (Figura 4).

Figura 4 - Participação na produção de cimento por regiões do Brasil

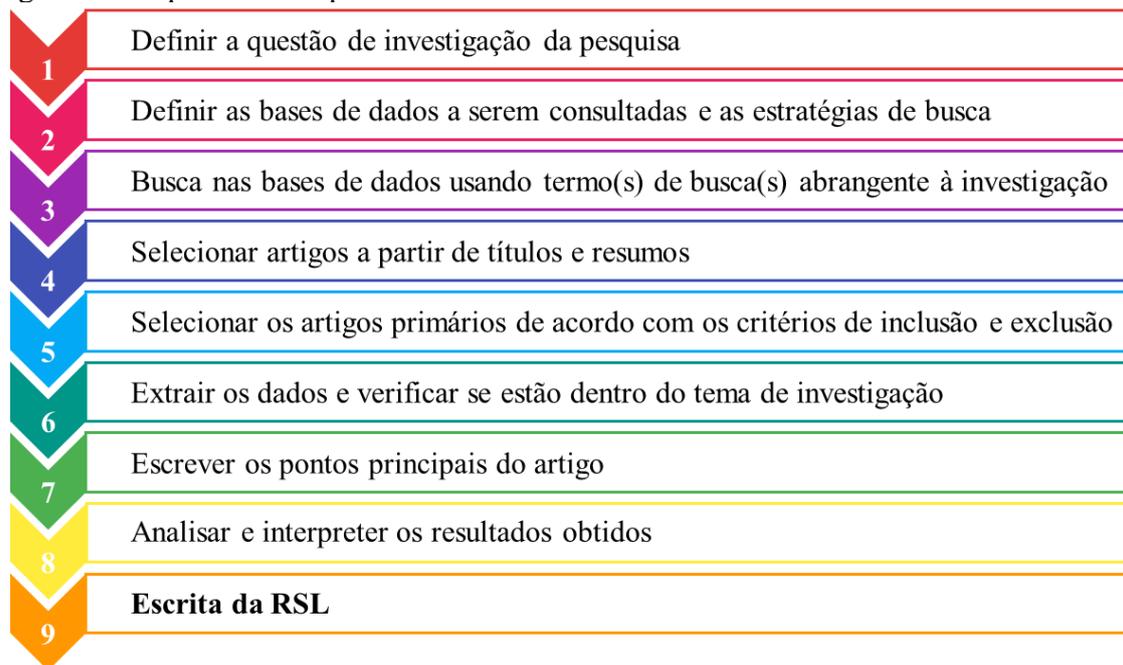


Fonte: Adaptado de SNIC, 2019

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa do trabalho foi a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) (Figura 5), a qual rege um tipo de pesquisa orientada que segue protocolos pré-estabelecidos e que visa apresentar resultados a partir dos dados de outros pesquisadores. Neste tipo de revisão, as bases de dados bibliográficas utilizadas, as estratégias de busca, o processo de seleção de artigos científicos incluindo os critérios de inclusão e exclusão e o processo de análise de cada um deles, assim como as limitações de cada artigo, bem como as limitações da própria revisão são apresentados de forma a tornar possível a reprodução caso seja desejado pelo leitor, ou seja, a RSL possui alto nível de evidência e se constitui em um importante documento para tomada de decisão nos contextos públicos e privados, sendo uma pesquisa científica composta por seus próprios objetivos, problemas de pesquisa, metodologia, resultados e conclusão (GALVÃO; RICARTE, 2019).

Figura 5 - Esquema de etapas da RSL



Fonte: autoria própria a partir de Galvão e Ricarte (2019)

A realização da pesquisa foi iniciada com o preenchimento do quadro lógico (objetivo geral, questão de investigação da pesquisa, objetivos específicos, metodologia, dados a serem coletados e resultados a serem obtidos) para serem definidos os pontos principais e o rumo a ser seguido na pesquisa.

A questão de investigação da pesquisa foi “Quais são os riscos potenciais do coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer?”. A base de dados consultada foi a *ScienceDirect* a partir do Portal Periódicos CAPES e nesta base de dados foi utilizado o termo chave de busca “*co-processing of hazardous industrial waste in clinker kilns*” o qual resultou em 390 resultados que foram refinados com as opções:

- Período: 2010 – 2021;
- Tipo de artigo: *review articles* e *research articles*;
- Áreas temáticas: *energy, environmental Science, engineering, material Science, Chemical engineering, Earth and planetary sciences, chemistry, agricultural and biological sciences.*

Como critérios de inclusão foram considerados artigos sobre coprocessamento com uso de resíduos industriais, considerando os perigosos e os não perigosos e os critérios de exclusão foram considerados artigos que não falavam sobre coprocessamento de resíduos industriais e que apresentavam somente sobre o processo de fabricação de cimento e somente com o uso de resíduos urbanos.

Dos 390 artigos retornados, foi realizada a leitura dos títulos e dos resumos e aqueles nos quais o título já demonstrou critérios de exclusão explícitos o resumo não era lido, para o restante o resumo foi lido e resultaram em 54 artigos selecionados. Desses 54 artigos, após a leitura completa de todos, foi verificado que 43 deles estão dentro dos critérios para utilização no trabalho e 11 artigos foram excluídos porque o assunto não se enquadrava no objetivo do trabalho.

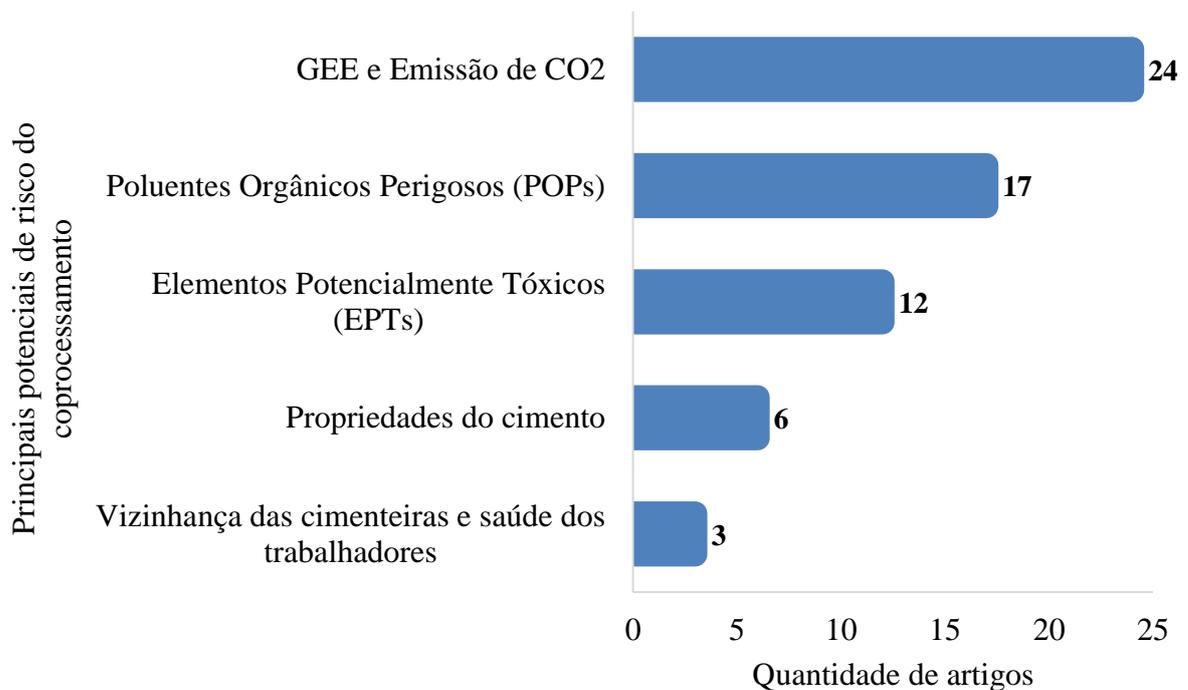
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das etapas estabelecidas na Revisão Sistemática de Literatura e utilizando a base de dados *ScienceDirect*, a pesquisa resultou em 43 artigos, sendo que dentre eles os pontos de discussão ficaram focados em 5 principais riscos potenciais do coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer conforme a seguir:

- GEE e Emissão de CO₂;
- Poluentes Orgânicos Perigosos (POPs);
- Elementos potencialmente tóxicos (EPTs);
- Propriedades do cimento;
- Vizinhança das cimenteiras e saúde dos trabalhadores.

A distribuição dos riscos por número de publicações encontra-se na Figura 6, em que é possível verificar que a maior parte das publicações tem por objetivo apresentar riscos ambientais do coprocessamento levando em consideração a possibilidade de contaminação ambiental de forma a tentar garantir que esse processo seja mais benéfico do que prejudicial ao ambiente e levando em conta também a questão de saúde humana e a interferência das propriedades do cimento.

Figura 6 – Relação do número de publicações por riscos potenciais do coprocessamento



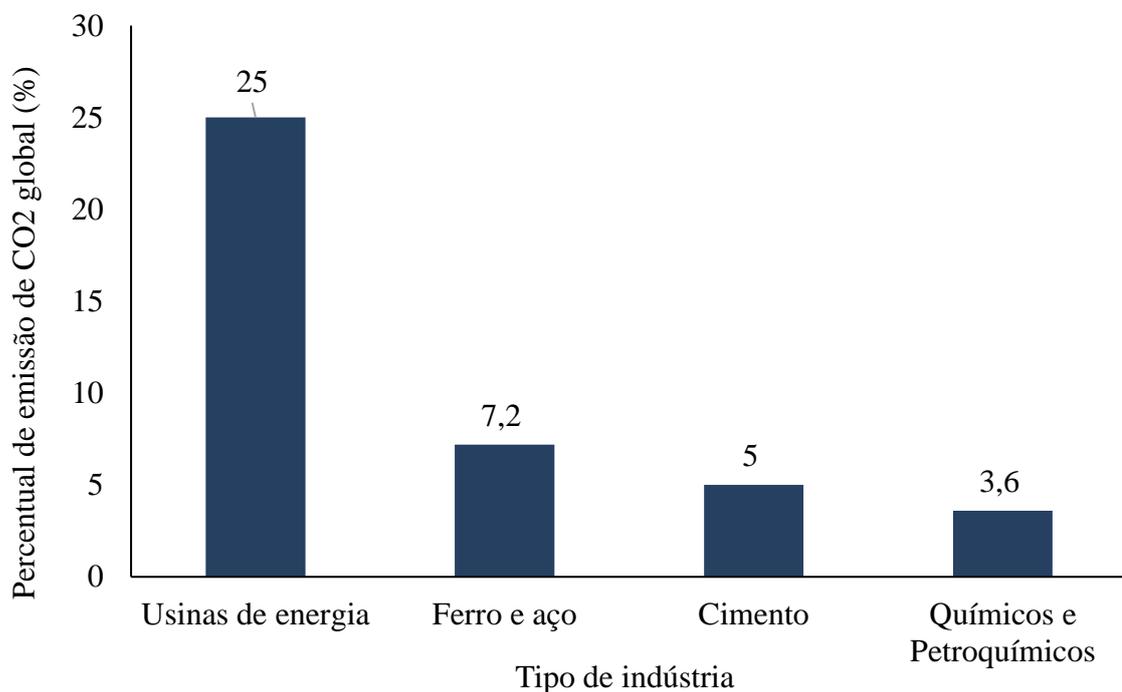
Fonte: Autoria própria a partir da base de dados *ScienceDirect* (2021)

4.1 Gases do Efeito Estufa (GEE) e Emissão de CO₂

Do total de 43, mais da metade dos artigos, 24 artigos abordaram a emissão de gases do efeito estufa (GEE), particularmente sobre o dióxido de carbono que é emitido durante todo o processo de fabricação de cimento e que tem uma quantidade significativa de emissão desses gases.

A indústria de cimento necessita de uma grande quantidade de consumo de combustível e com isso torna-se uma fonte intensa de emissão de gases do efeito estufa (GEE) que contribui com o aumento da temperatura global, estando entre as principais fontes industriais de emissão e dióxido de carbono, conforme a Figura 7, o que justifica a necessidade de procurar formas de diminuir a emissão desses gases que são prejudiciais. Na indústria de cimento o CO₂ é gerado principalmente em 4 fontes diferentes: decomposição do calcário em cal, queima de combustíveis fósseis, consumo de eletricidade nas fábricas e da refrigeração (BENHELAL; SHAMSAEI; RASHID, 2021).

Figura 7 - Percentual de emissão de CO₂ global em 2018 por tipo de indústria



Fonte: Adaptado de Benhelal; Shamsaei; Rashid, 2021

A substituição de carvão (combustível fóssil) por resíduos perigosos reduz os impactos ambientais associados aos GEE, porém em contrapartida podem aumentar outros impactos ambientais como emissão de outros poluentes e afetar a saúde. Nesse processo é importante o

estudo e verificação de porcentagem de substituição de combustíveis por resíduos para mitigar danos. (HOLT; BERGE, 2018).

Conforme descrito nos artigos, quando o combustível de origem fóssil é substituído por resíduos, a base destes pode não ser de hidrocarbonetos o que já contribui para a diminuição de CO₂, além disso promove a diminuição de queima desses combustíveis e conseqüentemente da emissão de CO₂ proveniente deles, economizando assim matéria prima virgem para este fim e a emissão de CO₂ desta não ocorre. Caso o resíduo utilizado no coprocessamento fosse enviado para aterro sanitário, este emitiria CO₂ somado ao CO₂ emitido do combustível de origem fóssil que seria utilizado no forno, ou seja, ocorre uma diminuição indireta.

Analisando essas perspectivas, os autores dos 24 artigos avaliaram que o uso de resíduos em fornos de clínquer e cimento contribuem para a diminuição da emissão de dióxido de carbono o que é de grande interesse visto que esse é um dos gases que contribuem amplamente para o efeito estufa, dessa forma o coprocessamento contribui beneficamente no quesito ambiental para este fim.

4.2 Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs)

Os Poluentes Orgânicos Persistentes (POP) são substâncias orgânicas sintéticas que possuem uma combinação particular de características físicas e químicas, tais como: semivolatilidade, persistência, bioacumulação e toxicidade. Temos como exemplo o diclorodifeniltricloroetano – DDT, bifenilas policloradas (PCBs), dioxinas (PCDD) e furanos (PCDF) (SÃO PAULO, CETESB, 2021). Esses compostos orgânicos que podem ser gerados durante o processo das cimenteiras, em especial quando ocorre o coprocessamento de resíduos perigosos, tendo grande potencial de tornarem poluentes danosos ao ambiente. Por serem considerados perigosos é necessário que seja verificada e comprovada a eficácia de sua destruição durante o processo de formação de clínquer no forno rotativo com eficiência de destruição que seja o mais próximo possível de 100% devido aos riscos que a emissão desses compostos pode causar.

Durante o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer para substituição de matéria prima ou de combustíveis é importante que seja feita essa avaliação considerando o principal (mais prejudicial e/ou complexo) POP para comprovar que este tenha um alto índice de destruição para que o coprocessamento não se torne prejudicial para o ambiente e para a população das proximidades.

Na avaliação dos artigos foi verificado que dentre um total de 43, 17 publicações abordam o assunto sobre os POPs discursando sobre as dioxinas, furanos, DDT e PCBs com o objetivo principal de definir se o uso de resíduos no processo de fabricação de clínquer ambientalmente é seguro.

Nos artigos que discutem sobre os POPs um dos pontos mais comentados e importantes é a avaliação da injeção dos resíduos em diversos pontos de alimentação do processo. Quando o resíduo entra junto com a farinha na torre de alimentação e com uma temperatura de aproximadamente 400 – 900° C e em outros pontos do forno rotativo onde se obtêm uma maior temperatura, essa diferença na temperatura pode significar um maior índice de destruição desses compostos.

O ponto de alimentação de resíduos que é mais eficiente na destruição desses POPs é a injeção na chama do maçarico do forno, pois é nesse ponto que se apresenta a maior temperatura (aproximadamente 2000° C) que proporciona a melhor destruição devido à alta temperatura e as condições do forno de tempo de residência e ambiente alcalino e oxidante (YANG et al., 2021)

O coprocessamento em fornos de clínquer são perfeitos para o uso de borra de óleo no quesito ambiental, pois devido as altas temperatura do forno (zona de clínquer 1450 °C e chama 1800°C) fazem com que hidrocarbonetos de alta massa molar tenham uma queima completa e proporciona a remoção de cloro de dioxinas e furanos, tornando-o um processo ecologicamente seguro. (HUANG et al., 2017)

As Dibenzo-p-dioxinas policloradas e os dibenzofuranos policlorados (PCDD / PCDF) também conhecidos como dioxinas e furanos são um grupo de compostos orgânicos perigosos, emitidos principalmente por fontes antropogênicas (causadas pela ação do homem) que são gerados involuntariamente durante o processo de combustão (ASSUNÇÃO; PESQUERO, 1999) e que requerem bastante cuidado.

Com a substituição de 10% de matéria prima por solo contaminado com pesticida diclorodifeniltricloroetano (DDT) foi verificado na publicação que não aumentava as emissões de dioxinas e furanos em consideração com os valores emitidos no processo sem resíduo e a quantidade determinada eram encontradas principalmente nas cinzas de chaminé formados principalmente devido a baixas temperaturas a que eram submetidas, daí a importância da alimentação em pontos adequados (YANG et al., 2021)

A composição da matéria prima, teor de cloro, bromo e temperatura também afetam a formação de POP, dioxinas e furanos. É por isso que, no ponto de alimentação adequado e com

as condições do forno como tempo de residência e ambiente alcalino, o coprocessamento torna-se um processo válido (YANG, L.et al., 2019).

As altas temperaturas e condições como tempo de residência de 4 a 6 segundos e ambiente alcalino e oxidante do forno proporcionam que, além de borras de óleos, outros resíduos também tenham sua queima realizada com segurança sem a emissão de compostos perigosos resultantes do processo, sendo de grande importância que seja considerado o ponto de injeção e características do material, como por exemplo, o teor de cloro (que em elevadas quantidades no resíduo de origem podem promover a formação de compostos perigosos) e também o controle de PCB's (bifenilas policloradas) que tem sua queima restrita pelo grande potencial de durante sua queima formarem dioxinas e furanos (CRQ IV, 2016). Sendo assim, para coprocessamento no Brasil, há uma pequena quantidade de tolerância aceitável em termos de traços/concentração, porém materiais com esses compostos (PCB's) tem processos específicos recomendados para seu descarte, que afinal tem seu uso proibido devido ao alto potencial de risco e foram substituídos, porém ainda podem ser encontrados no descarte de materiais que antigamente tinham seu uso.

4.3 Elementos potencialmente tóxicos (antiga denominação de metais pesados)

Durante a fabricação do cimento, diversas matérias primas como a farinha são adicionadas no forno rotativo de clínquer em condições específicas para a sua produção, que posteriormente com a adição de outros compostos formará o cimento, porém essas matérias primas e o combustível utilizado no forno contém quantidades de metais que ficam dentro da especificação do local onde ocorre. Com a realização do coprocessamento, novos materiais são adicionados a esse processo e estes também contém quantidades desses elementos potencialmente tóxicos, incluindo os metais que podem ser prejudiciais em determinadas concentrações. Devido a esse resíduo ser submetido a altas temperaturas ele sofrerá combustão, resultando na parte orgânica “destruída” e a parte inorgânica “retida” ao clínquer e assim adicionada ao cimento, podendo contribuir positivamente ou negativamente ao cimento. Nesse processo, há metais que serão adicionados ao clínquer e os mais voláteis que serão emitidos e, por isso, é necessário conhecer esses elementos presentes no resíduo para controlar os limites máximos e verificar se é possível, dependendo da concentração do metal específico, verificar se pode ser utilizado como substitutivo de matéria prima.

Os metais podem ser encontrados nas matérias primas e combustíveis e uma parte acaba sendo emitida, e por serem persistentes podem provocar bioacumulação na cadeia alimentar. A

exposição constante a elevadas concentrações pode provocar efeitos danosos ao ambiente e saúde e por isso é importante ser verificado se suas emissões estão dentro dos limites estabelecidos a fim de segurança. Os metais são classificados em ordem de toxicidade: Classe I: Cd, Hg e Tl; Classe II: As, Co, Ni, Se e Te; e Classe III: Pb, Cr, Cu, Pt, V, Sn, Pd, Sb, Mn, e Rh, sendo os de classe I mais tóxicos e classe III menos tóxicos (ARFALA et al., 2018).

Os metais também podem ser classificados em 3 categorias: os mais voláteis: Cd, As, Zn e Pb, os semi-voláteis: Pb, Ni, Cu, Cr e Ba e os não voláteis: V e Mn, o que faz uma escala dos metais da ordem dos materiais que acabam saindo nos materiais particulados gerados (YANG, Z et al., 2019). O coprocessamento pode causar o enriquecimento de elementos potencialmente tóxicos em materiais particulados, por exemplo, o que pode causar danos mais graves à qualidade do ar e ao ambiente, por isso é tão importante o monitoramento do processo e o uso de ferramentas de controle como os filtros que retém os materiais particulados.

Nas publicações utilizadas para esse trabalho não foram relatados resultados de aumentos significativos que ultrapassassem os limites máximos de elementos potencialmente tóxicos nas emissões do processo com o uso de resíduos. Quando foi relatado o aumento de emissão desses elementos foi indicado que permaneceram dentro dos limites estabelecidos, o que reforça a necessidade do monitoramento correto da atividade de coprocessamento para garantir que esses limites de emissão não sejam ultrapassados e garantir a preservação do meio ambiente e da população afetada.

Nas publicações foi encontrado o termo *heavy metal (HM)* – metal pesado, porém desde 1980 já vem sendo recomendado a alteração para o termo elemento potencialmente tóxico (EPT) na comunidade científica, por ser um termo mais correto considerando que o termo metal pesado induz a considerar o elemento como tóxico em todos os aspectos, sendo que nem todos tem toxicidade em todas as suas formas e concentrações. Alguns elementos apenas têm potencial de toxicidade, ou seja, podem ser tóxicos em algumas situações, não em todas, tendo assim justificada a alteração para um termo mais correto. (POURRET; HURSTHOUSE, 2019).

4.4 Propriedades do cimento

Quando se trata das propriedades do cimento, o coprocessamento deve ter os resíduos e/ou mistura de resíduos bastante controlados e selecionados, pois principalmente resíduos com grande quantidade de determinados elementos e/ou compostos químicos podem trazer alterações as propriedades do clínquer e conseqüentemente as propriedades do cimento. Dessa forma, a caracterização do resíduo antes de ser coprocessado e o amplo conhecimento do

processo são necessários para minimizar as possíveis interferências que podem ocorrer devido ao uso de certos resíduos no coprocessamento.

Em casos específicos, os resíduos podem ter quantidades elevadas de determinados elementos químicos. Como é o caso de alguns tipos de lodo de esgoto que contêm grandes quantidades de fósforo (P) e quando utilizado no coprocessamento aumenta a estabilidade das estruturas belite, o que conseqüentemente retarda a cristalização do alite, afetando o tamanho dos cristais dos dois, devido a redução da viscosidade da fase intersticial, proporcionando essas variações no clínquer (RODRIGUÉZ et al., 2013),

Em contrapartida existe resíduos que apresentam composição de compostos de SiO_2 , CaO , Al_2O_3 e Fe_2O_3 que são importantes matérias primas para a fabricação do clínquer e que, dessa forma, não contribuem para alteração das propriedades dele, somente servem como substitutivo de matéria prima (VICZEK et al., 2020).

Dessa forma, quando ocorre o coprocessamento é necessário se atentar as propriedades físicas e químicas do clínquer para não ocorrer alteração nas propriedades do cimento de forma a prejudicar suas características e propriedades.

4.5 Vizinhança das cimenteiras e saúde dos trabalhadores

Nas cimenteiras, durante a fabricação de clínquer, ocorrem diversos processos que podem gerar conseqüências adversas como a emissão de materiais particulados, metais potencialmente tóxicos e compostos orgânicos perigosos. Esses tipos de emissões podem causar danos ao ambiente e à saúde dos trabalhadores e dos moradores da região onde a cimenteira está localizada. Guimarães et al. (2018) relata que o coprocessamento, parte de um conceito de desenvolvimento sustentável em que se tem o objetivo de reverter o desperdício de outras indústrias, visto que esses resíduos utilizados no coprocessamento em muitos casos seriam descartados e destinados para fins onde fosse necessário o acréscimo de uma técnica de destruição como a incineração e nesse processo ainda seria gerado um resíduo (o resíduo que sobraria da queima) para ser destinado normalmente para aterro. Já no coprocessamento, isso não ocorre, além de gerar energia, o que sobra da queima é agregado ao clínquer, não gerando resíduos desse processo e esse agregado, em alguns casos, ainda contribui significativamente para as propriedades posteriores do cimento, se tornando um processo eficaz para a destinação de resíduos perigosos.

Nem todos os locais por onde podem ser alimentados os resíduos no forno de clínquer são adequados para o coprocessamento. Existem pontos de alimentação que chegam a altas

temperaturas, maçarico, que proporciona condições específicas para a destruição de resíduos perigosos e não perigosos com a mínima emissão de compostos orgânicos perigosos.

Na indústria de cimento, assim como em outros tipos de indústrias, os trabalhadores podem estar expostos a agentes físicos, químicos e biológicos e/ou materiais que representem riscos à saúde. Neste setor a poeira, a poeira contendo sílica cristalina e o ruído são as três exposições de risco as quais os trabalhadores ficam expostos, sendo necessário garantir condições de trabalho adequadas, seguras e saudáveis devido à alta taxa de acidentes ocorrentes nesse tipo de empresa, que podem ser evitados a partir do treinamento e correta instrução dos trabalhadores. (GUIMARÃES et al. 2018)

No artigo de Guimarães et al. (2018) foi avaliada a percepção dos trabalhadores sobre o clima de segurança onde trabalham e o entendimento sobre o processo incluindo a atividade que exercem, assim como a relação com a vizinhança visto que muitas cimenteiras ficam em locais onde pessoas residem em áreas próximas. Como a produção sustentável é baseada em trabalhadores bem informados e treinados para conseguirem realizar corretamente e com segurança seu trabalho a fim de não provocar acidentes, danos à saúde e nem ao ambiente, quanto maior o entendimento a questões relacionadas a estes pontos mais seguro ele se torna por que os trabalhadores entendem a importância de seu trabalho e a necessidade da realização correta, diminuindo erros de produção. Para este fim, em indústrias cimenteiras é necessário que os trabalhadores entendam como fatores como poluição do ar, ruídos, condições de segurança de trabalho, saúde, compromissos da empresa com a proteção do ambiente, conhecimento mais específico do coprocessamento, pontos de alimentação correto dos resíduos e as formas corretas de alimentação de quem realiza o processo são necessários para o procedimento funcionar da melhor maneira possível. O entendimento das pessoas que moram em regiões próximas é importante para cobrar a correta contenção e monitoramento de materiais particulados e emissão de gases que se não estiverem sendo realizados corretamente podem influenciar diretamente de forma negativa em sua saúde e no ambiente em que vivem.

5 CONCLUSÕES/ CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos com a RSL foi possível apontar 5 principais riscos potenciais do coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer e estes estão associados principalmente à área ambiental, demonstrando as ações benéficas e de riscos que podem ocorrer quando se faz o uso de resíduos industriais para este fim, justificando o quão é necessário o controle e fiscalização dessa atividade para que seja exercida sem prejudicar o ambiente.

Os principais riscos identificados foram: emissão de gases do efeito estufa (GEE) e emissão de CO₂, que devido a substituição de combustível fóssil por resíduos que teriam destinação que geraria GEE, deixam de emitir esse adicional de GEE e CO₂ pois esse resíduo que já emitiria os gases substitui esse combustível fóssil que deixa de emitir; Principais poluentes orgânicos persistentes (POPs), que são compostos orgânicos perigosos que podem ser gerados no processo e que devem ser controlados e ter a garantia de sua destruição eficiente no maior percentual possível sendo o ideal próximo a 100 % devido ao potencial de risco que esses compostos apresentam; Elementos potencialmente tóxicos, que devido a suas características de bioacumulação e toxicidade devem ter o controle a partir da entrada no processo pois uma parte é agregada ao cimento e a outra emitida ao ambiente e nenhuma dessas deve ultrapassar dos limites estabelecidos pelas normas vigentes do local visando proporcional o maior grau de segurança; Propriedades do cimento, que devido a parte inorgânica resultante da queima que é agregada ao cimento devem ser verificadas a fim de não serem prejudicadas as propriedades dele e a Vizinhança das cimenteiras e saúde dos trabalhadores, que devem ser levadas em consideração devido ao potencial de risco que o coprocessamento pode gerar como a emissão de compostos perigosos, materiais particulados contaminados, metais perigosos, etc. devido a isso a segurança na fábrica e entendimento dos trabalhadores sobre o processo como ponto de alimentação correto do resíduo é necessário para garantia do processo mais seguro possível para o ambiente, trabalhadores e vizinhança.

Com a pesquisa foi possível verificar que quando o coprocessamento é realmente tratado com cuidado, conhecendo os pontos positivos e negativos, acaba-se tendo o entendimento que é um processo que apresenta mais pontos positivos do que negativos quando realizado de forma controlada e corretamente, pois sua realização sem controle pode provocar danos graves ao ambiente, saúde proveniente dos poluentes que podem ser gerados e propriedades do cimento por meio da adição de compostos provenientes da queima de resíduos. É necessário muito conhecimento do resíduo e do processo em si para mitigar esses riscos.

Como os resíduos são gerados de diversos processos que possuem distintas particularidades em suas composições, os mesmos são os mais abrangentes possíveis e devido ao grande volume de material que é gerado como rejeito nas indústrias de todos os segmentos, é necessário que estes tenham uma correta destinação e que essa provoque os menores impactos possíveis e o coprocessamento visa minimizar estes impactos pela reciclagem energética e/ou substituição de matéria prima.

Mesmo a pesquisa apresentando uma quantidade significativa de resultados, ainda é necessário que muitos estudos e pesquisas específicas sobre o assunto sejam realizados, justificado pela grande quantidade de resíduos que são gerados e entender suas particularidades contribui para o avanço da adição de novos resíduos ao processo.

REFERÊNCIAS

AMES, M. *et al.* Polychlorinated dibenzo(p)dioxin and furan (PCDD/F) congener profiles in cement kiln emissions and impacts. **Science of the Total Environment**. v. 419, p. 37 - 43, 2012.

ARFALA, Y. *et al.* Assessment of heavy metals released into the air from the cement kilns co-burning waste: Case of Oujda cement manufacturing (Northeast Morocco). **Sustainable Environment Research**. v. 28, p. 363 - 373, 2018.

ASSUNÇÃO, J. V.; PESQUERO, C. R. Dioxinas e furanos: origens e riscos. **Revista de Saúde pública**. v. 33, n. 5, p. 523 – 530, 1999.

BAIDYA, R.; GHOSH, S. K; PARLIKAR, U. V. Co-processing of industrial waste in cement kiln – a robust system for material and energy recovery. **Procedia Environmental Sciences**. v. 31, p. 309 - 317, 2016.

BELATO, M. N. Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais, 2013. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais.

BENHELAL, E.; SHAMSAEI, E.; RASHID, M. I. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. **Journal of Environmental Sciences**. v. 104, p. 84 - 101, 2021.

BENHELAL, E. *et al.* Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**. v. 51, p. 142 - 161, 2013.

BOGUSH, A. A. *et al.* Co-processing of raw and washed air pollution control residues from energy-from-waste facilities in the cement kiln. **Journal of Cleaner Production**. v. 254, p. 119924, 2020.

BRASIL, CONAMA/MMA Resolução nº. 499, de 2020. Licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em de fornos rotativos de produção de clínquer. **Diário Oficial da União**, n.194, Seção 1, p.50, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>. Acesso em: 20 out. 2021.

BRASIL, CONAMA Resolução nº. 313, de 2002. **Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais**. Diário Oficial da União, n.226, Seção 1, p. 85-91, out. 2002. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=331. Acesso em: 16 nov. 2021.

BRASIL, CONAMA Resolução nº. 316, de 2002. **Procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**. Diário Oficial da União, n.224, Seção 1, p. 92-95, nov. 2002. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>. Acesso em: 28 set. 2021.

CHATTERJEE, A; SUI, T. Alternative fuels – Effects on clinker process and properties. **Cement and Concrete Research**. v. 123, p. 105777, 2019.

CLAVIER, K. A. *et al.* Risk and performance assessment of cement made using municipal solid waste incinerator bottom ash as a cement kiln feed. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 146, p. 270 - 279, 2019.

Conselho Regional de Química IV REGIÃO (CRQ IV). **Aspectos Jurídicos E Técnicos Da Política Nacional De Resíduos Sólidos**. SÃO PAULO, 2015. 51 p.

CRAVIOTO, J. *et al.* Benefits of a regional co-processing scheme: The case of steel/iron and cement industries in Vietnam, Laos, and Cambodia. **Journal of Cleaner Production**. v. 312, p. 127702, 2021.

FERRARI, Ronaldo. **Coprocessamento de Resíduos Industriais em Fornos de Clínquer**, 2002. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Coprocessamento-apostila-Itambe2014.pdf>. Acesso em: 02 out. 2021.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão Sistemática de Literatura: Conceituação, Produção e Publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**. v. 6, n. 1, p. 57 – 73, 2019.

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.

GUIMARÃES, A. G. *et al.* Co-processing of hazardous waste: The perception of workers regarding sustainability and health issues in a Brazilian cement company. **Journal of Cleaner Production**. v. 186, p. 313 - 324, 2018.

GUIMARÃES, André Gomes. **Coprocessamento de resíduos perigosos em uma indústria cimenteira no Brasil: a percepção dos trabalhadores e aspectos de saúde ocupacional**, 2015. Dissertação (Mestrado) – Cidadania Ambiental e Participação, Universidade Aberta. Lisboa - Portugal.

HASHEM, F. S.; RAZEK, T. A; MASHOUT, H. A. Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry. **Construction and Building Materials**. v. 212, p. 275 - 282, 2019.

HOLT, S. P.; BERGE, N. D. Life-cycle assessment of using liquid hazardous waste as an alternative energy source during Portland cement manufacturing: A United States case study. **Journal of Cleaner Production**. v. 195, p. 1057 - 1068, 2018.

HUANG, M. *et al.* Evaluation of oil sludge as an alternative fuel in the production of Portland cement clinker. **Construction and Building Materials**. v. 152, p. 226 - 231, 2017.

JIN, R. *et al.* Source identification and quantification of chlorinated and brominated polycyclic aromatic hydrocarbons from cement kilns co-processing solid wastes. **Environmental Pollution**. v. 242, p. 1346 - 1352, 2018.

JIN, R. *et al.* Variations and factors that influence the formation of polychlorinated naphthalenes in cement kilns co-processing solid waste. **Journal of Hazardous Materials**. v. 315, p. 117 - 125, 2016.

KARPAN, B.; RAMAN, A. A. A.; AROUA, M. K. T. Waste-to-energy: Coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 149, p. 655 – 664, 2021.

KARSTENSEN, K. H. *et al.* Test burn with PCB–oil in a local cement kiln in Sri Lanka. **Chemosphere**. v. 78, p. 717 - 723, 2010.

KISHAN, G. S. *et al.* Life cycle assesment on tire derived fuel as alternative fuel in cement industry. **Materials Today: Proceedings**. v. 47, p. 5483 - 2548, 2021.

LAMAS, W. Q.; PALAU, J. C. F.; CAMARGO, J. R. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 19, p. 200 - 207, 2013.

LIG Entulho. Parceiros: Coprocessamento. Disponível em: <https://www.ligentulho.com.br/parceiros/coprocessamento>. Acesso em: 13 out. 2021.

MARTOS, J. L. G.; SCHOENBERGER, H. An analysis of the use of life cycle assessment for waste co-incineration in cement kilns. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 86, p. 118 - 131, 2014.

MIKULCIC, H. *et al.* Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of Cleaner Production**. v. 136, p. 119 - 132, 2016.

NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. S. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. **Journal of Cleaner Production**. v. 231, p. 856 - 871, 2019.

PARLIKAR, U. *et al.* Effect of Variation in the Chemical Constituents of Wastes on the Co-processing Performance of the Cement Kilns. **Procedia Environmental Sciences**. v. 35, p. 506 - 512, 2016.

POURRET, O.; HURSTHOUSE, A. It's time to replace the term “heavy metals” with “potentially toxic elements” when reporting environmental research. **Int. J. Environ. Res. Public Health**. v. 16, 4446, 2019.

RAHMAN, A. *et al.* Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview. **Procedia Engineering**. v. 56, p. 393 - 400, 2013.

RENÓ, M. L. G. *et al.* Exergy analyses in cement production applying waste fuel and mineralizer. **Energy, Conversion and Management**. v. 75, p. 98 - 104, 2013.

RICHARDS, G.; AGRANOVSKI, I. E. Dioxin-like pcb emissions from cement kilns during the use of alternative fuels. **Journal of Hazardous Materials**. v. 323, p. 698 - 709, 2017.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; SANTO, Belinizir Costa do Espírito. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer: revisão de literatura. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v.16, n.1, p. 1 - 10, 2011.

RODRÍGUEZ, N. H. *et al.* The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production. **Journal of Cleaner Production**. v. 52, p. 94 - 102, 2013.

SÃO PAULO, CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/centroregional/a-convencao/poluentes-organicos-persistentes-pops/> Acesso em: 20 out. 2021.

SIMIÃO, Juliana. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma empresa de usinagem sobre o enfoque da produção mais limpa**, 2011. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SINGH, G. V. P. B.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. **Journal of Cleaner Production**. v. 239, p. 108024, 2019.

SNIC. Relatório anual do Sindicato da Indústria do cimento. 2019. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf. Acesso em: 19 out. 2021

SOBRINHO Picui. Etapas do processo de fabricação. Disponível em <http://sobrinhopicui.blogspot.com/2016/11/etapas-do-processo-de-fabricacao-de.html>. 2016. Acesso em 18 out. 2021.

SOUZA, Mônica Regina de; SILVA, Rogério José da. **A Geração de Resíduos Industriais e sua Destinação Final**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, Gramado, 1997. Anais do ENEGEP. Gramado: ABEPRO, 1997. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1997_T6501.PDF. Acesso em: 14 out. 2021.

TIMPERLEY, J. Q&A: Why cement emissions matter for climate change. **Carbon Brief: Clear on Climate**. 2018. Disponível em <https://www.carbonbrief.org/qa-why-cement-emissions-matter-for-climate-change>. Acesso em 11 out. 2021.

TSILIGIANNIS, A.; TSILYANNIS, C. Oil refinery sludge and renewable fuel blends as energy sources for the cement industry. **Renewable Energy**. v. 157, p. 55 - 70, 2020.

TSILYANNIS, C. A. *et al.* Cement manufacturing using alternative fuels: Enhanced productivity and environmental compliance via oxygen enrichment. **Energy**. v. 113, p. 1202 - 1218, 2016.

USÓN, F. A. *et al.* Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 23, p. 242 - 260, 2013.

VICZEK, S. A. *et al.* Determination of the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 156, p. 104696, 2020.

VICZEK, S. A. *et al.* The particle size-dependent distribution of chemical elements in mixed commercial waste and implications for enhancing SRF quality. **Science of the Total Environment**. v. 776, p. 145343, 2021.

WALTISBERG, J.; WEBER, R. Disposal of waste-based fuels and raw materials in cement plants in Germany and Switzerland e What can be learned for global co-incineration practice and policy?. **Emerging Contaminants**. v. 6, p. 93 - 102, 2020.

WANG, C. *et al.* PAHs and heavy metals in the surrounding soil of a cement plant Co-Processing hazardous waste. **Chemosphere**. v. 210, p. 247 - 256, 2018.

XIAO, H. *et al.* Destruction and formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans during pretreatment and co-processing of municipal solid waste incineration fly ash in a cement kiln. **Chemosphere**. v. 210, p. 779 - 788, 2018.

YAN, D. *et al.* Destruction of DDT wastes in two preheater/precalciner cement kilns in China. **Science of the Total Environment**. v. 476 - 477, p. 250 - 257, 2014.

YANG, L. *et al.* Field-scale study of co-processing dichlorodiphenyltrichloroethane-contaminated soil in a cement kiln. **Waste Management**. v. 126, p. 133-140, 2021.

YANG, L. *et al.* Unintentional persistent organic pollutants in cement kilns co-processing solid wastes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 182, p. 109373, 2019.

YANG, Z. *et al.* Characterization of PM₁₀ surrounding a cement plant with integrated facilities for co-processing of hazardous wastes. **Journal of Cleaner Production**. v. 186, p. 831 - 839, 2018.

YANG, Z. *et al.* Investigation of formation mechanism of particulate matter in a laboratory-scale simulated cement kiln co-processing municipal sewage sludge. **Journal of Cleaner Production**. v. 234, p. 822 - 831, 2019.

ZEMBA, S. *et al.* Emissions of metals and polychlorinated dibenzo(*p*)dioxins and furans (PCDD/Fs) from Portland cement manufacturing plants: Inter-kiln variability and dependence on fuel-types. **Science of the Total Environment**. v. 409, p. 4198 - 4205, 2011.