

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

JOSÉ ARNALDO PEREIRA MIRANDA

**MONITORAMENTO DE EMISSÕES GASOSAS NUM FORNO DE
CLÍNQUER**

Maceió
2023

JOSÉ ARNALDO PEREIRA MIRANDA

**MONITORAMENTO DE EMISSÕES GASOSAS NUM FORNO DE
CLÍNQUER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dra. Albanise Enide da Silva

Maceió
2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

M672m Miranda, José Arnaldo Pereira.
Monitoramento de emissões gasosas num forno de clínquer / José Arnaldo Pereira Miranda. – 2023.
41 f. : il. color.

Orientadora: Albanise Enide da Silva.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química)
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 34-36.
Anexos: f. 37-41.

1. Poluentes atmosféricos. 2. Forno de clínquer. 3. Cimento. 4. Emissões gasosas - Monitoramento. 5. Coprocessamento. I. Título.

CDU: 66.0 : 628.512



JOSÉ ARNALDO PEREIRA MIRANDA

MONITORAMENTO DE EMISSÕES GASOSAS NUM FORNO DE CLÍNQUER

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ALBANISE ENIDE DA SILVA
Data: 30/04/2023 14:00:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Albanise Enide da Silva (Orientadora)

Documento assinado digitalmente



MARITZA MONTOYA URBINA
Data: 30/04/2023 14:27:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maritza Montoya Urbina

Documento assinado digitalmente



VANIA DE LOURDES DAS GRACAS TELES
Data: 30/04/2023 14:57:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Vânia de Lourdes das Graças Teles

Dedico este trabalho à Deus, minha família e a minha namorada, os meus maiores incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a Nossa Senhora das Graças e a São Josemaria Escrivá pelas bênçãos em minha vida.

Aos meus pais, Arnaldo e Maria Solange, por terem me dado à vida e a base moral e educacional para que eu pudesse caminhar nesse mundo.

À minha irmã, Arlene Miranda, pelo seu imenso coração e pelas palavras de incentivo e apoio.

À minha namorada e futura esposa Pauline Barbosa por estar ao meu lado em todos os momentos e partilhar da vida comigo.

À empresa Ambimet Engenharia LTDA e seus colaboradores, pela oportunidade de estágio e pelos dias de trabalho leves e de troca de experiências.

À Professora Albanise Enide, pela orientação e acompanhamento não só neste trabalho mas ao longo do curso.

Aos demais Professores da Instituição, em especial o Professor Wagner, Professora Lindaurea, Professora Maritza e a Professora Vânia.

A todos que se fizeram ou fazem parte do início até a conclusão desta etapa, o meu muito obrigado!

RESUMO

Questões voltadas à poluição atmosférica têm tido um grande destaque com relação ao crescimento de fontes emissoras e dos desdobramentos que a mesma tem gerado na sociedade e no meio ambiente. Boa parte dos poluentes atmosféricos são oriundos por atividades naturais, mas em sua maioria são provenientes de atividades industriais pautadas principalmente pela ação humana. Um exemplo de atividade de grande impacto é produção de cimento através de fornos de clínquer. A Resolução CONAMA nº 499, de 6 de outubro de 2020, é a principal normativa para as indústrias do segmento cimenteiro visando regulamentar os limites de emissões. As legislações dispõem diretrizes técnicas relativas ao monitoramento de emissões gasosas, bem como adota definições referentes às fontes de emissão, aos poluentes emitidos e às unidades e traz de forma obrigatória a expressão de resultados. É importante salientar que uma correta amostragem é um dos pontos mais críticos de uma análise de compostos na atmosfera. De tal maneira, a seleção do método de amostragem atmosférica, depende, dentre outros fatores, do conhecimento das formas químicas e físicas com que os poluentes se encontram, sua reatividade, suas interações com outros compostos, bem como seus níveis de concentração. Um método bastante utilizado atualmente é a amostragem isocinética, a qual é realizada em condições tais que o fluxo de gás na entrada do equipamento de amostragem, o CIPA (coletor isocinético de poluentes atmosféricos), tenha a mesma velocidade que o fluxo de gás que se pretende analisar. Neste sentido, o trabalho realizou um estudo de caso com um monitoramento das emissões gasosas num forno de clínquer para avaliar se estão dentro dos limites especificados nas legislações vigentes. Para o monitoramento, foi feita a amostragem isocinética dos gases emitidos na chaminé do forno de clínquer através do CIPA, verificando a concentração dos poluentes emitidos durante o processo, baseadas nas normas EPA (*Environmental Protection Agency*), CETESB (*Companhia Ambiental do Estado de São Paulo*) e ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*), sendo as principais substâncias a serem analisadas o material particulado, gases de combustão, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, dioxinas e furanos, como também hidrocarbonetos totais e metais, através dessa análise foram feitos comparativos e assim foi verificada que a operação do forno em estudo estava de acordo com a legislação.

Palavras-Chave: poluentes atmosféricos, amostragem isocinética, legislação.

ABSTRACT

Issues related to atmospheric pollution have been highlighted in relation to the growth of emitting sources and the consequences that this has generated in society and the environment. Much of the air pollutants come from natural activities, but most of them come from industrial activities guided mainly by human action. An example of a high-impact activity is cement production using clinker kilns. CONAMA Resolution No. 499, of October 6, 2020, is the main regulation for industries in the cement segment aimed at regulating emission limits. The legislation provides technical guidelines for the monitoring of gaseous emissions, as well as adopts definitions regarding the emission sources, the pollutants emitted and the units, and brings mandatory expression of results. It is important to point out that correct sampling is one of the most critical points in an analysis of compounds in the atmosphere. In this way, the selection of the atmospheric sampling method depends, among other factors, on the knowledge of the chemical and physical forms in which the pollutants are found, their reactivity, their interactions with other compounds, as well as their concentration levels. A method widely used today is isokinetic sampling, which is performed under conditions such that the gas flow at the inlet of the sampling equipment, the CIPA (isokinetic atmospheric pollutant collector), has the same velocity as the gas flow want to analyse. In this sense, the work carried out a case study with a monitoring of gaseous emissions in a clinker kiln to assess whether they are within the limits specified in current legislation. For monitoring purposes, an isokinetic sampling of gases emitted from the clinker kiln chimney was carried out using CIPA, verifying the concentration of pollutants emitted during the process, based on EPA (Environmental Protection Agency), CETESB (Environmental Company of the State of São Paulo) and ABNT (Brazilian Association of Technical Standards), with the main substances to be analyzed being particulate matter, combustion gases, nitrogen oxides, sulfur oxides, dioxins and furans, as well as total hydrocarbons and metals. comparisons were made and thus it was verified that the operation of the kiln under study was in accordance with the legislation.

Keywords: air pollutants, isokinetic sampling, legislation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de fabricação do cimento	15
Figura 2 - Torre de ciclones	18
Figura 3 - Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA)	24
Figura 4 - Analisador de gases de combustão	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Metais emitidos no coprocessamento	21
Tabela 2 - Dados técnicos da chaminé do Forno W2.	26
Tabela 3 - Resultados das amostragens de Material Particulado.....	27
Tabela 4- Resultados das amostragens de NOx	28
Tabela 5 - Resultados das amostragens de SOx	29
Tabela 6 - Resultados das amostragens de THC.....	29
Tabela 7 - Resultados das amostragens de dioxinas e furanos	30
Tabela 8 - Resultados das amostragens de metais de classe 1.....	31
Tabela 9 - Resultados das amostragens de metais de classe 2 e 3.....	31
Tabela 10 - Metodologias utilizadas para as amostragens e ensaios no Forno W2.....	37
Tabela 11 – Limite de Quantificação THC.....	39
Tabela 12 – Limite de Quantificação THC.....	39
Tabela 13 – Limite de Quantificação Metais	39
Tabela 14 – Limite de Quantificação Dioxinas e Furanos.....	40
Tabela 15 – Limites de concentração segundo a CONAMA n° 499/20.	40

LISTA DE SIGLAS/ABREVIACOES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BTEX - Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno

CIPA Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

EPA - Environmental Protection Agency

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

NO_x– xidos de Nitrogênio

NO₂– Dióxido de Nitrogênio

O₂ – Gás Oxignio

SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente

SO_x – xidos de Enxofre

SO₂ – Dióxido de Enxofre

SO₃ – Trióxido de Enxofre

THC – Hidrocarbonetos Totais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Geral.....	13
2.2 Específicos.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.2 Processo de Produção do Cimento.....	14
3.3 Combustíveis Utilizados para a Produção do Cimento.....	16
3.4 O Processo do Coprocessamento.....	17
3.5 Poluentes Atmosféricos	18
3.5.1 Emissões atmosféricas no Processo Fabril do Cimento.....	19
3.6 Legislação Vigente em Relação ao Coprocessamento.....	21
4 METODOLOGIA	23
4.1 Amostragem.....	23
4.2 Análises.....	23
4.3 Equipamentos	24
4.4 Características do Forno	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
6 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34
ANEXOS	37

1 INTRODUÇÃO

Muito antes da sua difusão em larga escala, o material chamado *Cimento* foi utilizado em diversas civilizações antigas. Sua denominação é originada do latim *Caementu* que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos, dando sustentação a obras no Egito antigo, Grécia e em Roma. No Brasil, estudos para aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreram aparentemente em 1888 (ABCP, 2022).

O cimento é notoriamente um recurso que revolucionou a história da engenharia e a maneira como as sociedades passaram a se desenvolver. Quaisquer tipos de construções contam com essa substância como um dos seus materiais básicos. Entretanto, o processo produtivo do cimento não é tão fácil, o qual necessita de diversos mecanismos, sendo um deles o coprocessamento.

O coprocessamento surgiu como uma alternativa a qual usa resíduos em substituição parcial ao combustível que alimenta a chama do forno que transforma calcário e argila em clínquer, matéria-prima do cimento. A queima se realiza em condições estritamente controladas, dentro do marco regulador previamente existente.

A combustão é a principal reação do processo de fabricação de cimento, onde transforma as matérias-primas em clínquer. A alta temperatura da chama, o tempo de residência dos gases, a turbulência no interior do forno e vários outros parâmetros da combustão na produção de cimento são ideais e até superiores aos padrões exigidos para a queima ambientalmente segura de resíduos perigosos.

Durante o processo produtivo, o consumo energético promove o lançamento de gases na atmosfera, os quais podem ser: CO_2 , NO_x , dióxido de enxofre (SO_2), material particulado (pó), alguns metais, compostos orgânicos voláteis e pequenas quantidades de CO , além de outros poluentes (SCHUHMACHER; DOMINGO; GARRETA, 2004). Para o controle dessas emissões, visando a redução do impacto socioambiental gerado pelas mesmas, surgiram legislações as quais tem como direcionamento a fiscalização quantitativa e qualitativa dos gases.

A indústria cimenteira é uma das fontes responsáveis por grandes impactos ambientais no meio antrópico, biótico e físico provocados principalmente, pela emissão dos gases poluentes, classificada como um setor de elevado potencial poluidor (BELATO, 2013).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão consultivo e

deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), foi instituído pela Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 99.274/90. (CONAMA, 2022). Através dele, foram elaboradas as Resolução Conama nº 264 de 26 de agosto 1999, revogada, pela Resolução Conama nº 499, de 6 de outubro de 2020, sendo a principal normativa a ser seguida pelas indústrias do segmento cimenteiro visando regulamentar os limites de emissões gasosas durante o coprocessamento.

Ao deliberar sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer, as legislações requerem o monitoramento das emissões gasosas no processo. A amostragem isocinética é um procedimento de coleta de amostras gasosas em dutos e chaminés, que serve para determinar a concentração de poluentes atmosféricos presentes nestes locais. Essa análise é realizada em condições tais que o fluxo de gás na entrada do equipamento de amostragem tenha a mesma velocidade que o fluxo de gás que se pretende analisar (IEMA, 2019).

Para o monitoramento isocinético, é feita a amostragem dos gases emitidos na chaminé do forno de clínquer através do Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA). Com esse equipamento, é verificado não só a concentração dos poluentes emitidos durante o processo, mas também a vazão volumétrica dos gases na chaminé, a umidade dos gases presentes nas emissões através das diretrizes encontradas nas metodologias tabeladas, pelos órgãos EPA (*Environmental Protection Agency*), CETESB (*Companhia Ambiental do Estado de São Paulo*) e ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*).

Diante do exposto, o trabalho teve como objetivo avaliar os relatórios de monitoramento de emissões atmosféricas em um forno de clínquer fazendo um estudo de caso, se utilizando de comparativos com as legislações vigentes, as quais buscam analisar a concentração de poluentes emitidas durante o coprocessamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o monitoramento das emissões gasosas através da amostragem isocinética num forno de clínquer de uma indústria brasileira. que realiza a atividade de coprocessamento.

2.2 Específicos

- Avaliar os parâmetros oriundos da amostragem isocinética no forno de clínquer que utilize a técnica do coprocessamento;
- Comparar as legislações vigentes com os resultados obtidos para o monitoramento de emissões atmosféricas em um forno de clínquer que realize a atividade de coprocessamento;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Produção de Cimento no Brasil

De acordo com o Relatório Anual 2021 do SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, o Brasil teve no final de 2021, um aumento de 6,5% no consumo de cimento em relação ao ano anterior, atingindo 64,5 milhões de toneladas. Isso significou um consumo per capita de 300 kg/hab/ano (SNIC, 2021).

Os registros pontuam que o tipo de cimento mais produzido no Brasil é o Cimento Portland Composto (CPII), representando quase 70% da produção total. Segundo a NBR 11578/91, esse tipo de cimento apresenta em sua composição cerca de 54 a 56% de clínquer e sulfatos de cálcio, 6 a 34% de escória granulada de alto-forno, 6 a 14% de material pozolânico e até 10% de material carbonático.

Atualmente, os revendedores são os principais consumidores de cimento no Brasil, representando 58% do consumo total, seguido das concreteiras (20%), construtoras e empreiteiras (9%), outros consumidores industriais (9%), artefatos (4%) (SNIC, 2021).

3.2 Processo de Produção do Cimento

Para o processo de fabricação do cimento, esquematizado na Figura 1, temos seus dois principais componentes que são: o calcário (87%) e a argila (11%), que contém respectivamente $CaCO_3$ e SiO_2 . Durante o processo são feitas adições de alguns compostos, tais como de minério de ferro (Fe_2O_3), argila (SiO_2) e bauxita (Al_2O_3) para correção dos argilo-minerais (FEAM, 2008).

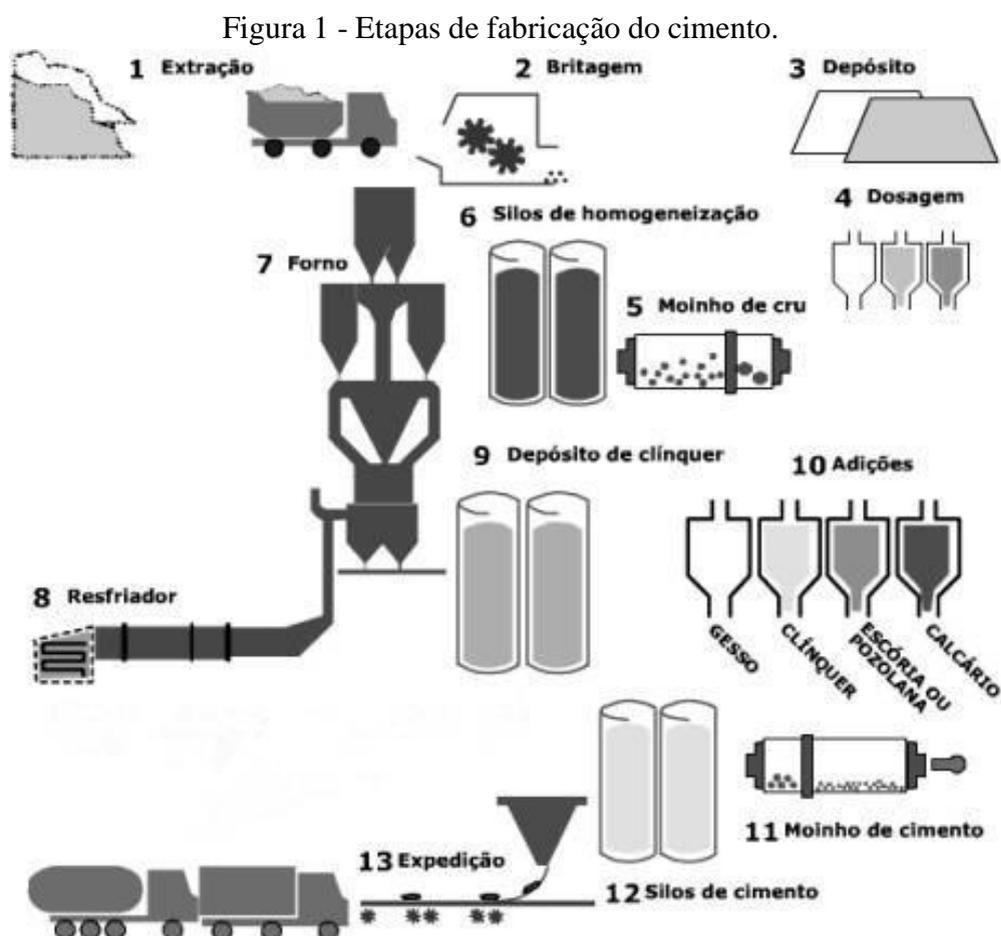
Segundo Silva (2009), o processo de fabricação do cimento é composto por diversas etapas, entre elas:

- **Mineração:** Extração das matérias primas constituintes do cimento (calcário e argila).
- **Britagem:** Processo de fragmentação da matéria-prima para obtenção da granulometria apropriada para o processo de fabricação.
- **Pré-homogeneização:** É a etapa que procura garantir uma composição definida do material a ser enviado ao moinho. De acordo com as especificações prévias da composição físico-química e mineralógica das matérias-primas determina-se a quantidade de cada constituinte.
- **Moagem da matéria-prima:** Estapa do processo de moagem e secagem das matérias primas (calcário, argila e outros materiais corretivos, alimentados no moinho). O

produto desta moagem é conhecido como “farinha”.

- **Clinkerização:** A matéria-prima é submetida a um processo de aquecimento em um forno rotativo que leva à produção final do clínquer, principal constituinte do cimento.
- **Resfriamento:** Ocorre o resfriamento do material após a passagem pelos fornos de clínquer.
- **Adição:** São feitas adições de materiais como gesso, calcário, escórias do forno, pozolanas que são materiais capazes de conferir de propriedades hidráulicas
- **Moagem do cimento:** O resultado da mistura de clínquer como os aditivos passa por um processo de moagem, onde se costuma utilizar o moinho de bolas para efetuar este processo.
- **Armazenamento:** Embalagem e armazenamento em silos ou ensacados.
- **Expedição:** Destinação dos sacos de cimento para distribuidores ou a granel para concreteiras.

Na Figura 1 é apresentado um simples esquema que mostra as etapas do processo de fabricação do cimento.



Fonte: ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, 2014.

3.3 Combustíveis Utilizados para a Produção do Cimento

A indústria do cimento é uma grande consumidora de energia, onde boa parte dos custos diretos de produção de uma fábrica corresponde às despesas com combustíveis e energia elétrica (SNIC, 2010). Entre as fontes de energia mais utilizadas pelo setor produtivo do cimento, podemos observar o coque de petróleo, a moinha de carvão vegetal, o carvão mineral, o óleo combustível, a eletricidade e os combustíveis alternativos.

Falando mais precisamente dos combustíveis alternativos utilizados na produção de cimento, os mesmos são oriundos de diversas atividades onde uma grande parte pode ser co-processada nos fornos rotativos de produção de clínquer. Geralmente os resíduos que apresentam poder calorífico inferior (PCI) maior que 11.300 kJ /kg (base seca) e podem ser utilizados como alternativa energética para o processo de produção de cimento (PAULA, 2009).

A utilização de resíduos como combustíveis alternativos na indústria de cimento é vista como um impacto positivo no meio ambiental e uma opção bastante viável para reduzir o custo de produção do cimento.

O seu uso permite a redução do consumo de outros combustíveis, conserva recursos naturais e fornece uma maneira ambientalmente sadia para o tratamento dos mesmos, ajudando a diminuir o impacto negativo no meio ambiente. Sendo assim, a indústria cimenteira é incentivada a processá-los, pois ao invés de pagar pelo seu suprimento, ela passa a ter uma receita extra pela destinação final desses resíduos (PAULA, 2009).

Segundo a CONAMA 499/2020 não podem ser coprocessados os seguintes resíduos:

- 1) Resíduos hospitalares não-tratados;
- 2) Lixo doméstico ou urbano não-classificado;
- 3) Materiais radioativos;
- 4) Materiais explosivos;
- 5) Fossas orgânicas;
- 6) Pilhas e baterias;
- 7) Resíduos com altos teores de cloro ou metais pesados;
- 8) Pesticidas;
- 9) Ascaréis, entre outros. (CONAMA,2020).

Se tratando dos resíduos capazes de serem utilizados na atividade do coprocessamento, podemos destacar:

- a) Substâncias oleosas: óleos hidráulicos, óleos lubrificantes, etc;
- b) Catalisadores usados;
- c) Resinas, colas e látex;
- d) Pneus inservíveis;
- e) Madeiras;
- f) Solventes, Ceras;
- g) Borrachas não cloradas;
- h) Carvão Ativado usado como Filtro;
- i) Borrás de Tintas;
- j) Borrás Ácidas;
- k) Resinas Fenólicas e Acrílicas;
- l) Elementos Filtrantes de Filtros de Óleo;
- m) Lodos de estação de tratamento de esgoto – ETE;
- n) Papel, entre outros.

De acordo com a regulação do processo, resíduos podem ser alimentados nos fornos separadamente, ou em forma de *blends*, que são misturas de vários resíduos preparadas em unidades específicas para o coprocessamento. Essas misturas são popularmente conhecidas como blendeiras.

3.4 O Processo do Coprocessamento

Como comentado anteriormente o coprocessamento é uma técnica transformação de resíduos através da alta temperatura em fornos de fabricação de clínquer (principal matéria-prima do cimento), com aproveitamento de conteúdo energético e/ou fração mineral, sem a geração de novos resíduos, contribuindo para a economia de combustíveis e matérias-primas e minerais não renováveis (FEAM, 2008).

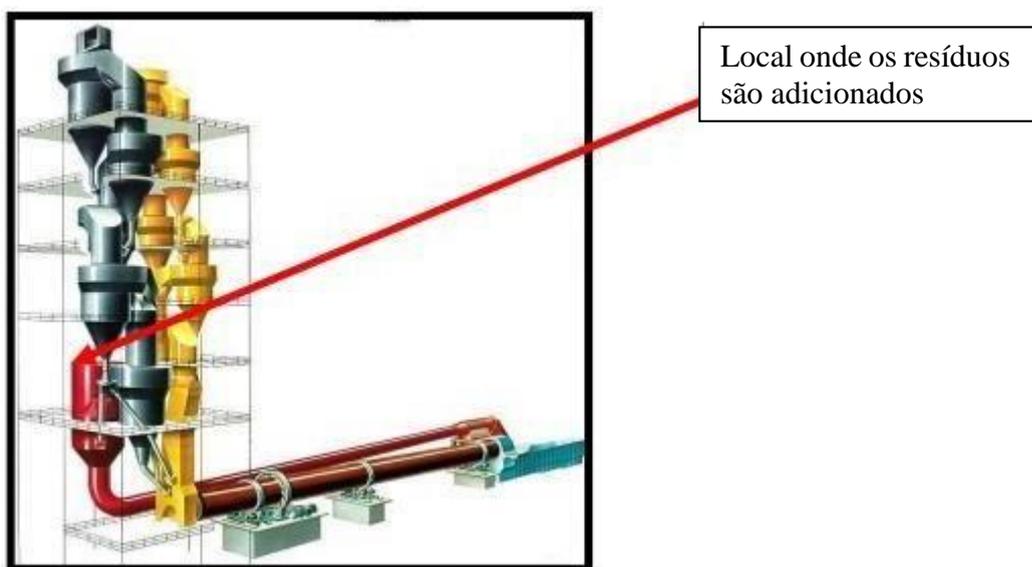
A utilização dos resíduos no processo produtivo do cimento possui bastante vantagens, e há algumas que podemos destacar, como as econômicas dada a redução dos custos de produção. Essa utilização tem inúmeros impactos ao meio ambiente, tais como redução do consumo de combustíveis fósseis e da emissão de CO₂; aproveitamento de resíduos que poderiam ser destinados a aterros ou ter disposições finais inadequadas; aproveitamento do potencial energético; ausência de cinzas no processo de e a consequente minimização dos impactos associados à sua disposição em aterros (FEAM, 2016).

De maneira geral, é possível verificar que o coprocessamento oferece como vantagens a eliminação de resíduos perigosos e impactos negativos ao meio ambiente, além da

diminuição do consumo de combustíveis derivados do petróleo.

Ao se observar tecnicamente, o coprocessamento consiste na adição ou entrada dos resíduos no sistema-forno de clínquer, em diferentes pontos. Conforme a Figura 2, temos o local de adição de resíduos para o coprocessamento. A torre de ciclones leva a um pré-calcinador acoplado a uma caixa de fumaça a qual está conectada, por sua vez, ao queimador principal.

Figura 2 - Torre de ciclones.



Fonte: CIMESA, 2006

3.5 Poluentes Atmosféricos

A atmosfera terrestre (do grego *atmós* = gás, vapor e *sphaira* = esfera) é um sistema complexo constituído de vários gases. Estes gases podem ser classificados com base nas suas quantidades relativas. Boa parte dos gases são oriundos dos processos biogeoquímicos, mas atualmente em sua maioria são provenientes de atividades industriais.

Esses compostos gasosos estão em contínuas mudanças por causa de sua capacidade de reação com outros constituintes atmosféricos ou por transporte e deposição. O tempo médio que as moléculas gasosas permanecem na atmosfera é denominado tempo de residência.

Segundo a literatura, os poluentes atmosféricos podem ser divididos, de acordo com a origem, em poluentes primários, que são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de poluição e poluentes secundários, os quais são aqueles formados na atmosfera através das reações químicas entre os poluentes primários e/ou constituintes naturais da atmosfera como oxigênio e nitrogênio (CETESB, 2000).

Além de provocarem inúmeras consequências aos cidadãos, os problemas causados pela poluição do ar também geram impactos negativos no que se refere à perspectiva

econômica e socioambiental. Dentre os principais problemas, podemos destacar a redução da produtividade agrícola, aumento de custos dos sistemas de saúde, maior vulnerabilidade das populações carentes (IEMA, 2014).

3.5.1 Emissões atmosféricas no Processo Fabril do Cimento

Como em qualquer processo fabril a indústria cimenteira possui emissões atmosféricas, que devem ser monitoradas continuamente 24 horas por dia, ou também de monitoramentos periódicos realizados por empresas externas. Os resultados obtidos são acompanhados e levados ao conhecimento dos órgãos ambientais.

As emissões atmosféricas são provenientes das diferentes etapas do processo de produção de cimento, dependendo das matérias-primas e combustíveis, dos procedimentos de preparação, dos tipos de fornos e dos sistemas de controle de emissão de gases. Os principais passos da produção, fontes de emissão potenciais, são: mineração e preparação de matérias-primas; manuseio de combustíveis; produção de clínquer; moagem final; ensacamento; armazenamento; mistura; transporte e carregamento do material (WBCSB, 2012).

Durante o processo de queima dos resíduos, nós podemos destacar a emissão de diversos poluentes atmosféricos, os quais destacamos:

- **Material Particulado (MP):** É composto de emissões de poeiras espessas, finas, fuligem, partículas e aerossóis. (WBCSB, 2012). Partículas com diâmetro de 10 μm ou menos são denominadas PM10, e consistem de uma fração "fina". As partículas com diâmetro inferior a 2,5 μm são chamadas PM2,5, e são hábeis em penetrar nas regiões mais profundas do trato respiratório, podendo ser absorvidas nos alvéolos pulmonares. De acordo com análises, um total de 1% do PM10 é respirável (pode penetrar até áreas pulmonares em que ocorre as trocas gasosas), enquanto que 80% do PM2,5 é respirável (USEPA, 1996).
- **Óxidos de Nitrogênio (NOx):** Dentro da indústria cimenteira, o NOx é formado pela reação do nitrogênio atmosférico e dos combustíveis com o oxigênio a altas temperaturas de operação durante a etapa de combustão. Os tempos de residência nos fornos e os tipos de queimadores também têm influência na quantidade de NOx emitida para a atmosfera (WOOD, 1994). As emissões de NOx durante a combustão resultam de três são mecanismos, os quais são NO térmico, NO do combustível e NO imediato. Nos fornos rotativos da indústria de cimento, o NO térmico e NO do combustível são os mecanismos mais relevantes,

sendo o NO térmico a principal rota do processo das emissões de NO_x, devido às altas temperaturas envolvidas na queima ou nas etapas de formação do clínquer, juntamente com a atmosfera oxidante no forno (WOOD, 1994).

- **Óxidos de Enxofre (SO_x):** Esses compostos englobam uma série de óxidos, entre eles o SO, SO₂ e SO₃, onde cerca de 99% de suas emissões estão sob a forma de dióxido de enxofre (SO₂). As principais fontes de enxofre na indústria de cimento são os sulfatos e sulfetos, presentes na composição da farinha e nos combustíveis (WBCSB, 2012). Durante o processo de fabricação do clínquer, 50% a 90% do enxofre é absorvido, sendo incorporado ao clínquer ou emitido na forma de material particulado. Há também uma porcentagem do enxofre que é retido no processo na forma de deposições nos equipamentos. Já durante a combustão, praticamente todo o enxofre proveniente dos combustíveis é oxidado a SO₂ (SIGNORETTI, 2008).
- **Hidrocarbonetos:** Os hidrocarbonetos são compostos formados por átomos de carbono e de hidrogênio, aos quais podem se ligar átomos de oxigênio (O), nitrogênio(N) e enxofre (S) resultando em diferentes compostos (CARNEIRO, 2010). Os hidrocarbonetos contemplam os Compostos Orgânicos Voláteis (COV's) ou Carbono Orgânico Total (COT). Há também a ocorrência de hidrocarbonetos aromáticos, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, conhecidos por BTEX que apresentam índices elevados de toxicidade. Durante o processo, as emissões de hidrocarbonetos se dão devido à queima incompleta dos combustíveis orgânicos, com a baixa presença de oxigênio na combustão, ou quando há uma redução na temperatura de chama. Desse modo, para que haja uma redução das emissões desses compostos, é necessário que haja excesso de ar durante a queima.
- **Dioxinas e Furanos:** Tais compostos químicos são bastante tóxicos e fazem parte dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POP's) que afetam muito negativamente a saúde humana e o meio ambiente, persistindo por longos períodos de tempo no ambiente e tendo como característica principal a bioacumulação que é a capacidade de acumular e passar de uma espécie a outra, sucessivamente, através da cadeia alimentar. A formação dessas substâncias está ligada à presença de cloro nos combustíveis e/ou nas matérias-primas utilizadas na produção de cimento, sendo geradas principalmente durante o resfriamento de 450°C para 200°C durante a queima dos resíduos. Os longos tempos de residência aliados às altas temperaturas do forno favorecem a baixa emissão dessas substâncias (EUROPEAN UNION, 2013).
- **Ácidos Clorídrico (HCl) e Fluorídrico (HF):** O ácido clorídrico é o principal gás

ácido gerado durante o coprocessamento. O fator determinante na formação e emissão deste gás é a presença de cloro nos resíduos. Na presença de hidrogênio, a maior parte do cloro disponível é convertido em HCl, que é um gás incolor, tóxico e corrosivo (FEAM, 2016). Já o Fluoreto de Hidrogênio (HF) é um gás, também, bastante corrosivo, com propriedades semelhantes ao HCl.

- **Metais:** Para a realização do coprocessamento, há algumas preocupações com o uso de matérias-primas secundárias e de combustíveis derivados de resíduos, dentre elas a incorporação de metais pesados no clínquer e seus efeitos no desempenho do cimento, assim como suas emissões atmosféricas (FEAM, 2016). Seguem abaixo na Tabela 1 os metais encontrados durante o coprocessamento, onde os de Classe I possuem maior toxicidade.

Tabela 1 - Metais emitidos no coprocessamento

Classe	Metais
I	Hg, Cd, Tl
II	As, Co, Ni, Se, Te
III	Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Zn

Fonte: IPCC, 2000

3.6 Legislação Vigente em Relação ao Coprocessamento

O Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente) aprovou em reunião plenária no dia 28/09/2020 e publicou no “Diário Oficial da União” em 06/10/2020 a Resolução CONAMA 499/20, que dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer, tal resolução revogou a antiga Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999.

A resolução reconhece o desenvolvimento do conhecimento sobre as operações do coprocessamento e reflete uma adequação da legislação aos conceitos de economia circular, economia de baixo carbono e uso sustentável dos recursos naturais, entre outras políticas que favoreçam o desenvolvimento sustentável. Um dos pontos da atualização é tornar mais específico o licenciamento ambiental para fins de coprocessamento em fornos de produção de clínquer. Pode-se destacar também a equiparação do processo produtivo de cimento às normativas internacionais.

Algumas das principais atualizações são:

- Controle do processo de combustão pelo THC (Hidrocarbonetos Totais).
- Permissão para coprocessamento de vários materiais, como os medicamentos, materiais

vencidos ou fora de especificação, além de permitir o coprocessamento de resíduos de saúde que tenham passado por autoclavagem ou descontaminação biológica.

- Permissão de coprocessamento de resíduos não substitutos de matérias-primas e combustíveis, desde que comprovado o ganho ambiental.
- Monitoramento contínuo de MP, SO_x, NO_x, O₂ e THC, podendo ser realizado através de sensores, e de acordo com exigência dos órgãos ambientais.
- Redução do limite de emissão de Material Particulado.
- Atualização dos limites de quantificação para os parâmetros: SO_x, NO_x e dioxinas e furanos (CONAMA, 2020).

4 METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de um estudo de caso, onde foi tomado um determinado processo produtivo de cimento em sua condição real e foram analisadas as emissões gasosas e os fatores que a influenciam.

4.1 Amostragem

Inicialmente, foi tomado um forno de clínquer (Forno W2) de uma indústria cimenteira atuante no Brasil visando não só quantificar, mas também qualificar diversos poluentes oriundos no processo, tais como gases de combustão, NO_x, SO_x, entre outros. Durante a execução do presente trabalho, foi realizado o levantamento de alguns parâmetros emitidos pela fonte previstos em Resolução CONAMA n° 499/20. Para a verificação dos limites máximos de emissão foram atendidos os procedimentos de amostragem e análises previstos nas normas técnicas em vigor, obedecendo o limite de quantificação de cada parâmetro, encontrados nas Tabelas 11 a 14 em anexo, e utilizando as metodologias de preparação para as coletas e análises descritas na Tabelas 10 em anexo ao final do trabalho.

4.2 Análises

Os métodos de coleta e análise dos gases emitidos na atmosfera determinam não só a concentração dos poluentes emitidos durante o processo, mas também é verificada a vazão volumétrica dos gases na chaminé, a umidade dos gases presentes nas emissões, entre outras características através das normas EPA, CETESB, e ABNT as quais são consideradas pelos órgãos fiscalizadores.

Na Tabela 10, são mostrados os ensaios realizados pelo laboratório contratado utilizando a sua própria instalação permanente e na cimenteira, bem como os ensaios realizados com o auxílio de laboratórios parceiros.

Com base nessas análises, foram tomados os relatórios de monitoramento desse forno durante dois anos distintos (2020 e 2022) para estudo da operação do mesmo durante o processo de coprocessamento, deste modo, as metodologias de preparação para as coletas e análises são essenciais para o bom andamento dos monitoramentos.

4.3 Equipamentos

Para a realização da coleta foi necessário à utilização do Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA), composto por: Conjunto de boquilhas; Sonda de amostragem; Caixa quente; Caixa fria; Cordão umbilical; Caixa de controle; Bomba de vácuo e notebook. Também foi utilizado o analisador de gases de combustão. Os equipamentos estão ilustrados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3 - Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA).



Fonte: energetica.ind.br

Figura 4 - Analisador de gases de combustão.



Fonte: lojadomecanico.com.br

4.4 Características do Forno

A expressão de resultados de monitoramentos de fornos de cimenteiras coerentes e alinhados com as normas instituídas pelos órgãos ambientais mostram a eficiência do controle das emissões atmosféricas no processo.

Neste trabalho, foram elaborados comparativos e tabelas com dados de operação durante o coprocessamento do forno analisado, o qual utiliza resíduos de origem industrial como plásticos, papéis, materiais têxteis com restos de óleo, líquidos e borras provenientes de limpezas de tanques e de diferentes tratamentos industriais como principais combustíveis, com base nos limites encontrados durante a amostragem das emissões atmosféricas do processo. A partir daí, foram feitos comparativos junto a legislação vigente balisando a conformidade da operação do forno.

Em relação ao forno e a empresa em sua operação, atualmente, segundo dados de 2022, a empresa possui um percentual médio de substituição térmica por meio do coprocessamento, que atinge 26,5%. Em relação a capacidade de produção, o complexo industrial o qual a fábrica se localiza, tem a capacidade de produção de 2,2 milhões de toneladas por ano, sendo um dos principais polos produtivos de cimento do Brasil.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o trabalho foram consideradas as normativas dos órgãos regulamentares enquanto fiscalizadores dessas emissões gasosas. A Resolução CONAMA n° 499/20 é atualmente um dos principais nortes para a operação do processos produtivo do cimento, desde o processo de implementação da indústria, até aos impactos gerados aos ecossistemas onde as mesmas estão inseridas.

O controle das emissões no ar ambiente, é um dos estudos necessários para implementar políticas de controle e atendimento aos padrões da qualidade do ar, dando características se o mesmo é possível de ser respirável sem danos as pessoas e o meio ambiente.

Inicialmente, foram tomadas as características da chaminé do Forno W2 expressas na Tabela 2 abaixo, a qual apresenta os dados técnicos obtidos na chaminé descrita que são necessários para a obtenção da distribuição dos pontos transversais na seção, onde foram feitas medições visando à obtenção do perfil de velocidade e da taxa de fluxo.

Tabela 2 - Dados técnicos da chaminé do Forno W2.

DADOS TÉCNICOS DA CHAMINÉ				
FORNO W2	Diâmetro da chaminé (m)	Montante do ponto de coleta (A) (m)	Jusante do ponto de coleta (B) (m)	Pontos transversais
	4,28	100,0	50,0	12

Fonte: Autor, 2023

Em posse desses dados e com a realização das amostras coletadas em triplicata conforme as metodologias utilizadas, foram feitas as análises e em seguida obtidas as tabelas para os parâmetros conforme os limites estabelecidos pela CONAMA n° 499/20. Tais dados são submetidos a correção de oxigênio de modo a padronizar os valores encontrados. A conversão para a concentração do poluente na porcentagem de oxigênio padrão foi realizada de acordo com a Equação abaixo:

$$CC = [(21-OR) / (21-OM)] \times CM$$

Onde:

CC = concentração do poluente corrigida para a condição estabelecida;

OR = porcentagem de oxigênio na condição de referência estabelecida;

OM = porcentagem de oxigênio medida nas condições de amostragem;

CM = concentração do poluente determinada nas condições de amostragem.

Para os comparativos mencionados, temos a Tabela 15 nos anexos ao final do trabalho que exemplifica os limites vigentes para a emissão de poluentes na atmosfera segundo as normativas da CONAMA n° 499/20. Esses limites remontam à emissão de poluentes atmosféricos provenientes de fornos rotativos de produção de clínquer utilizados para atividades de coprocessamento de resíduos para a produção de cimento.

A Tabela 3 abaixo expressa os resultados obtidos para os parâmetros Material Particulado - MP e Gases de combustão (CO, CO₂ e O₂) analisados, referentes ao Forno W2, comparando-os a Resolução CONAMA n°499, de 06 de outubro de 2020.

Os resultados são reportados como valor absoluto ± a incerteza de medição absoluta estimada para a análise.

Tabela 3 - Resultados das amostragens de Material Particulado.
CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS

FONTE	FORNO W2						
	1ª Coleta Resultado	2ª Coleta Resultado	3ª Coleta Resultado	Média	VMP	Unidade	Correção de O ₂
Material Particulado (MP) 2020	42,2 ± 1,9	23,6 ± 0,9	14,4 ± 0,6	26,7	50	mg/Nm ³	11%
Material Particulado (MP) 2022	19,4 ± 1,9	10,9 ± 0,9	6,5 ± 0,6	12,3			
Óxidos de enxofre (SO _x) 2020	16,1	13,8	13,8	14,56	1200		
Óxidos de enxofre (SO _x) 2022	< 0,95 mg	< 0,95 mg	< 0,95 mg	< 0,95 mg			

Fonte: Autor, 2023

O valor máximo permitido (VMP) é dado através da resolução e a incerteza de medição expandida é expressa como valor absoluto próximo ao resultado; com o nível de confiança de 95% e fator de expansão de $K = 2$ onde a mesma não é considerada na declaração da conformidade. Vale ressaltar que o teor médio de SO₃ encontrado na farinha foi de 0,48%. Em 2022 as análises obtiveram uma quantidade inferior à 0,95 mg o que caracterizou um

quantitativo muito baixo para comparativo.

Diante disso, podemos afirmar que os dados obtidos para o Forno W2, nos parâmetros de material particulado e SO_x indicaram o cumprimento ao padrão estabelecido na legislação.

Caso não fossem respeitados os limites oriundos para os parâmetros, alguma sanções seriam impostas pelos órgãos fiscalizadores resultando em notificações e até a parada da operação do processo de produção de cimento a depender do impacto ambiental gerado.

A Tabela 4 temos as amostras do NO_x, onde em são realizadas em cada coleta, 3 amostragens totalizando 9 amostras conforme as metodologias padrão. Tal composto tem seu controle como necessário por ser um poluidor com capacidade de impactar negativamente não só animais e plantas, mas todo um ecossistema. Dessa forma, as emissões de NO_x estão cada vez mais regulamentadas, e devem ser medidas para assegurar o cumprimento das dos limites pertinente, o que é possível observar na Tabela 10, onde os valores máximos permitidos estão sendo respeitados.

Tabela 4- Resultados das amostragens de NO_x.

CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS							
FONTE	FORNO W2						
Parâmetro	Resultado	Resultado	Resultado	Média	VMP	Unidade	Correção de O ₂
Óxidos de nitrogênio (NOX) 2020	1ª Coleta	2ª Coleta	3ª Coleta	735,81	800	mg/Nm ³	10%
	884,77	752,23	741,77				
	4ª Coleta	5ª Coleta	6ª Coleta				
	786,01	659,69	687,58				
	7ª Coleta	8ª Coleta	9ª Coleta				
Óxidos de nitrogênio (NOX) 2022	664,50	717,66	728,08	685,25	800	mg/Nm ³	10%
	1ª Coleta	2ª Coleta	3ª Coleta				
	643,79	651,54	627,69				
	4ª Coleta	5ª Coleta	6ª Coleta				
	652,14	719,90	673,57				
7ª Coleta	8ª Coleta	9ª Coleta					
	741,94	718,22	738,42				

Fonte: Autor, 2023

Em relação aos compostos ácidos como HCl e HF, os controles se fazem necessários não só pelo impacto ambiental que os mesmos geram, mas também por possuírem

características ácidas o que em contato com as estruturas e os equipamentos do processo produtivo, podem causar corrosão e deteriorar a estrutura física da indústria. Os valores obtidos nos monitoramentos estão expressos na Tabela 5 e os mesmos têm atendido as exigências dos órgãos de fiscalização atuantes.

Tabela 5 - Resultados das amostragens de NOx
CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS

FONTE	FORNO W2						
	1ª Coleta Resultado	2ª Coleta Resultado	3ª Coleta Resultado	Média	VMP	Unidade	Correção de O2
Ácido Fluorídrico (HF) 2020	3,8 ± 0,1	2,7 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,8	5,0	mg/Nm ³	7%
Ácido Fluorídrico (HF) 2022	1,7 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,7			
Ácido Clorídrico (HCl) 2020	1,2 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,3	10,0		10%
Ácido Clorídrico (HCl) 2022	4,3 ± 0,2	2,8 ± 0,2	3,0 ± 0,2	3,3			

Fonte: Autor, 2023

As amostras de THC observam os mais diversos compostos a base de carbono e hidrogênio e representam um limite geral para esses compostos que são depreendidos durante utilização do material como combustível no coprocessamento. Seu controle é extremamente importante pelo fato de os mesmos serem prejudiciais para os seres humanos e demais seres vivos se absorvidos, ingeridos e inalados. Os resultados de monitoramento estão expressos na Tabela 6 e condizentes com os limites previstos em legislação.

Tabela 6 - Resultados das amostragens de THC
CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS

FONTE	FORNO W2						
	1ª Coleta Resultado	2ª Coleta Resultado	3ª Coleta Resultado	Média	VMP	Unidade	Correção de O2
THC (expresso como propano) 2020	10,7	10,5	10,1	10,4	39,0	mg/Nm ³	7%

CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS							
FONTE	FORNO W2						
THC (expresso como propano) 2022	6,8	7,5	6,6	6,9			

Fonte: Autor, 2023.

As dioxinas e furanos são compostos orgânicos formados como subprodutos não intencionais em alguns processos industriais e de combustão, mas também podem resultar de processos naturais, como incêndios florestais, erupções de vulcões e a partir de processos catalisados enzimaticamente.

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados de monitoramento junto às incertezas de medição o qual apresenta que em 2020 os valores obtidos são ínfimos, não observando o limite de quantificação para análise e assim ter uma base para comparação. Com base nos valores obtidos, os limites para os compostos têm respeitado as normativas impostas pelos órgãos e legislações.

Tabela 7 - Resultados das amostragens de dioxinas e furanos.

CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS							
FONTE:	FORNO W2						
Parâmetro	1ª Coleta Resultado	2ª Coleta Resultado	3ª Coleta Resultado	Média	VMP	Unidade	Correção de O2
Dioxinas e Furanos 2020	0,00	0,00	0,00	0	0,1	ng/Nm ³	10%
Dioxinas e Furanos 2022	0,044 ± 0,005	0,042 ± 0,004	0,039 ± 0,003	0,04			

Fonte: Autor, 2023

Tratando mais precisamente dos metais liberados através das emissões atmosféricas, por sua toxicidade a subdivisão em 3 tipos, conforme o grau de toxicidade. Os metais de tipo I possuem grau mais elevado e são mais nocivos, já os de tipo II e III possuem grau reduzindo sucessivamente. Essa classificação torna a sua caracterização de melhor entendimento tanto para o emissor como para quem fiscaliza. As ações desses metais no meio ambiente podem ser até benéficas em certas concentrações, porém o excesso e acúmulo dos mesmos no meio ambiente pode causar danos até mesmo irreversíveis a rios e demais meios líquidos, solos em geral e aos seres vivos.

As Tabelas 8 e 9 abaixo apresentam os dados referente aos monitoramentos desses

compostos trazendo valores os quais remontam a uma correta emissão desses compostos na atmosfera, com base nos limites legais.

Tabela 8 - Resultados das amostragens de metais de classe 1.

CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS							
FONTE:	FORNO W2						
Parâmetro	1ª Coleta Resultado	2ª Coleta Resultado	3ª Coleta Resultado	Média	VMP	Unidade	Correção de O ₂
Mercúrio 2020	0,0006	0,0005	0,0002	0,0004	0,05	mg/Nm ³	7%
Mercúrio 2022	0,0006	0,0007	0,0002	0,0005			
Chumbo 2020	< 0,00055	< 0,00055	< 0,00055	< 0,00055	0,35		
Chumbo 2022	< 0,00055	< 0,00055	< 0,00055	< 0,00055			
Cádmio 2020	< 0,00065	< 0,00065	< 0,00065	< 0,0065	0,10		
Cádmio 2022	< 0,00055	< 0,00055	< 0,00055	< 0,00055			
Tálio 2020	0,0017	0,0013	0,0013	0,0014	0,10		
Tálio 2022	0,0057	0,0069	0,0071	0,0065			

Fonte: Autor, 2023

Tabela 9 - Resultados das amostragens de metais de classe 2 e 3.

CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAGENS							
FONTE:	FORNO W2						
Parâmetro	1ª Coleta Resultado	2ª Coleta Resultado	3ª Coleta Resultado	Média	VMP	Unidade	Correção de O ₂
Metais II 2020	0,20 ± 0,02	0,22 ± 0,02	0,21	0,07	1,4	mg/Nm ³	7%
Metais II 2022	0,27 ± 0,02	0,28 ± 0,02	0,21	0,25			
Metais III 2020	5,87 ± 0,14	6,49 ± 0,2	7,14 ± 0,17	6,52	7,0		
Metais III 2022	2,03 ± 0,14	3,46 ± 0,2	3,00 ± 0,17	2,83			

Fonte: Autor, 2023

Ao analisar os resultados de monitoramento dos poluentes atmosféricos citados, de maneira geral, o forno tem atendido a todos os padrões de lançamentos exigidos na legislação ambiental. As declarações de conformidade, as quais os comparativos dos resultados são feitos com a legislação, são utilizadas pelo laboratório de coleta análises, baseadas em regras inerentes à legislação ou norma.

Tendo isso em vista, as tomadas de decisão ao declarar o resultado não consideram a incerteza de medição associada à amostragem ou ao ensaio, ou seja, ao realizar o comparativo do resultado obtido com o VMP, não é considerada a incerteza de medição.

6 CONCLUSÃO

Com base nos levantamentos feitos dos monitoramentos de emissões atmosféricas no Forno W2, Os parâmetros Material particulado (MP), Óxidos de enxofre (SO_x), Ácido Clorídrico (HCl)/Cloro (Cl₂), Ácido Fluorídrico (HF)/Fluoreto (F⁻), Metais, Dioxinas e Furanos (D/F), Hidrocarbonetos Totais (THC) e BTEX, apresentam resultados em conformidade com os padrões estabelecidos na Resolução CONAMA/MMA N° 499, de 6 de outubro de 2020, para os parâmetros previstos e aplicáveis.

De tal maneira, é atestado que a operação do Forno W2, com base no coprocessamento de resíduos é uma opção a qual traz benefícios para a empresa, reduzindo custos com o processo produtivo, implementando fontes alternativas de combustíveis oriundos do seu próprio processo em outras etapas. Através disso, percebemos que o conceito de uma economia circular já é uma realidade presente na indústria brasileira.

Diante disso, é possível concluir que o coprocessamento é uma excelente alternativa para a gestão e reutilização dos resíduos sólidos e deve ser estimulada pelos diversos benefícios que é capaz proporcionar, desde que monitorado com um adequado controle ambiental. A utilização do coprocessamento de resíduos em fornos de cimento está em sua fase inicial e necessita de muitos estudos, os quais busquem esclarecer os aspectos da real contribuição do coprocessamento de resíduos e esclarecer os limites e riscos a ele associados.

O rígido controle das condições operacionais, o monitoramento das emissões atmosféricas e a análise das características físicas e químicas dos resíduos do processo são essenciais para um correto desenvolvimento do setor, tendo em vista não comprometer a qualidade do ar e não causar danos à saúde humana e impactar negativamente o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Cimento Portland. **Uma Breve história do Cimento Portland**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/#:~:text=A%20palavra%20CIMENTO%20%C3%A9%20originada,uma%20mistura%20de%20gesso%20calcinado>. Acesso em: 10 Out. 2022.

CARNEIRO, M.S.S. **Introdução à Química Orgânica**. Módulo Q7. Janeiro. 2010

[CETESB] Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório Anual de Qualidade do Ar**. São Paulo, 2000.

CONAMA. **O que é CONAMA**. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/o-que-e-o-conama11> de julho de 2022. Acesso em: 10 Out. 2022.

EUROPEAN UNION. Establishing the best available techniques (BAT) conclusions under Directive 2010/75/EU of the **European Parliament and of the Council on Industrial Emissions for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide** – 2013/163/EU. European Parliament and of the Council. 2013.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Fabricação de cimento e controles ambientais do processo: módulo I; Coprocessamento de resíduos industriais: módulo II**. 2008. 60 p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Avaliação Ambiental do Setor de Coprocessamento no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Votorantim Cimentos inicia a operação de nova fábrica em Pecém com lançamento de produto no mercado cearense**. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/votorantim-cimentos-inicia-a-operacao-de-nova-fabrica-em-pecem-com-lancamento-de-produto-no-mercado-cearense/>

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. Instrução Normativa IEMA N° xx/2019. **Critérios para realização de monitoramentos atmosféricos de emissões de fontes fixas de poluição do ar no estado do Espírito Santo**. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/IN_Monitoramento_Isocinetico.pdf Acesso em: 12 Out. 2022.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **1° Diagnóstico da rede de monitoramentoda qualidade do ar no Brasil** 2014. Disponível em: http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico_Qualidade_do_Ar_Ver_sao_Final_Std.pdf Acesso em: 15 Out. 2022.

O que é coprocessamento. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/sobre/o-que-e-coprocessamento/> Acesso em: 10 Out. 2022.

PAULA, L. G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Coprocessamento de Misturas de Resíduos**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Itajubá, MG. Fevereiro de 2009.

Relatório Integrado 2022. Disponível em: votorantimcimentos.com.br/relatorio-integrado. Acesso em: 30 Mar. 2023.

Resolução CONAMA 499/20. 16 de dezembro de 2020. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/resolucao-conama-499-20/>. Acesso em: 15 Out. 2022

RESOLUÇÃO CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999. **Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos**.

SCHUHMACHER, Marta; DOMINGO, Jose L.; GARRETA, Josepa. **Pollutants emitted by a cement plant: health risks for the population living in the neighborhood**. *Environmental Research*, p.198-206, jun. 2004.

SILVA, R. P. **Determinação de HPA em ambiente ocupacional de Indústria de Cimento que co-processa resíduos**. Universidade de São Paulo. Instituto de Química. 2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). 2013. **Relatório anual, 2021**.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO [SNIC)]. **Press Kit 2010**. Disponível em: . Acesso em 13 Nov. 2022.

SIGNORETTI, V.T. **Controle das Emissões de Nox, SOx e Metais Pesados Quando se Utilizam Combustíveis Alternativos e de Alto Teor de Enxofre na Indústria de Cimento**. 2008. 272 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 2008.

[USEPA] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Effects on materials. In: Air quality criteria for particulate matter. 1996. Cap.9**. Disponível em: <http://www.epa.gov/nceawww1/pdfs/partmatt/vol2/0671ch09.pdf>. Acesso em 15 de Nov. 2022.

WBCSD. **The Cement Sustainability Initiative**. 10 years of progress – moving on to the next decade 2012. World Business Council for Sustainable Development. Disponível em: <www.wbcsd.org>. Acesso em 10 Out. 2022.

WOOD, S. C. NO_x Control. **Chemical Engineering Progress**. v. 90, n.1, p 31-8, 1994.

ANEXOS

Tabela 10 - Metodologias utilizadas para as amostragens e ensaios no Forno W2.

PARÂMETRO	NORMA	Limite de Quantificação
ENSAIOS – Instalação Permanente		
Material Particulado (MP)	US.EPA Método 5:2019 – Determinação de material particulado de fontes estacionárias.	2,7 mg
ENSAIOS – Provedor Externo		
Óxidos de enxofre (SOx)	ABNT NBR 12021:2017 - Determinação de Dióxido de Enxofre, Névoas de Ácido Sulfúrico e Trióxido de Enxofre em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias; CETESB L9.228:1992 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de dióxido de enxofre e de nevoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre: método de ensaio. US.EPA Método 8:2019 – Determinação de Ácido Sulfúrico e Dióxido de Enxofre em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias.	SO ₂ : 0,25 mg SO ₃ : 0,30 mg Névoa de H ₂ SO ₄ = 0,40 mg SOx: 0,95 mg
Óxidos Nitrogênio (NOx)	CETESB L9.229:1992 – Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de óxidos de nitrogênio; US.EPA Método 7:2019 - Determinação de emissões de Óxido de nitrogênio de fontes estacionárias.	40 µg
Ácido Clorídrico (HCl) e Cloro Livre (Cl₂)	CETESB L9.231:1994 - Determinação de Ácido Clorídrico e Cloro Livre, em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias.	HCl: 0,90 mg Cl ₂ : 1,50 mg
Ácido Fluorídrico (HF) e Fluoretos (F⁻)	CETESB L9.213:1995 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias determinação de fluoretos pelo método do eletrodo de íon específico: método de ensaio. US.EPA Método 13B:2017 - Determinação das emissões de Ácido Fluorídrico e Fluoretos de fontes estacionárias (Método de eletrodo de íon específico).	F ⁻ (g) = 0,01mg F ⁻ (s) = 0,05mg
THC	EPA 5041A:1996 - Análise para desorção de cartuchos sorventes do trem de amostragem orgânico volátil (VOST).	Tabela 11
BTEX	EPA 5041A:1996 - Análise para desorção de cartuchos sorventes do trem de amostragem orgânico volátil (VOST).	Tabela 12
Metais	US.EPA Método EPA 29:2017 - Determinação de Metais em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias;	Tabela 13
Chumbo inorgânico (Pb)	CETESB L9.234:1995 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Determinação de chumbo inorgânico - Método de ensaio.	0,0005 mg
Mercúrio (Hg)	US.EPA Método 29:2017 - Determinação de Metais em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias.	0,00005 mg
Dioxinas e Furanos	EPA 8290A (2007) - Dibenzodioxinas policloradas (PCDDs) E Dibenzofuranos policlorados (PCDFs) por cromatografia a gás de alta resolução/espectrometria de massa de alta resolução (HRGC/HRMS).	Tabela 14
Compostos orgânicos semivoláteis	EPA 8270D:2007 - Compostos Orgânicos Semivoláteis Por Cromatografia Gás/Espectrometria De Massa.	Tabela 14
ENSAIOS – Instalação da Cimenteira		
Massa Molecular Seca do fluxo gasoso.	CETESB L9.223:1992 – Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso.	28 g/gmol
Umidade	CETESB L9.224:1993 - Determinação da umidade dos efluentes - Método de ensaio. ABNT NBR 11967:1989 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade - Método de ensaio. US.EPA Método 4:2017.	0,91 %

Gases de Combustão (CO e O₂) e Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	US.EPA Método CTM 030:1997 - Determinação de óxidos de nitrogênio (NO e NO ₂), monóxido de carbono e oxigênio (O ₂) utilizando analisadores portáteis.	CO: 1 ppm NO: 1 ppm NO ₂ : 1 ppm O ₂ : 0,1 %
Gases de Combustão (O₂ e CO₂).	US.EPA Método 3A:2017 - Determinação de concentrações de Oxigênio (O ₂) e de Dióxido de carbono (CO ₂) de emissões de fontes estacionárias (procedimento do analisador instrumental).	O ₂ : 0,1 % CO ₂ : 0,09 %
Pontos de amostragem	CETESB L9.221:1990 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de Pontos de Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. US.EPA Método 1:2017 .	-
Velocidade e Vazão	ABNT NBR 11966:1992 – Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e vazão – jul./1989. CETESB L9.222:1992 - Determinação de velocidade e vazão dos gases - Método de ensaio. US.EPA Método 2:2017 .	Vel.: 2,86 m/s
AMOSTRAGEM – Instalação da Cimenteira		
Material Particulado (MP)	US.EPA Método 5:2019 – Determinação de material particulado de fontes estacionárias.	2,7 mg
Óxidos de enxofre (SO_x)	ABNT NBR 12021:2017 - Determinação de Dióxido de Enxofre, Névoas de Ácido Sulfúrico e Trióxido de Enxofre em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias; CETESB L9.228:1992 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de dióxido de enxofre e de nevoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre: método de ensaio. US.EPA Método 8:2019 – Determinação de Ácido Sulfúrico e Dióxido de Enxofre em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias.	SO ₂ : 0,25 mg SO ₃ : 0,30 mg Névoa de H ₂ SO ₄ = 0,40 mg SO _x : 0,95 mg
Óxidos Nitrogênio (NO_x)	CETESB L9.229:1992 – Dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de óxidos de nitrogênio; US.EPA Método 7:2019 - Determinação de emissões de Óxido de nitrogênio de fontes estacionárias.	40 µg
Ácido Clorídrico (HCl) e Cloro Livre (Cl₂)	CETESB L9.231:1994 - Determinação de Ácido Clorídrico e Cloro Livre, em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias.	HCl: 0,90 mg Cl ₂ : 1,50 mg
Ácido Fluorídrico (HF) e Fluoretos (F⁻)	CETESB L9.213:1995 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias determinação de fluoretos pelo método do eletrodo de íon específico: método de ensaio. US.EPA Método 13B:2017 - Determinação das emissões de Ácido Fluorídrico e Fluoretos de fontes estacionárias (Método de eletrodo de íon específico).	F ⁻ (g) = 0,01mg F ⁻ (s) = 0,05mg
THC	EPA 5041A:1996 - Análise para desorção de cartuchos sorventes do trem de amostragem orgânico volátil (VOST).	Tabela 11
BTEX	EPA 5041A:1996 - Análise para desorção de cartuchos sorventes do trem de amostragem orgânico volátil (VOST).	Tabela 12
Metais	US.EPA Método EPA 29:2017 - Determinação de Metais em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias;	Tabela 13
Chumbo inorgânico (Pb)	CETESB L9.234:1995 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Determinação de chumbo inorgânico - Método de ensaio.	0,0005 mg
Mercúrio (Hg)	US.EPA Método 29:2017 - Determinação de Metais em Dutos e Chaminés de Fontes estacionárias.	0,00005 mg
Dioxinas e Furanos	EPA 8290A (2007) - Dibenzodioxinas policloradas (PCDDs) E Dibenzofuranos policlorados (PCDFs) por cromatografia a gás de alta resolução/espectrometria de massa de alta resolução (HRGC/HRMS).	Tabela 14

Fonte: Autor, 2023

Tabela 11 – Limite de Quantificação THC.

Parâmetro	Limite de Quantificação
1,2,4-Trimetilbenzeno 1,3,5-Trimetilbenzeno p-Isopropiltolueno Benzeno Etilbenzeno Isopropilbenzeno (Cumeno) m+p-Xileno n-Alcanos (C5-C10) n-Butilbenzeno n-Propilbenzeno o-Xileno sec-butilbenzeno Estireno terc-Butilbenzeno Tolueno	50 ng,

Fonte: Adaptado de EPA, 1996.

Tabela 12 – Limite de Quantificação BTEX.

Parâmetro	Limite de Quantificação
Benzeno	50 ng,
Etilbenzeno	
Tolueno	
o-xileno	
m,p-xileno	

Fonte: Adaptado de EPA, 1996.

Tabela 13 – Limite de Quantificação Metais.

Parâmetro	Limite de Quantificação
Mercúrio (Hg)	0,00005 mg,
Ródio Total (Rh) Tálio Total (Tl) Cromo Total (Cr)	0,00025 mg,
Zinco Total (Zn) Paládio Total (Pd) Platina Total (Pt) Telúrio Total (Te)	0,0011 mg
Chumbo Total (Pb) Níquel Total (Ni) Antimônio Total (Sb)	

Berílio Total (Be)	0,00055 mg
Cádmio Total (Cd)	
Arsênio Total (As)	
Cobalto Total (Co)	
Cobre Total (Cu)	
Estanho Total (Sn)	
Manganês Total (Mn)	
Selênio Total (Se)	
Vanádio Total (V)	

Fonte: Adaptado de EPA, 2017.

Tabela 14 – Limite de Quantificação Dioxinas e Furanos.

Parâmetro	Limite de Quantificação
2,3,7,8-Tetraclorodibenzo-p-dioxina	5,00 pg
1,2,3,7,8-Pentaclorodibenzo-p-dioxina	12,50 pg
2,3,7,8-Tetraclorodibenzofurano	0,5 pg
1,2,3,7,8-Pentaclorodibenzofurano	0,375 pg
2,3,4,7,8-Pentaclorodibenzofurano	3,75 pg
1,2,3,4,6,7,8-Heptaclorodibenzofurano	0,125 pg
1,2,3,4,7,8,9-Heptaclorodibenzofurano	
1,2,3,4,6,7,8-Heptaclorodibenzo-p-dioxina	
Octaclorodibenzofurano	0,0075 pg
Octaclorodibenzo-p-dioxina	
1,2,3,4,7,8-Hexaclorodibenzo-p-dioxina	1,25 pg
1,2,3,6,7,8-Hexaclorodibenzo-p-dioxina	
1,2,3,7,8,9-Hexaclorodibenzo-p-dioxina	
1,2,3,6,7,8-Hexaclorodibenzofurano	1,25 pg
1,2,3,7,8,9-Hexaclorodibenzofurano	
1,2,3,4,7,8-Hexaclorodibenzofurano	
2,3,4,6,7,8-Hexaclorodibenzofurano	

Fonte: Adaptado de EPA , 2007.

Tabela 15 – Limites de concentração segundo a CONAMA n° 499/20.

Poluente	Limites Máximos de Emissão
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)	39 mg/ Nm ³ corrigido a 7% O ₂
Mercúrio (Hg) – Classe I	0,05 mg/ Nm ³ corrigido a 7% O ₂
Chumbo (Pb) – Classe I	0,35 mg/ Nm ³ corrigido a 7% O ₂

Cádmio (Cd) – Classe I	0,10 mg/ Nm ³ corrigido a 7% O ₂
Tálio (Tl) – Classe I	0,10 mg/ Nm ³ corrigido a 7% O ₂
(As+Be+Co+Ni+Se+Te) - - Classe II	1,4 mg/ Nm ³ corrigido a 7% O ₂
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn) – Classe III	7,0 mg/ Nm ³ corrigido a 7% O ₂
NOx (expresso como NO ₂)	800 mg/ Nm ³ corrigido a 10% O ₂
SOx (medido como SO ₂)	<p>280 mg/ Nm³ corrigido a 11% de O₂, exceto quando o enxofre for proveniente da matéria-prima. Nesses casos, o limite máximo se baseará no valor de SOx calculado da seguinte forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Para um teor de até 0,2% de SO₃ na farinha: 400 mg/Nm³, expresso como SO₂; - Para um teor entre 0,2% e 0,4% de SO₃ na farinha, conforme a fórmula abaixo: 400 /Nm³ + (%SO₃ -0,2).4000 mg/Nm³, expresso como SO₂ ; - Para um teor acima de 0,4% de SO₃ na farinha: 1.200 mg/Nm³, expresso como SO₂
Dioxinas e furanos	0,1 ng/ Nm ³ corrigido a 10% O ₂

Fonte: CONAMA, 2020.