

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR – MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**LETÍCIA RAMOS RESENDE**

**ESTUDO DA FORMAÇÃO E EMISSÃO DE POLUENTES ORIGINADOS DE  
COPROCESSAMENTO EM FÁBRICAS DE CIMENTO DE MINAS GERAIS**

**FORMIGA - MG**  
**2018**

LETÍCIA RAMOS RESENDE

ESTUDO DA FORMAÇÃO E EMISSÃO DE POLUENTES ORIGINADOS DE  
COPROCESSAMENTO EM FÁBRICAS DE CIMENTO DE MINAS GERAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Química do UNIFOR –  
MG, como requisito parcial para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Química.  
Orientador: Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta.

FORMIGA - MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca UNIFOR-MG

R433 Resende, Letícia Ramos.

Estudo da formação e emissão de poluentes originados  
coprocessamento em fábricas de cimento de Minas Gerais / Letícia

Ramos

Resende. – 2018.

73 f.

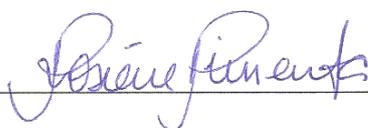
Catálogo elaborado na fonte pela bibliotecária  
Rosana Guimarães Silva – CRB6-3064

LETÍCIA RAMOS RESENDE

ESTUDO DA FORMAÇÃO E EMISSÃO DE POLUENTES ORIGINADOS DE  
COPROCESSAMENTO EM FÁBRICAS DE CIMENTO DE MINAS GERAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Química do UNIFOR –  
MG, como requisito parcial para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



---

Prof.<sup>a</sup> Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta

Orientadora



---

Prof. Dr. Alex Magalhães de Almeida

UNIFOR-MG



---

Prof. Me. Samuel da Silva Ribeiro

UNIFOR-MG

Formiga, 14 de novembro de 2018.

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que foi minha maior força nos momentos difíceis. Aos meus pais Ricardo e Leila, minha irmã e minha sobrinha que sempre me apoiaram.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que sem Ele nada disso seria possível, dou graças e louvo pelo dom da vida e por proporcionar-me que chegasse até aqui.

Aos meus pais, irmã, sobrinha e todos os familiares que não mediram esforços e estiveram ao meu lado, motivando-me, apoiando-me e dando todo o apoio necessário para que eu chegasse onde cheguei.

Ao Centro Universitário de Formiga, seu corpo docente, direção, administração e demais colaboradores pela oportunidade de fazer o curso em uma instituição e ambiente de qualidades.

A todos os professores que dedicaram a mim não somente conhecimentos teóricos, mas também colaboraram no processo de crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos e colegas de faculdade pelo companheirismo nesta etapa da minha vida.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

O meu muito obrigada!

## RESUMO

A poluição atmosférica é um assunto de grande importância por provocar efeitos nocivos não somente para a localidade em que está sendo emitida, mas também para toda a região ao seu redor, prejudicando meio ambiente e os seres. Fábricas de cimento são grandes responsáveis por essa poluição, com por exemplo óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, materiais particulados, causadores de chuvas ácidas, destruição da camada de ozônio, smog entre outros. Porém há estudos sobre como controlar esses níveis de emissão, como por exemplo o coprocessamento, uma técnica de queima de resíduos sólidos industriais que seriam descartados em um processo que necessita de altas temperaturas para a produção de um determinado produto. Este trabalho teve como objetivo estudar a formação destes poluentes em fábricas de cimento que utilizam o coprocessamento, identificando alternativas para controle das emissões dos fornos rotativos. O trabalho foi feito utilizando bibliografias (livros, dissertações, trabalhos de conclusão de curso), relatórios de automonitoramento das cimenteiras, avaliando indústrias de cimento de Minas Gerais que utilizam o coprocessamento no seu processo de fabricação. Levando em consideração os níveis permitidos para emissões de  $\text{NO}_x$  e materiais particulados por exemplo, algumas indústrias cimenteiras ainda precisam melhorar tais aspectos. Raspas de pneu como material de coprocessamento têm mostrado um bom resultado na diminuição de óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, que devem estar abaixo dos níveis permitidos. O coprocessamento atende muito bem as indústrias cimenteiras em termos de redução de custo na produção, redução nas emissões de poluentes, colabora com a sociedade e o meio ambiente, queimando materiais como pneus que demorariam anos para se degradarem e se caso fossem descartados indevidamente, causariam problemas como o acúmulo de água e riscos de incêndio.

Palavras-chave: Indústria Cimenteira. Emissões. Coprocessamento.

## ABSTRACT

Air pollution is a matter of great importance for causing harmful effects not only for the region in which it is being emitted, but also for the whole region around it, damaging the environment and the beings. Cement plants are largely responsible for this pollution, with for example nitrogen oxides, sulfur oxides, particulates, causers of acid rain, destruction of the ozone layer, smog among others. However, there are studies regarding how to control the emission levels, such as coprocessing, a technique of burning industrial solid waste that would be discarded in a process that requires high temperatures for the production of a certain product. The objective of this paperwork was to study the formation of these pollutants in cement plants that use coprocessing, identifying alternatives to control the emissions of rotary kilns. The work was done using books, dissertations, course completion work, self-monitoring reports of cement plants, evaluating cement industries in Minas Gerais that use coprocessing in their manufacturing process. Taking as reference the allowed levels of emission for NO<sub>x</sub> and particulate materials for exemple, some cement industries need to improve such aspects. Tire scraps as coprocessing material has shown a good result regarding the decrease of sulfúfur oxide and nitrogen oxide, which must be lower than the allowed level. Coprocessing serves cement companies very well in terms of reducing production costs, reducing pollutant emissions, collaborating with society and the environment, burning out materials such as tires that would take years to degrade and if they were disposed of unduly, would cause such as water accumulation and fire hazards.

Keywords: Cement Industry. Emissions. Coprocessing.

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Venda acumulada de cimento em 12 meses - mercado interno brasileiro .....	21
Gráfico 2 - Evolução dos resíduos coprocessados em fornos de cimento.....	32
Gráfico 3 - Substitutos de combustíveis fósseis (Combustíveis alternativos) no coprocessamento.....	32
Gráfico 4 - Principais matérias-primas alternativas utilizadas no coprocessamento.....	33
Gráfico 5 - Combustíveis oriundos de biomassa utilizada no coprocessamento.....	34
Gráfico 6 - Resultados de automonitoramento de NOx dos fornos de clínquer.....	49
Gráfico 7 - Resultados de automonitoramento de SOx dos fornos de clínquer .....	55
Gráfico 8 - Resultados de automonitoramento de MP dos fornos de clínquer.....	57
Gráfico 9 - Resultados de automonitoramento de HF dos fornos de clínquer .....	59
Gráfico 10 - Resultados de automonitoramento de HCl dos fornos de clínquer.....	60
Gráfico 11 - Resultados de automonitoramento de THC dos fornos de clínquer .....	61
Gráfico 12 - Emissão de kg CO <sub>2</sub> /ton de clínquer para os casos estudados (Composição 1) ...	64
Gráfico 13 - Emissão de kg CO <sub>2</sub> /ton de clínquer para os casos estudados (Composição 2) ...	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do processo de produção de cimento Portland. ....	25
Figura 2 - Unidades licenciadas para coprocessamento no Brasil.....	30
Figura 3 - Divisão de regionais do estado mineiro.....	45
Figura 4 - Coluna de SCR .....	52
Figura 5 - Possíveis pontos de introdução de SNCR.....	53
Figura 6 - Torre de ciclone e forno de clínquer com pré aquecedor .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de cimento no mundo .....	19
Tabela 2 - Vendas de cimento - Dados Preliminares (Mar/2018) .....	20
Tabela 3 - Consumo de Combustível do Setor Cimenteiro Brasileiro (em 103 tep).....	22
Tabela 4 - Consumo de Combustível do Setor Cimenteiro Brasileiro (em %) .....	23
Tabela 5 - Sequência de reações no processo de fabricação .....	26
Tabela 6 - Principais compostos químicos do clínquer .....	26
Tabela 7 - Reações de Formação e Absorção de SO <sub>2</sub> presentes na fabricação do cimento .....	37
Tabela 8 - Limites de emissões de NO <sub>2</sub> para poluentes atmosféricos na produção de cimento .....	39
Tabela 9 - Padrões de Emissão .....	41
Tabela 10 - Parâmetros de Emissões para materiais particulados .....	42
Tabela 11 - Quantidades máximas de metais para entrada no forno e PCI mínimo (substituição de combustível) .....	43
Tabela 12 – Critérios para equivalência .....	43
Tabela 13 - Composição da farinha de cru na entrada do forno.....	62
Tabela 14 - Composição Química e PCI dos combustíveis utilizados em fornos de clínquer .	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Oitos tipos de cimento e suas nomenclaturas usuais.....	28
Quadro 2 - Grupos cimenteiros e suas respectivas fábricas que utilizam coprocessamento ....	31
Quadro 3 - Comparativo das principais modificações.....	40
Quadro 4 - Localidade dos fornos analisados.....	45
Quadro 5 - Atividades de coprocessamento dos fornos de clínquer analisados.....	46
Quadro 6 - Porcentagem de combustíveis por mistura para cada caso .....	63

## LISTA DE ELEMENTOS

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alumina
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de cálcio
$\text{CaO}$	Cal
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de cálcio
$\text{CO}$	Monóxido de carbono
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de Ferro
$\text{H}$	Hidrogênio
$\text{N}_2$	Dinitrogênio
$\text{NO}$	Óxido Nítrico
$\text{NO}_x$	Óxidos de Nitrogênio
$\text{N}_2\text{O}$	Óxido Nitroso
$\text{O}_2$	Oxigênio
$\text{SiO}_2$	Sílica
$\text{SO}_2$	Dióxido de Enxofre
$\text{SO}_3$	Óxido sulfúrico
$\text{SO}_x$	Óxidos de Enxofre
$\text{TiO}_2$	Dióxido de Titânio
$\text{V}_2\text{O}_5$	Pentóxido de Vanádio

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CLA	Concreto Latino-Americano
DN	Deliberação Normativa
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e estatística
IEA	International Energy Agency
MMA	Ministério do Meio Ambiente
SCR	Redução Seletiva Catalítica
SNCR	Redução Seletiva Não Catalítica
SNIC	Sistema Nacional da Indústria do Cimento
SINDBORPR	Sindicato das Indústrias de Artefatos de Borracha do Estado do Paraná
TCH	Hidrocarbonetos Totais
USEPA	United States Environmental Protection Agency
USGS	United States Geological Survey (Serviços Geológicos do Estados Unidos)

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	16
<b>3.</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	17
<b>4.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
<b>4.1</b>	<b>O cimento</b> .....	18
<b>4.2</b>	<b>Cimento no Brasil e no mundo</b> .....	18
<b>4.3</b>	<b>Processo de fabricação do cimento</b> .....	23
<b>4.4</b>	<b>Coprocessamento</b> .....	28
<b>4.5</b>	<b>Principais emissões atmosféricas na produção de cimento</b> .....	34
<b>4.6</b>	<b>Controle de emissões de poluentes</b> .....	38
<b>5.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	44
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	48
<b>6.1</b>	<b>Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)</b> .....	48
<b>6.2</b>	<b>Óxidos de Enxofre (SO<sub>x</sub>)</b> .....	54
<b>6.3</b>	<b>Materiais Particulados (MP)</b> .....	56
<b>6.4</b>	<b>Ácido Fluorídrico (HF) e Ácido Clorídrico (HCl)</b> .....	58
<b>6.5</b>	<b>Hidrocarbonetos</b> .....	61
<b>6.6</b>	<b>Utilização de raspas de pneus como coprocessamento</b> .....	62
<b>6.7</b>	<b>Propostas de melhoria no sistema de automonitoramento para controle das emissões</b> .....	66
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	67
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de cimento Portland tem alta despesa de energia térmica para a produção do clínquer, que é o constituinte principal do cimento, que passa por processos de secagem, aquecimento, precalcinação, clínquerização, resfriamento e de energia elétrica, devido aos equipamentos para a preparação das matérias-primas e, para a produção do cimento, envolvendo etapas como, extração, britagem, moagem, homogeneização, produção, armazenamento, moagem com aditivos e expedição (RAMOS, 2015).

Segundo Belato (2013), mais de 80% do consumo térmico ocorre durante a queima de combustíveis para a produção do clínquer, o que conseqüentemente causa grandes impactos devido às emissões de gases poluentes.

Para buscar solucionar totalmente ou parcialmente os problemas que se relacionavam com a utilização do óleo de petróleo como combustível principal para a obtenção de energia térmica no processo de fabricação do cimento, tanto em relação aos altos gastos com este combustível, quanto em relação aos altos níveis de emissões, foi que o coprocessamento, uma técnica baseada na queima de resíduos sólidos industriais juntamente com a necessidade de uma alta temperatura para a fabricação do clínquer, foi inserido ao processo de produção do cimento.

Ramos (2015) afirma que foi justamente na procura por soluções para os resíduos industriais que o setor industrial gera, que os Estados Unidos em 1974 iniciaram testes de queima de resíduos orgânicos em fornos de clínquer, com compostos clorados perigosos, com a intenção de que pudesse destruir os resíduos e recuperar energia. Fornos longos com alto tempo de resistência dos gases, foram os utilizados para as primeiras queimas e destruições de resíduos.

Conforme Resende (2017) a poluição atmosférica é uma preocupação mundial devido aos efeitos nocivos de curto e longo prazos, “o aumento do nível das emissões de poluentes atmosféricos numa região pode intensificar esses efeitos nocivos, nessa região como em regiões ao seu redor, ou até mesmo em regiões completamente distantes da origem da emissão”.

Com o crescimento intensivo dos estudos para a utilização de materiais que substituíssem o combustível consumido para fornecer energia térmica ao processo, seja com combustíveis mais baratos, pneus, resíduos industriais, entre outros, houve uma precisão de regulamentação e controle do coprocessamento. Em 1983 no Rio de Janeiro, a FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente) iniciava o processo de regulamentação

da atividade do coprocessamento, em 1993 a norma relativa aos níveis de emissões e no ano seguinte o licenciamento da atividade. Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa do COPAM (Conselho Estadual de Política Ambiental) criada em 1998, sofrendo alterações ao longo do tempo, é a que rege sobre o estado.

O estado de Minas Gerais segundo Luiz (2016) tem um potencial elevado de adoção da técnica de coprocessamento, devido ao fato de ser o maior estado de produção de cimento do Brasil. Diversas cimenteiras estão localizadas próximas a áreas urbanas, o que se faz necessário uma realização de um controle bem rígido das emissões.

De acordo com Ramos (2015), uma das premissas das Normas e Regulamentações é de que, a atividade de coprocessamento não pode afetar a qualidade do produto final, ou seja, o cimento e nem mesmo o meio ambiente, aumentando os níveis de emissões. Por este fato, há uma necessidade de se fazer uma análise da viabilidade técnica ou econômica da técnica em fábricas de cimentos, além de analisar-se o impacto ambiental que desta atividade na região em que a cimenteira está instalada.

Com isso, este estudo possibilita analisar a atividade de coprocessamento de resíduos industriais e de combustíveis alternativos, os padrões a serem considerados, ajustes se necessário, sem afetar a qualidade do produto final.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho serão listados respectivamente a seguir.

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar as emissões de poluentes em fornos de clínquer das fábricas de Minas Gerais que utilizam coprocessamento.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Os objetivos específicos são: identificar os causadores e estudar as tecnologias disponíveis para controle/minimização da emissão de poluentes.
- Estudar sobre a substituição de combustíveis utilizados pela grande maioria das indústrias, como carvão mineral e vegetal, coque de petróleo e resíduos, além dos tipos de materiais utilizados para a técnica de coprocessamento e seus efeitos das emissões.
- Estudar o controle dos poluentes de acordo com legislações de Minas Gerais (COPAM 154) e compará-las com diferentes legislações, como Resolução CONAMA, CETESB e Diretiva Europeia.

### 3. JUSTIFICATIVA

O mercado atual do cimento, segundo fontes como o Sistema Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), a Concreto Latino-Americano (CLA) e o Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE) não é muito favorável. Em conformidade com pesquisas, a indústria cimenteira está em um momento complexo com quedas na variação percentual e uma demanda heterogênea em muitas regiões, mas ainda tem uma importância significativa no mercado com grande impacto nas emissões atmosféricas.

Fábricas cimenteiras são responsáveis por grande parte da poluição atmosférica, a qual é uma questão preocupante para todos, por se tratar de um problema que afeta uma boa parte da população mundial. Altas emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), óxido de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), compostos de chumbo, são gases em sua grande maioria tóxicos e nocivos ao meio ambiente e as pessoas (SOUZA et al., 2014).

O órgão responsável pelas linhas de direções tomadas em relação a preservação e exploração do meio ambiente e recursos naturais, ou seja, o que delimita as condições de emissões destes poluentes é o Conama – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Devido a uma grande rigorosidade com emissões de poluentes, as indústrias sentiram a necessidade de buscar meios para diminuir as emissões, evitando danos prejudiciais ao meio ambiente e a saúde dos seres humanos.

O tema, formação e emissão de poluentes originados de coprocessamento em fábricas de cimento desperta interesse por se tratar de um assunto importante e citar os benefícios, com redução de chuvas ácidas, poluição, efeito smog, entre outros, que são encontrados ao buscar uma redução nessas emissões. O que foi de caráter decisório para a realização da pesquisa em questão.

## **4. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1 O cimento**

O cimento tem sua origem a cerca de 4500 anos atrás, em que monumentos do Egito Antigo utilizavam uma liga feita por mistura de gesso calcinado. Obras gregas e romanas, como Panteão e Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica, que apresentavam propriedades de endurecimento sob a ação da água (BATTAGIN, 2009).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 1756 o inglês John Smeaton obteve um produto com alta resistência por meio da calcinação de calcários moles e argilosos, dando assim um passo primordial para o desenvolvimento do cimento. Com resultados semelhantes ao de Smeaton, em 1818, o francês Vicat foi considerado o inventor do cimento artificial.

Em 1824 Joseph Aspdin, um construtor inglês, percebeu através da queima de pedras calcárias e argila e transformando-as em um pó fino, que conseguia uma mistura que depois de seca, se tornava dura como pedras que eram usadas em construções e que essa mistura não se dissolvia em água. Devido a coloração e propriedades de durabilidade e solidez iguais as rochas da ilha britânica Portland, Aspdin patenteou o nome que se conhece hoje como cimento Portland. (BATTAGIN, 2009).

### **4.2 Cimento no Brasil e no mundo**

A produção mundial de cimento no ano de 2017 totalizou em 4,1 milhões de toneladas conservando o número com relação ao ano anterior. Dados da produção de cimento mundial, apresentados na TAB. 1 a seguir.

Tabela 1 - Produção de cimento no mundo

País	Produção de cimento (em 10 <sup>3</sup> t)	
	2016	2017
Arábia Saudita	62,0	63,0
Brasil	57,0	54,0
China	2400,0	2400,0
Coréia do Sul	57,0	59,0
EUA (Incluindo Porto Rico)	85,0	86,3
Índia	280,0	270,0
Irã	55,0	56,0
Japão	53,3	53,0
Rússia	56,0	58,0
Turquia	75,4	77,0
Vietnã	77,3	78,0
Outros países	724,0	750,0
Total	4100,0	4100,0

Fonte: USGS: Mineral Commodity Summaries, 2018.

Países como Índia, Brasil e Japão, tiveram um decréscimo na produção, mas países como Estados Unidos, Egito, Indonésia, Irã, Coréia, Rússia, Arábia Saudita e Turquia, tiveram crescimento em relação ao ano de 2016.

As primeiras iniciativas de se instalar uma indústria de cimento no Brasil ocorreram no final do século 19, e são precursoras à “fase industrial” de produção do cimento. O primeiro forno rotativo foi instalado já no início do século 20 no Espírito Santo e em seguida veio a fábrica de Perus, a 23 km da cidade de São Paulo, instalada em 1926. Até esta época, o Brasil importava cerca de 97% do cimento aqui consumido de países como Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha, Dinamarca, Bélgica e Argentina. (MMA, 2010, p. 1)

Por causa de sua grande dimensão continental, seus 7 mil quilômetros de costa marítima, fronteira com 10 países e uma área de 8,5 mil quilômetros quadrados, que a indústria cimenteira no Brasil começou a se desenvolver em São Paulo no ano de 1926 e depois no Rio de Janeiro. A partir de 1933 a produção nacional ultrapassou as importações, fazendo com que assim, se iniciasse um processo consistente de consolidação e crescimento (KIHARA; VISEDO, 2014).

Foi nos anos 70, entretanto, que o chamado “milagre econômico” impulsionou a indústria do cimento, estimulada pelos inúmeros projetos habitacionais e de infraestrutura da época. Em apenas 10 anos, o consumo per capita passou de 100 para 227 kg por habitante. Nesse mesmo período, a produção de cimento triplicou, saltando de 9 para 27 milhões de toneladas anuais, e foram instaladas 24 novas fábricas para abastecer essa crescente demanda. (KIHARA; VISEDO, 2014).

Segundo a SNIC (2016), o parque industrial brasileiro é composto por 100 fábricas produtoras de cimento, as quais são controladas por 24 grupos industriais, espalhadas em 88 municípios em 24 estados do país, empregando 25 mil pessoas diretamente, com capacidades de produção de 100 milhões de toneladas por ano de cimento e a produção e consumo aparente no ano de 2016 foi de 57 milhões de toneladas para ambos os quesitos.

Na Rússia, em 2017, a indústria cimenteira fabricou 58 milhões de toneladas de cimento e importou mais de 4,3 milhões de toneladas e estudos da EY (Ernest & Young) revelam que este número tende a aumentar significativamente – com uma estimativa de 70 milhões de toneladas – até 2022. Ao contrário do cenário que se encontra no Brasil, em que a indústria cimenteira, vem enfrentando quedas acentuadas na produção desde 2014, com projeção para retomada de crescimento de 3% em 2018 e aumento de venda entre 1 e 2% (SANTOS, 2018). De acordo com o SNIC (2018) as vendas de cimento no mercado interno do Brasil totalizaram 12,6 milhões de toneladas, o que representa uma queda de 3% em relação ao primeiro trimestre de 2017 (TAB. 2).

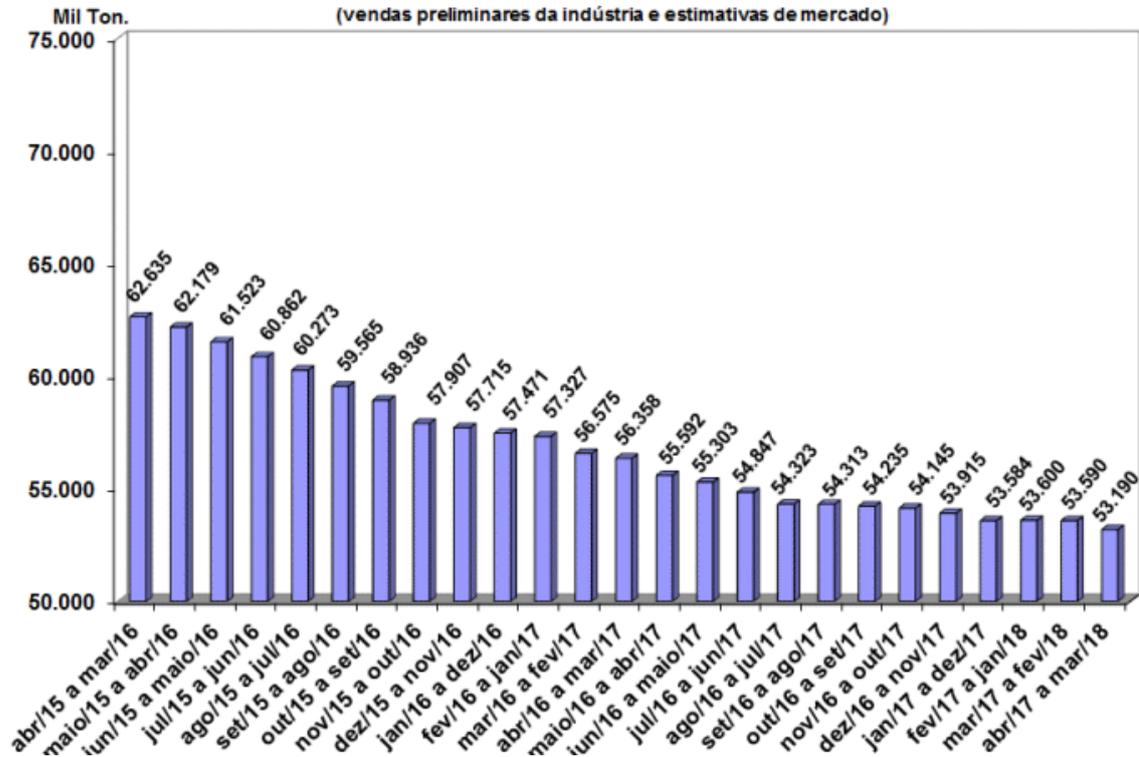
Tabela 2 - Vendas de cimento - Dados Preliminares (Mar/2018)

Origem do Despacho	Nº de informantes	Março (1000 ton.)		Mar/2018 Mar/2017	Jan-Mar (1000 ton.)		Jan-Mar/2018 Jan-Mar/2017
		2017	2018		2017	2018	
Norte	(3)	230	186	-19,1%	657	563	-14,3%
Nordeste	(15)	1026	853	-16,9%	2914	2618	-10,2%
Centro-Oeste	(4)	469	429	-8,5%	1254	1238	-1,3%
Sudeste	(11)	2236	2148	-3,9%	6028	6083	0,9%
Sul	(5)	798	743	-6,9%	2135	2091	-2,1%
Venda Mercado Interno		4759	4359	-8,4%	12988	125693	-3,0%
Exportação		15	7	-53,3%	25	18	-28,0%
Venda total		4774	4366	-8,5%	13013	12611	-3,1%
Despacho 1.000 ton/dia útil							
		mar/17	fev/18	mar/18	mar/2018 fev/2018	mar/2018 mar/2017	Jan-Mar/2018 Jan-Mar/2017
Vendas Mercado Interno por dia útil		190,4	194,0	185,5	-4,4%	-2,6%	-0,9%
Nº de Dias úteis		25,0	20,0	23,5	17,5%	-6,0%	-2,2%

Fonte: SNIC, 2018

Segundo a SNIC (2018) “Na comparação do acumulado nos últimos 12 meses (abril de 2017 a março de 2018) a queda registrada no consumo aparente atingiu 5,6% sobre igual período anterior (abril de 2016 a março de 2017). As importações acumuladas neste período totalizaram 335 mil toneladas, com queda de 9,5%”. Dados demonstrados no GRAF. 1.

Gráfico 1 - Venda acumulada de cimento em 12 meses - mercado interno brasileiro



Fonte: SNIC, 2018.

Camillo (2018), presidente do SNIC acredita em uma recuperação desses números: “esperamos um melhor desempenho a partir do próximo trimestre e devemos fechar o ano com crescimento entre 1% e 2%”, e aponta que

A maioria dos indicadores coincidentes e antecedentes para o consumo de cimento estão com uma tendência positiva, apenas os indicadores relacionados à confiança empresarial e do consumidor continuam impactando negativamente. Mesmo com uma melhor perspectiva para 2018, a capacidade ociosa da indústria permanecerá num nível elevado, próximo a 45% (CAMILLO, 2018, p.1)

Em uma fábrica de cimento, a despesa com energia é muito grande, seja ele térmico, por meio de combustíveis utilizados em fornos na produção de clínquer ou na forma de energia elétrica que é consumida em todo o processo para funcionamento das máquinas, para os fornos e moinhos girarem, entre outras coisas. Mas, a maior parte da energia utilizada, provem da energia térmica ao longo da queima de combustíveis (ECYCLE, 2017).

No final da década de 70, o país enfrentava uma crise energética devido a um aumento nos preços internacionais do petróleo, o que levou o Governo Federal a buscar soluções para controlar as importações de petróleo e derivados, os quais o país era altamente dependente, substituindo por energéticos de origem nacional (KIHARA; VISEDO, 2014).

Segundo Santi e Filho (2004), em 1979 a indústria brasileira para suprir 93% das necessidades de energia térmica utilizava óleo combustível. E neste mesmo ano, um protocolo – Protocolo do Carvão – assinado entre o Governo, o Setor Cimenteiro e o de Extração do Carvão, tinha como uma das soluções um desafio de reduzir o consumo de óleo combustível na indústria cimenteira intensiva em energia, substituindo-o pelo carvão nacional, “o documento visava criar condições e implementar medidas que propiciassem o desafio de reduzir ao máximo e no mais curto prazo possível o consumo de óleo combustível no setor de cimento brasileiro” (KIHARA; VISEDO, 2014).

O problema hoje já não é mais o óleo combustível, que praticamente deixou de ser utilizado. E o carvão mineral não se tornou o seu substituto. Além de o nacional ser de baixíssimo poder calorífico, inadequado, o grau de emissão dessa fonte de energia não recomenda seu uso em grande escala. Contudo, outras fontes alternativas passaram a ser buscadas e utilizadas, como o coprocessamento de resíduos e o maior uso de biomassa (ABCP, 2014, p. 1)

Além de combustíveis tradicionais, como o carvão mineral, o coque de petróleo, gás natural e derivados do petróleo, outros materiais são utilizados, como o carvão vegetal, o que pode ser demonstrado na TAB. 3, que apresenta o consumo de energia no setor de cimento no Brasil nos anos de 2007 a 2017 em tonelada.

Tabela 3 - Consumo de Combustível do Setor Cimenteiro Brasileiro (em 103 tep)

<b>Identificação</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>
GÁS NATURAL	24	25	26	23	29	55	31	25	12	5
CARVÃO MINERAL	51	53	51	52	98	108	133	123	70	60
LENHA	0	0	0	0	37	81	83	79	70	64
ÓLEO DIESEL	41	43	42	45	65	70	68	72	60	55
ÓLEO COMBUSTÍVEL	26	29	29	8	20	17	17	14	9	5
ELETRICIDADE	450	497	500	553	598	645	673	681	611	568
CARVÃO VEGETAL	222	249	55	63	178	142	128	122	109	99
COQUE DE PETRÓLEO	2300	2561	2727	3161	3582	3578	3696	3763	3386	3048
OUTRAS NÃO ESPECÍFICADAS	330	362	349	350	427	440	458	460	417	366
<b>TOTAL</b>	<b>3444</b>	<b>3820</b>	<b>3778</b>	<b>4255</b>	<b>5033</b>	<b>5135</b>	<b>5287</b>	<b>5338</b>	<b>4744</b>	<b>4271</b>

Fonte: EPE (2017).

Analisando-se a TAB. 3 nota-se que o coque de petróleo é a fonte de energia principal da indústria cimenteira, que segundo Leão (2012), este material possui um teor calorífico elevado, baixo custo e seu teor de enxofre depende do petróleo que o coque é originado.

Na TAB. 4 contém o mesmo consumo de energia no setor cimenteiro do Brasil, porem em porcentagens, de acordo com os balanços energéticos nacional de 2007 a 2016.

Tabela 4 - Consumo de Combustível do Setor Cimenteiro Brasileiro (em %)

Identificação	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
CARVÃO MINERAL	1,5	1,4	1,3	1,2	1,9	2,1	2,5	2,3	1,5	1,4
ÓLEO COMBUSTÍVEL	0,7	0,8	0,8	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
ELETRICIDADE	13,1	13,0	13,2	13,0	11,9	12,6	12,7	12,8	12,9	13,3
CARVÃO VEGETAL	6,4	6,5	1,5	1,5	3,5	2,8	2,4	2,3	2,3	2,3
COQUE DE PETRÓLEO	66,8	67,1	72,2	74,3	71,2	69,7	69,9	70,5	71,4	71,4
OUTRAS	11,5	11,3	11,0	9,8	11,1	12,6	12,1	11,9	11,8	11,5
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: EPE, 2017.

Nota-se que a maior parte (71,4%) do combustível utilizado, continua sendo o coque de petróleo ao passar do tempo e o carvão vegetal tem uma utilização significativa também em relação aos outros.

#### 4.3 Processo de fabricação do cimento

O aglomerado mais utilizado na construção civil, segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2011), é o Cimento Portland, que é um pó acinzentado bem fino, constituído por silicatos e aluminatos de cálcio. Dentre as suas inúmeras características e propriedades, o cimento é moldável se misturado à água e tem uma capacidade de desenvolver uma alta capacidade de resistência mecânica ao longo do tempo.

As principais matérias primas que compõem o cimento segundo Gauto e Rosa (2011) são o calcário – que é constituído de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), contendo algumas impurezas como magnésio, sílica, ferro, alumínio – e a argila – constituída por silicatos contendo alumínio e ferro, potássio, magnésio, sódio, cálcio, titânio e outros – é utilizada

como fornecedora de óxido de alumínio, ferro e silicato para a pasta do cimento. Quando há uma falta desses componentes na argila, materiais como bauxita, minério de ferro ou areia são utilizados para correção dos respectivos componentes e, por fim, o gesso que é basicamente constituído de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), é utilizado como produto final adicionado na fabricação do cimento para que regule o tempo de endurecimento, devido ao fato de ocorrer reações de hidratação nessa fase da produção.

De acordo com Gauto e Rosa (2011) existem dois métodos de fabricação de cimento que são processos secos e úmidos, em que as matérias primas citadas anteriormente – calcário, argila e em outra parte do processo, o gesso também – são extraídas de jazidas e encaminhadas para um processo de britagem, para que diminua a granulometria. Ambos métodos produzem um produto intermediário, conhecido como clínquer.

O processo de via úmida segundo Gauto e Rosa (2011) tem vantagens como um melhor manuseio e transporte das matérias primas, menor desgaste nos moinhos mas é pouco utilizado por ter um consumo elevado de energia para eliminação da água utilizada. Se comparado a um processo de via seca que consome em média 750 kcal de um forno, um processo de via úmida consome cerca de 1250 kcal. O forno de um processo por via seca é mais curto que o de via úmida. O foco neste trabalho será dado ao processo de via seca por ser o mais utilizado.

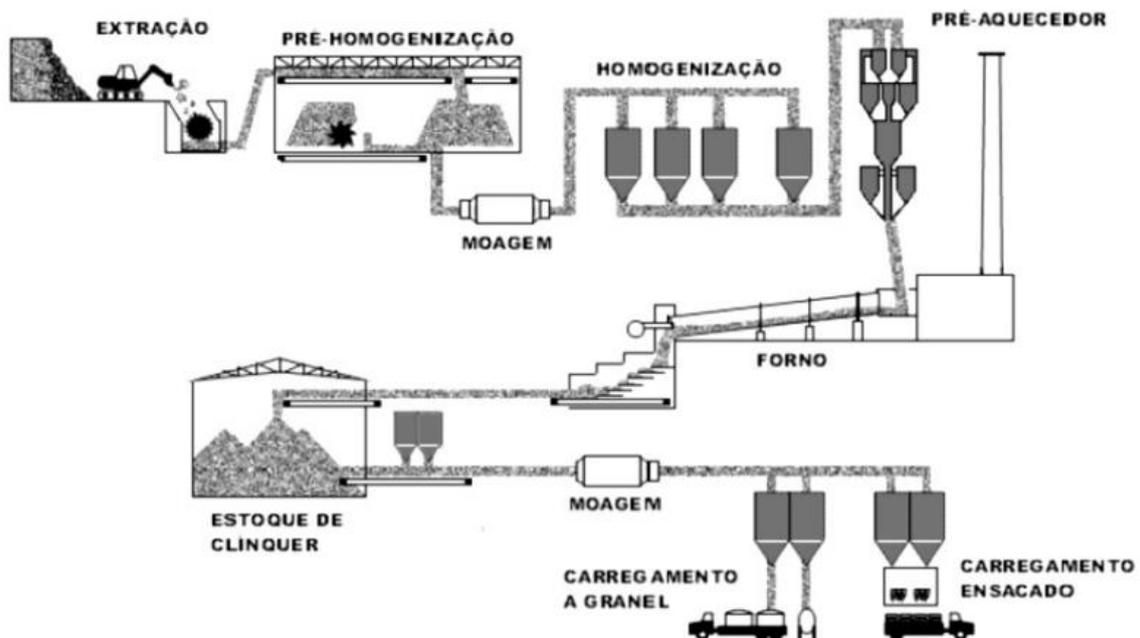
Depois das matérias primas extraídas das jazidas, britadas e misturadas em proporções de aproximadamente 90% de calcário e 10% de argila, denominada de farinha crua, esta passa por um moinho de bolas, rolos ou até mesmo de barras. É nessa etapa que se começa o início da mistura das matérias primas e sua pulverização. Esta mistura crua é homogeneizada em silos de grande porte através de processos por gravidade ou pneumáticos. Dos silos, a farinha passa por pré-aquecedores, os quais utilizam do calor gerado pelo forno, provocando assim um aquecimento do material, e é introduzida no forno rotativo que é ligeiramente inclinado e com dimensões de dois a seis metros de comprimento de diâmetro, chegando a uma temperatura média de 1450 °C, resultando assim num material denominado clínquer que é imediatamente resfriado ao sair do forno e armazenado nos silos (GAUTO; ROSA, 2011).

Quando submetido a uma temperatura maior que 800 °C, o calcário (matéria-prima principal) sofre uma reação química em que o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente em sua composição transforma-se em cal ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Esta cal formada reage com a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), com o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e com a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), materiais provenientes da argila, e outras matérias primas, formando o clínquer. E quando há uma falta de  $\text{SiO}_2$ , há necessidade de correção, o que pode ser feito com a areia, como citado

anteriormente, e a deficiência de ferro, suprida com hematita (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2011).

O clínquer formado nos fornos e armazenados nos silos, juntamente com gesso e outros aditivos, são reduzidos a pó através de um moinho de cimento. O gesso tem função de retardar o endurecimento do clínquer para que o processo não aconteça de imediato quando adicionada a água. O cimento produzido é armazenado em silos e depois são expedidos ensacados ou a granel (GAUTO; ROSA, 2011). A FIG. 1 apresenta de forma esquemática o processo de fabricação do cimento.

Figura 1 - Representação esquemática do processo de produção de cimento Portland



Fonte: Rodrigues, et. al., 2013.

Alguns processos ocorrem-se no interior dos fornos para a formação dos compostos do cimento, que é a formação do clínquer. Demonstram-se que com a queima da matéria-prima nos fornos de clínquer, ocorrem reações além da formação de silicatos, ferro, alumínio, a evaporação da água, a decomposição de carbonatos de magnésio e de cálcio e, a desidroxilação das argilas (GAUTO; ROSA, 2013). Uma sequência dessas reações que ocorrem no processo é esquematizada na TAB. 5 a seguir.

Tabela 5 - Sequência de reações no processo de fabricação

Temperatura	Processo
Até 100°C	Evaporação da água livre
100°C – 500°C	Calcinação das argilas
500°C – 900°C	Decomposição dos carbonatos
900°C – 1200°C	Reação de CaO com os sílico-aluminatos
> 1280°C	Formação dos compostos do cimento – clínquerização

Fonte: Ribeiro; Pinto; Starling, 2011.

Os principais compostos químicos do clínquer, segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2011), com suas propriedades, relacionam-se na TAB. 6 a seguir.

Tabela 6 - Principais compostos químicos do clínquer

Compostos	Fórmula Química	Abreviatura	Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub> 50-65%	C <sub>3</sub> S	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub> 15-25%	C <sub>2</sub> S	Endurecimento lento Baixo calor de hidratação Baixa resistência inicial
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6-10%	C <sub>3</sub> A	Pega muito rápida controlada com adição de gesso Suscetível ao ataque de sulfatos Alto calor de hidratação, alta retração Baixa resistência final
Ferro aluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3-8%	C <sub>4</sub> AF	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não contribuição para resistência, cor escura
Cal livre	CaO 0,5-1,5%	C	Aceitável somente em pequenas quantidades; em maiores quantidades, causa aumento de volume e fissuras

Fonte: Ribeiro; Pinto; Starling, 2011.

Os cimentos diferenciam-se entre si não somente pela composição química do clínquer, mas também pelas adições feitas a ele, tendo como exemplos escória de alto-forno, pozolona, materiais carbonáticos e outras, que vão definir uma propriedade particular de um determinado tipo de cimento. O aumento da resistência e o tempo de pega do cimento, são exemplos destas propriedades (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2011).

A gipsita, sulfato de cálcio di-hidratado (gesso) como mencionado anteriormente, é adicionado ao final do processo de fabricação de cimento (na moagem final) com a função de regular o tempo de pega, ou seja, de endurecimento do cimento. Com a adição do gesso, o cimento permanece trabalhável por um período de pelo menos uma hora. Sem a adição do mesmo, este tempo passa a ser de aproximadamente quinze minutos, tornando-se difícil a utilização em concretos (GAUTO; ROSA, 2011).

De acordo com Alisson (2013), a indústria cimenteira usa desde 1970 um material para substituir parcialmente o clínquer na formulação de cimento, conhecido como fíler de calcário cru, este material, dispensa tratamento térmico (calcinação). Ou seja, o fíler é um material carbonático muito utilizado como aditivo na produção do cimento.

O fíler calcário ou calcário moído, segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2011) é aquele que passa em uma peneira ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) 0,075 mm, é adicionado para que se diminua a quantidade de vazios, melhorar a trabalhabilidade e o acabamento e, tem também a função de elevar a resistência inicial do cimento (GAUTO; ROSA, 2011).

As pozolonas são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas que contêm sílica. São encontradas na natureza, mas podem ser obtidas também através da queima de certos tipos de argilas em altas temperaturas, da queima de carvão mineral nas indústrias termoelétricas, entre outros. A adição da mesma, proporciona maior trabalhabilidade e estabilidade de volume, o que torna o cimento adequado para concretagem de grandes volumes (GAUTO; ROSA, 2011).

A escória de alto-forno é obtida por meio de um resfriamento brusco da produção do ferro em alto-forno. É um ligante hidráulico bem resistente, ou seja, desenvolve características bem parecidas com o clínquer em se tratando de como reagem com a água, propiciando assim a melhoria de algumas propriedades como a durabilidade e a resistência final (GAUTO; ROSA, 2011).

Segundo a ABCP, o mercado nacional dispõe de oito tipos de cimento que atendem vários tipos de obras. Dispostos no QUADRO 1 a seguir.

Quadro 1 - Oitos tipos de cimento e suas nomenclaturas usuais

<b>Tipos de cimento</b>	<b>Nomenclatura utilizada</b>	<b>Comentários</b>
Cimento Portland Comum (CP I)	CP I	Cimento Portland Comum
	CP I-S	Cimento Portland Comum com Adição, de 1% a 5% de material de escória, fíler calcário, polzolana e o restante de clínquer
Cimento Portland Composto (CP II)	CP II-E	Cimento Portland Composto com Escória, Pozolana e Filer respectivamente, em proporções maiores que o CP I-S
	CP II-Z	
	CP II-F	
Cimento Portland de Alto-Forno	CP III	Contendo de 35% a 70% de escória
Cimento Portland Pozolâmico	CP IV	Contendo de 15% a 50% de pozolona
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	
Cimento Portland Resistente a Sulfatos	RS	
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação	BC	
Cimento Portland Branco	CPB	

Fonte: ABCP, adaptado.

#### 4.4 Coprocessamento

Um destino certo para resíduos representa um dos maiores desafios para um desenvolvimento sustentável numa sociedade ultimamente. O crescimento populacional aliado ao constante desenvolvimento de indústrias exigem cada vez mais soluções para problemas como o destino dos resíduos, sem que prejudique o meio ambiente. Uma técnica que as indústrias de cimento acharam para solucionar este problema é a de coprocessamento minimizando os impactos de outros ramos industriais (PANORAMA, 2015). Uma alternativa valiosa, tendo-se em vista tanto o valor econômico, quanto a saúde das pessoas e para o meio ambiente.

Segundo eCycle (2017) coprocessamento pode ser definido como a junção de dois processos: a queima de resíduos sólidos industriais que seriam descartados, juntamente com a

fabricação de produtos que necessitam de uma temperatura muito alta em seus processos produtivos, o que ocorre em destaque nas indústrias cimenteiras.

A produção de cimento é intensiva em materiais e energia e o coprocessamento de materiais reciclados representa uma estratégia comum para reduzir o custo e o impacto ambiental. Juntamente com a conservação de recursos e redução das emissões de carbono, a tecnologia de coprocessamento é uma alternativa preferível para a eliminação de resíduos sólidos e ecológicos em relação a incineradores e métodos não científicos. (BAIDYA; GHOSH; PARLIKAR, 2016, p. 310, tradução nossa).

Segundo Panorama (2016) coprocessamento é “tecnologia de queima de resíduos em fornos de cimento que não gera novos resíduos e contribui para a preservação de recursos naturais, por substituir matérias primas e combustíveis tradicionais no processo de fabricação de cimento [...] no coprocessamento destroem-se os resíduos e economizam-se matérias-primas e combustíveis, contribuindo para a sustentabilidade”.

A Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999, dispõe dos critérios e aspectos técnicos específicos de licenciamento ambiental para o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer, para a fabricação de cimento. Esta resolução aplica-se ao licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para que possam fazer uso de atividades de coprocessamento de resíduos, excetuando-se os resíduos radioativos, domiciliares brutos, explosivos, resíduos de serviços de saúde, agrotóxicos, organoclorados, e afins.

Segundo o Art. 5º da Resolução Conama nº 264/99, o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer deve ser feito de modo a garantir a manutenção da qualidade ambiental, evitar danos e riscos à saúde e obedecer aos padrões de emissão.

O que pode ser utilizado para coprocessamento nos fornos de clínquer, segundo o Conama nº 264/1999, são os resíduos passíveis de serem utilizados como substituto de combustível e/ou matéria-prima, desde que as condições do processo assegurem o atendimento às exigências técnicas e aos parâmetros fixados, comprovados a partir dos resultados práticos do plano do Teste de Queima proposto. O resíduo pode ser utilizado como substituto de matéria-prima desde que seja similar às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer, incluindo os materiais mineralizadores e/ou fundentes. Ou seja, o resíduo pode ser utilizado para fins de reaproveitamento de energia ou substituto de matéria-prima.

Segundo Panorama (2016), os fornos de clínquer têm características e condições ideais para destruição de resíduos através do coprocessamento, como por exemplo, altas

temperaturas, longo tempo de resistência, alta turbulência de gases, ambiente alcalino e oxidante, estabilidade térmica, para uma destruição total sem gerar novos resíduos.

Dados disponibilizados pelo Panorama (2016) referentes ao ano de 2015 relatam que de 57 plantas integradas com fornos rotativos de produção de clínquer, 38 são com fornos rotativos licenciados para o coprocessamento, representando assim 67% do parque industrial brasileiro, um número bastante significativo. O mapa (FIG.2) a seguir, mostra a localização das unidades de coprocessamento no Brasil.

Figura 2 - Unidades licenciadas para coprocessamento no Brasil



Fonte: ABCP/SNIC, 2016

O QUADRO 2 a seguir mostra quais são as indústrias cimenteiras licenciadas para o coprocessamento e a sua localidade.

Quadro 2 - Grupos cimenteiros e suas respectivas fábricas que utilizam coprocessamento

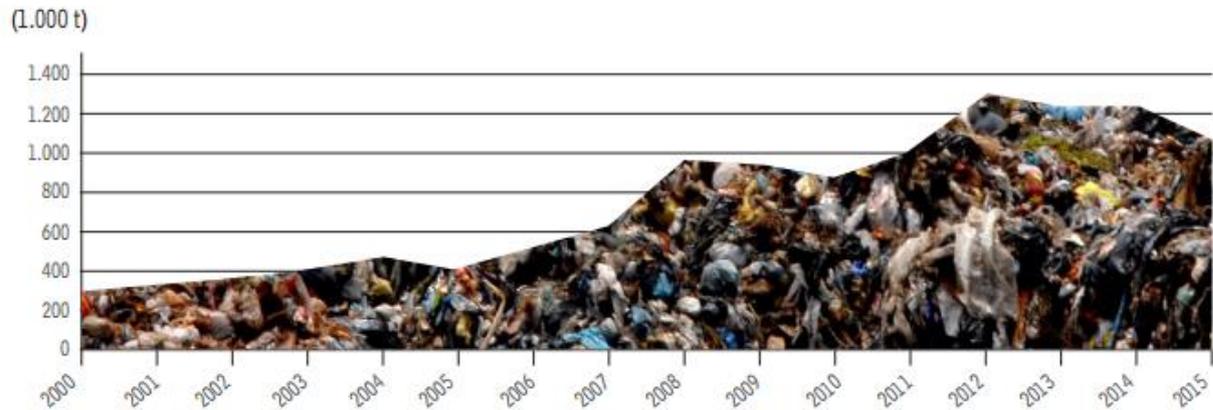
Grupo	Fábrica/UF
Apodi	Quixeré (CE)
CRH	<b>Arcos (MG)</b> <b>Matozinhos (MG)</b> Cantagalo (RJ)
Holcim	<b>Barroso (MG)</b> <b>Pedro Leopoldo (MG)</b> <b>Montes Claros (MG)</b> Caaporã (PB) Cantagalo (RJ)
Intercement	São Miguel dos Campos (AL) Campo Formoso (BA) Cezarina (GO) <b>Ijaci (MG)</b> <b>P. Leopoldo (MG)</b> Bodoquena (MT) João Pessoa (PB) Candiota (RS) Cajati (SP) Apláí (SP)
Itambé	Balsa Nova (PR)
Nassau	Manaus (AM) Cachoeiro (ES) Capanema (PA) Goiana (PE)
Liz	<b>Vespasiano (MG)</b>
Tupi	<b>Carandaí (MG)</b>
Votorantim	Sobral (CE) Sobradinho (DF) <b>Itaú de Minas (MG)</b> Itaú de Corumbá (MS) Nobres (MT) Cuiabá (MT) Rio Branco do Sul (PR) Cantagalo (RJ) Pinheiro Machado (RS) Laranjeiras (SE) Salto Pirapora (SP) Xambioá (TO)

Fonte: ABCP/SNIC, 2016

O estado de Minas Gerais destaca-se pela quantidade significativa de unidades de coprocessamento, com um parque de 10 indústrias licenciadas para tal processo.

Houve 500% de aumento na destruição de resíduos em um período de 15 anos (2000-2015), atingindo um número de 1,07 milhões de toneladas de resíduos coprocessados, como demonstrado no GRAF. 2 a seguir.

Gráfico 2 - Evolução dos resíduos coprocessados em fornos de cimento



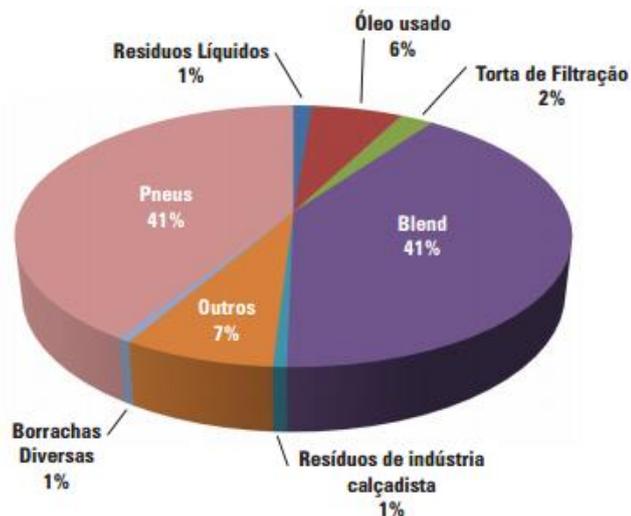
Fonte: Panorama, 2016.

Em 2015, segundo dados obtidos pelo Panorama (2016), dos resíduos utilizados em coprocessamentos, 68% representam combustíveis alternativos, 8% biomassa e as matérias-primas alternativas com um valor de 24%, em toneladas, correspondendo a um índice de substituição térmica de 9,7%. Ou seja, as empresas investem mais em combustíveis alternativos como formas de coprocessamento, como por exemplo, a queima de pneus.

Os gráficos a seguir, mostram os resultados divulgados pelo Panorama (2016) em relação aos substitutos de matérias-primas, combustíveis fósseis e biomassa coprocessadas pelas indústrias no ano de 2015.

O GRAF. 3 apresenta dados de combustíveis alternativos.

Gráfico 3 - Substitutos de combustíveis fósseis (Combustíveis alternativos) no coprocessamento



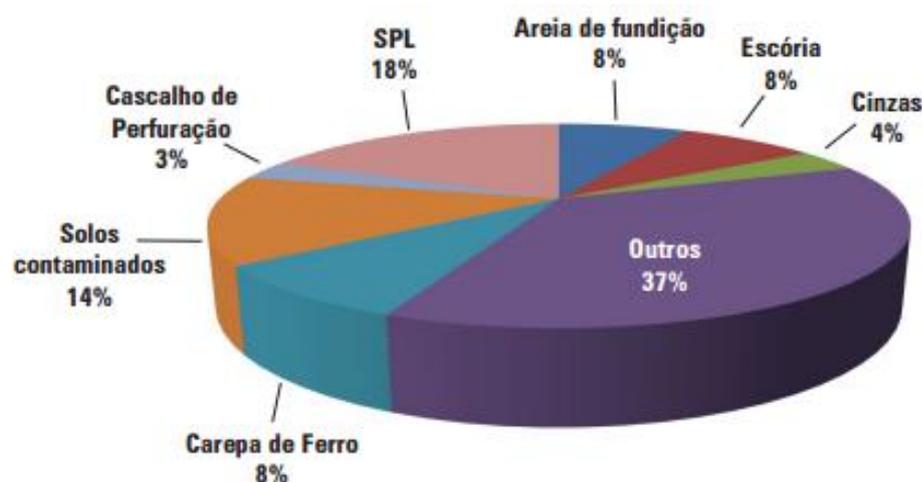
Fonte: Panorama, 2016.

Deve-se destacar a utilização de pneus inservíveis, os quais, segundo o Sindicato das Indústrias de Artefatos de Borracha do Estado do Paraná (SINDBORPR) (2014), são classificados como, “pneus cuja vida útil terminou e que precisam ser descartados em um ambiente correto de modo que não cause o desequilíbrio ecológico e ambiental”. Outro material que deve-se destacar é o blend, que segundo a Isotec Ambiental (2017), blend ou blendagem é um processo no qual, a mistura de resíduos compatíveis (que serão totalmente descaracterizados, gerando uma mistura com tipos de resíduos de poder calorífico alto), gera um produto alternativo ou uma matéria-prima que é utilizada para alimentar os fornos de clínquer, ou seja, “nada mais é do que um combustível utilizado como substitutos energéticos em fornos de clínquer, barateando o custo da produção de cimento e dando destinação final adequada e ambientalmente correta aos resíduos industriais”.

A queima deste blend produz calor suficiente para produção do clínquer (pré-cimento) e as cinzas geradas do processo são totalmente incorporadas ao processo do cimento, tornando assim um ciclo fechado. Os gases gerados são devidamente controlados para que não ocorra emissão de partículas suspensas no ar. O processo é monitorado e analisado periodicamente, os relatórios emitidos da monitoria são enviados para conferências a fim de assegurar os padrões estipulados pelo órgão ambiental responsável por esta fiscalização (ISOTEC AMBIENTAL, 2017)

O GRAF. 4 a seguir, demonstra resíduos como as matérias-primas alternativas que são utilizados na produção do cimento. O objetivo da utilização de matérias-primas alternativas é a redução do impacto ambiental e o prolongamento da vida útil de jazidas.

Gráfico 4 - Principais matérias-primas alternativas utilizadas no coprocessamento.



Fonte: Panorama, 2016.

Destaca-se o SPL (Spent Pot Liner), com uma porcentagem de 18%. Segundo Andrade (2008, p. i) o SPL é um tipo de “resíduo sólido, tóxico, gerado nas indústrias de alumínio, durante o processo de eletrólise da alumina. Sua composição é bastante variável, incluindo sais de fluoreto, cianetos, metais e compostos orgânicos”.

O GRAF. 5 demonstra os combustíveis que são oriundos de biomassa.

Gráfico 5 - Combustíveis oriundos de biomassa utilizada no coprocessamento



Fonte: Panorama, 2016.

Destaca-se a utilização de casca de arroz, com uma porcentagem de 48%, em relação aos outros tipos utilizados.

#### 4.5 Principais emissões atmosféricas na produção de cimento

Altos impactos em relação a emissões de gases de efeito estufa (GEE) são apresentados na produção de cimento em destaque o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que corresponde a quase todos os GEE emitidos (CARVALHO; MELO, 2016). O setor cimenteiro é o terceiro maior consumidor industrial de energia do mundo e o segundo emissor industrial de CO<sub>2</sub>, com cerca de 7% em ambos os quesitos (IEA, 2018). No Brasil, de acordo com Freire (2016) a indústria cimenteira, tem uma participação nas emissões de CO<sub>2</sub> muito significativa em relação à média mundial, representando cerca de 2,6%. Segundo Souza et al. (2015, p. 5), “só no Brasil são lançados 22,8 milhões de toneladas por ano”.

À medida que a população global aumenta e a urbanização cresce, a produção global de cimento deve aumentar entre 12 e 23% até 2050.

Apesar das crescentes eficiências, as emissões diretas de carbono da indústria de cimento devem aumentar 4% globalmente até 2050 sob o Cenário de Tecnologia de Referência da IEA (RTS), um cenário base que leva em conta os compromissos existentes de energia e clima sob o Acordo de Paris (IEA, 2018, p. 1, tradução nossa).

Além de carbono, na produção de cimento há emissão de outros poluentes atmosféricos como materiais particulados e alguns gases. Sendo assim, a rigorosidade das legislações que determinam padrões de emissões no Brasil e em outros países, acaba tendo que aumentar ainda mais (PINHO 2012 apud CARVALHO; MELO, 2016)<sup>1</sup>.

Em fornos rotativos durante a combustão são formados óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), em que há uma formação de NO térmico, a partir do nitrogênio atmosférico que reage com o oxigênio atômico, com temperaturas elevadas (acima de 1500 °C) e também com o nitrogênio contido no combustível, o qual o ocorre mesmo em temperaturas relativamente mais baixas, ou seja, as emissões de NO<sub>x</sub> dependem diretamente do combustível que se utiliza, e do processo de fabricação do cimento (SILVA, SIGNORETTI, 2006).

Segundo Hill e Smoot (2000), a espécie do poluente formado depende da temperatura de oxigênio da zona de combustão. Uma região com altas temperaturas e elevada concentração de O<sub>2</sub> favorece a formação de NO térmico, se controlados, há uma redução da formação de NO<sub>x</sub>. A emissão de NO<sub>x</sub> na atmosfera está ligada a diversos impactos ambientais como formação de chuva ácida, o efeito smog e quando reage com outros componentes químicos, forma substâncias que ajudam na destruição da camada de ozônio (RAMOS, 2015).

Um típico forno de clínquerização emite aproximadamente 2,8 kg de NO<sub>x</sub>/t de clínquer quando queima carvão em um processo de via seca. Aumenta para 9 kg de NO<sub>x</sub>/t de clínquer quando essa queima é por gás natural, o que favorece a formação de NO<sub>x</sub> por causa da alta temperatura da chama do gás natural (ARAÚJO 2002 apud MEYSTRE, 2016).<sup>2</sup>

Belato<sup>3</sup> (2013, apud Ramos 2015) afirma que, a oxidação no nitrogênio atmosférico que gera o NO térmico, é grande fonte de NO<sub>x</sub> que é emitido pelas indústrias cimenteiras na atmosfera. A temperatura da fase gasosa, o formato da chama, a taxa de ar em excesso, o

<sup>1</sup> PINHO, M. **Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas indústria do cimento**. Ribeirão Preto: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2012.

<sup>2</sup> ARAÚJO, S. **Estudo da formação e destruição de dioxinas e furanos em fornos rotativos de produção de clínquer utilizados no co-processamento de resíduos**. 2002. 116 p. Dissertação (Mestre em Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, 2002

<sup>3</sup> BELATO, M. N. **“Análise da Geração de Poluentes na Produção de Cimento Portland com o Coprocessamento de Resíduos Industriais”**. Itajubá, 171 p, Dissertação de Mestrado – Instituto de Engenharia Mecânica, Unifei.

tempo de permanência do gás e do material na área de queima, são alguns dos fatores contriuintes para a formação do NO térmico.

Segundo Hill e Smoot (2000, p. 423, tradução nossa) “o NO térmico é formado a partir da oxidação do nitrogênio atmosférico em temperaturas relativamente altas em ambientes com baixo teor de combustível, e tem uma forte dependência de temperatura”. A reação acontece conforme as Equações 1, 2 e 3 a seguir.



“O NO de combustível é formado a partir do nitrogênio ligado ao combustível, e normalmente é assumido que ele prossegue através da formação de HCN e/ou NH<sub>3</sub> que são oxidados a NO enquanto são competitivamente reduzidos a N<sub>2</sub>” (HILL; SMOOT, 2000, p. 425, tradução nossa). As Equações 4 e 5 a seguir representam as formações de NO e N<sub>2</sub> que são formadas a partir do HCN e do NO.



É possível controlar as emissões de NO controlando o ambiente em que o nitrogênio é liberado do combustível, uma vez que em ambientes ricos em combustíveis, ou seja, com alta concentração de nitrogênio, os compostos de nitrogênio serão reduzidos formando N<sub>2</sub> e em ambientes pobres em combustível, os compostos serão oxidados formando NO. (BELATO, 2013 apud RAMOS, 2015, p. 60)

O óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) pode ser formado durante a combustão com reações dentro do próprio forno de clínquer, mas estas reações acontecem muito rapidamente com os radicais H e OH formando assim o N<sub>2</sub> (RAMOS, 2015). Há N<sub>2</sub>O apenas em regiões de chama mais quente e que sejam ricas em combustível. Os valores de máxima emissão de N<sub>2</sub>O em sistemas de queima de carvão mineral são menores que 2% e essa formação se dá em uma faixa de 900 a 1250°C (HILL; SMOOT, 2000).

Existem duas formas de implicações quando o NO<sub>x</sub> é emitido a atmosfera, quando o NO<sub>2</sub> é combinado com algo na atmosfera e forma assim o ácido nítrico ou nitroso (componentes da chuva ácida) e a formação de smog, uma névoa fotoquímica formada pela

combinação de  $\text{NO}_x$ , hidrocarbonetos e gases atmosféricos (GREE, 1989 apud MEYSTRE, 2016)<sup>4</sup>.

Outros tipos de gases comumente emitidos em fábricas de cimento são os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{SO}_3$  que quando reagem com água formam respectivamente ácido sulfuroso e ácido sulfúrico que são componentes responsáveis pela chuva ácida. A formação desses gases depende de fatores como temperatura, nível de cloro, oxigênio em excesso, presença de monóxido de carbono, quantidade de álcalis, além de outros elementos em menores quantidades presentes na combustão (RAMOS, 2015).

Segundo Meystre (2016), por causa das características alcalinas dos sólidos da linha de produção, o  $\text{SO}_2$  que é produzido na combustão é removido na fase gasosa, ou seja, 90% do  $\text{SO}_2$  liberado na zona de sinterização – que segundo Brancão (2014), é a região em que ocorre a clinquerização e onde são alcançadas as temperaturas mais elevadas, atinge temperaturas próximas de  $1338^\circ\text{C}$  a  $1450^\circ\text{C}$  – são absorvidos na farinha na zona de calcinação e pré-calcinação, formando sulfato de cálcio, o que é liberado antes dessas fases, é mais complicado de se remover.

A TAB.7 a seguir, mostra as reações envolvendo o enxofre que ocorrem em um sistema de fabricação do cimento.

Tabela 7 - Reações de Formação e Absorção de  $\text{SO}_2$  presentes na fabricação do cimento

Parte do sistema do Forno	Formação de $\text{SO}_2$	Absorção de $\text{SO}_2$
Moinho de cru (zona de moagem)		$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
Zona de pré-aquecimento	$\text{Sulfetos} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Óxidos} + \text{SO}_2$	$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
	$\text{S}_{\text{org.}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	$\text{CaO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3$
Zona de calcinação	$\text{S}_{\text{comb.}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	$\text{CaO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3$
	$\text{CaSO}_4 + \text{C} \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_2 + \text{CO}$	$\text{CaSO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$
Zona de queima	$\text{S}_{\text{comb.}} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	$\text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$
	$\text{Sulfato} \rightarrow \text{Óxidos} + \text{SO}_2$ $+ \frac{1}{2} \text{CO}_2$	$\text{K}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4$ $\text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$

Fonte: Nielsen; Jepsen, (1990).

Presentes em matérias-primas, o enxofre do combustível, entra no processo por forma de sulfeto, sulfato e compostos orgânicos do enxofre, que podem ser reduzidos ou oxidados

<sup>4</sup> GREER, W. L. **Interaction among gaseous pollutants from cement manufacture and their control Technologies.** Portland Cement Association (PCA) R&D, Serial N° 2728, Skokie, US, p. 59, 2003.

para formarem  $\text{SO}_2$  gasoso. Em baixas temperaturas, este  $\text{SO}_2$  pode ser oxidado para formar  $\text{SO}_3$  gasoso, mas devido ao pouco tempo de retenção dos gases de exaustão em baixas temperaturas nos fornos de clínquer e no sistema de moagem, mais de 99% do enxofre será transformado em  $\text{SO}_2$  (NIELSEN; JEPSEN 1990).

Sulfetos e sulfatos que encontram-se em farinha de cru e os enxofres dos combustíveis, são as principais fontes de enxofre em fábricas de cimento, uma parte pode ser incorporada novamente pela farinha ou liberadas na forma de material particulado (RAMOS, 2015).

A emissão de  $\text{SO}_2$  na atmosfera pode causar prejuízos na fauna e na flora, para regiões vizinhas àquela em que está sendo emitido o gás, degradação do solo, entre outros problemas (MEYSTRE, 2016).

Matérias-primas e combustíveis contêm concentrações de metais em suas composições, o que torna-se um grande problema em coprocessamentos de resíduos. Os elementos pouco voláteis (arsênio, cromo, berílio, prata ferro, titânio, zinco, cobre, níquel e estanho), transferem-se para fase particulada adicionando-se ao clínquer, e os mais voláteis (mercúrio e tálio) são emitidos pelo forno (Milanez, 2007, apud Meystre, 2016).

De acordo com Meystre (2016) o tálio que é vaporizado nas regiões quentes do forno, condensa-se nas partículas em temperaturas de  $300^\circ\text{C}$  a  $330^\circ\text{C}$  e o mercúrio só começa a condensar em temperaturas abaixo de  $120^\circ\text{C}$ , ou seja, aproximadamente 50% do mercúrio sai com os efluentes gasosos.

Emissões de gases ácidos, não é tanto um problema para as indústrias cimenteiras, de acordo com Meystre (2016), devido às reações alcalinas com as matérias-primas, apenas. Quando há uma alta concentração de cloro no forno de clínquer, os gases ácidos podem originar a formação de dioxinas/furanos, que podem ser emitidos com efluentes gasosos ou na poeira emitida pelos fornos. O material particulado, que é outro quesito que se deve ter um controle em cimenteiras, é emitido através do pó de clínquer ou matéria-prima nos gases da saída do sistema.

#### **4.6 Controle de emissões de poluentes**

As décadas de 70 e 80 destacam-se pelas principais transformações tecnológicas das fábricas de cimento, e acompanhando essas transformações, foram criadas as normas ambientais que estabeleciam limites para fontes de emissões como fornos de clínquer, refrigeradores, moinhos e ensacadeiras. Como resultado desta preocupação com as normas, as

indústrias cimenteiras, desde a década de 90 vêm fazendo investimentos para reduzir a emissão, utilizando, por exemplo, filtros eletrostáticos e/ou mangas (MMA, 2010).

A legislação que rege no Brasil, a respeito do procedimento de fabricação de cimento, em relação aos critérios ambientais de coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer, é a Resolução CONAMA 264, de 26 de Agosto de 1999.

A respeito dos limites de emissões de poluentes a Resolução CONAMA 436, de 22 de dezembro de 2011, apresenta os limites máximos para emissão de poluentes atmosféricos provenientes da indústria de cimento Portland, demonstrados na TAB. 8 a seguir.

Tabela 8 - Limites de emissões de NO<sub>2</sub> para poluentes atmosféricos na produção de cimento

<b>Equipamentos</b>	<b>MP*</b>	<b>Óxido de Nitrogênio (como NO<sub>2</sub>)</b>
Fornos de clínquer sem coprocessamento	50 <sup>(1) (4)</sup>	1000 <sup>(3) (4)</sup>
Fornos de clínquer sem coprocessamento	50 <sup>(1) (4)</sup>	800 <sup>(3) (4)</sup>
Resfriadores de clínquer	50	Não se aplica
Moinhos de cimento	50	Não se aplica
Secadores de escória e de areia	50 <sup>(2)</sup>	Não se aplica
Ensacadeiras	50	Não se aplica

Fonte: CONAMA (2011)

\*os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm<sup>3</sup>, em base seca e com o teor de oxigênio definido para cada fonte.

(1) teor de oxigênio - 11%

(2) teor de oxigênio - 18%

(3) teor de oxigênio - 10%

(4) Para fornos de clínquer via úmida e via semiúmida (vertical) os valores de emissão serão definidos pelo órgão ambiental licenciador.

Em Minas Gerais, a legislação que rege o coprocessamento em cimenteiras, é a Deliberação Normativa COPAM nº 154, de 25 de agosto de 2010, que substituiu a Deliberação Normativa COPAM nº 026, de 28 de julho de 1998, apresentando algumas mudanças em relação a sua antecessora, a análise dessas mudanças realizada pela Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais apresenta-se no QUADRO 3 a seguir.

Quadro 3 - Comparativo das principais modificações

	<b>DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM Nº 26, DE 28 DE JULHO DE 1998</b>	<b>DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM Nº 154, DE 25 DE AGOSTO DE 2010</b>
<b>NECESSIDADE DE UMA NOVA LICENÇA PARA COPROCESSAMENTO DE NOVOS RESÍDUOS:</b>	A licença era concedida para um resíduo específico. Para cada novo resíduo ou para aqueles gerados em localidades diferentes das definidas na licença de operação era necessária uma nova LO.	A licença para coprocessamento de resíduos considerará composição química dos resíduos. A concessão da LO será para resíduos com concentração de elementos iguais ou inferiores às verificadas no teste de queima, sempre respeitando os limites de entrada e emissão definidos na Deliberação Normativa.
<b>RESÍDUOS SIMILARES:</b>	Existe uma enorme dificuldade em realizar o coprocessamento de resíduos similares por não existir um critério objetivo de classificação.	Prevê que o critério de similaridade seja substituído pela equivalência. Resíduos equivalentes: são resíduos cuja análise de massa bruta demonstre que as concentrações de seus elementos sejam iguais ou inferiores àquelas listadas na LO para coprocessamento de resíduos.
<b>RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E PODER CALORÍFICO INFERIOR - PCI:</b>	Os resíduos a serem coprocessados devem apresentar um PCI mínimo de 2.800 kcal/k.	O PCI mínimo é de 2.000 kcal/k, o que representa um maior incentivo ao coprocessamento de resíduos no Estado, inclusive biomassa. Para incentivar o coprocessamento de resíduos sólidos urbanos no Estado, a norma permite a realização de coprocessamento de resíduos sólidos urbanos pré-tratados ou tratados, desde que o mesmo apresente um poder calorífico inferior – PCI mínimo de 1.500 kcal/k.
<b>ELEMENTOS QUE PODERÃO SER USADOS COMO SUBSTITUTO DE MATÉRIA PRIMA:</b>	Os resíduos que não apresentavam PCI mínimo para serem coprocessados, poderiam ser utilizados como substituto de matéria-prima e/ou mineralizador, entretanto não havia nenhuma definição de quais seriam esses elementos, bem como a sua concentração mínima.	Somente os elementos Ca, Si, Al, Fe, F, S, K e Na, presentes nos resíduos caracterizam substituição de matéria prima, fundente e/ou mineralizador, no entanto, sua utilização só poderá ser realizada, se respeitados os limites de emissão. A concentração desses elementos deve ser superior a 45% em peso. O enxofre somente poderá ser considerado substituto de matéria prima para aquelas unidades onde a sua ocorrência for comprovada junto com o calcário.
<b>MONITORAMENTO CONTÍNUO:</b>	Prevê o monitoramento contínuo somente para O <sub>2</sub> , CO, temperatura e taxa de alimentação.	Deverá estar implantado monitoramento contínuo, com encaminhamento “online” para o órgão ambiental das informações registradas. Os parâmetros que deverão ser monitorados continuamente são: MP, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , O <sub>2</sub> e THC. Para os empreendimentos que não dispõem de monitoramento contínuo para HCl e HF, será realizada campanha de monitoramento pelo órgão ambiental às expensas do empreendedor, visando a comprovação da inexistência desses poluentes.
<b>MONITORAMENTO ISOCINÉTICO (NÃO CONTÍNUO):</b>	O encaminhamento do monitoramento não contínuo era normalmente realizado com frequência quadrimestral.	Os resultados dos monitoramentos atmosféricos, não contínuos e as análises do clínquer deverão ser encaminhados trimestralmente ao órgão ambiental. Deverão ser realizados testes de lixiviação do clínquer com periodicidade trimestral e arquivados por um período de no mínimo 3 anos.

Fonte: Fiemg (2010).

Quadro 3 - Comparativo das principais modificações (continuação)

	<b>DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM Nº 26, DE 28 DE JULHO DE 1998</b>	<b>DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM Nº 154, DE 25 DE AGOSTO DE 2010</b>
“BLEND” (MISTURA DE RESÍDUOS):		A proposta prevê que mistura de resíduos “blend” a ser encaminhada para o coprocessamento deverá atender aos padrões de entrada no forno e limites de emissão preconizados na Deliberação. No ato de recebimento dos resíduos, a empresa coprocessadora deverá exigir laudo de laboratório credenciado, com Anotação de Responsabilidade Técnica - ART do Responsável Técnico pela coleta e análise do resíduo, que deverá ser encaminhado trimestralmente a SUPRAM.

Fonte: Fiemg (2010).

A TAB. 9 a seguir, demonstra os padrões de emissões de acordo com a Deliberação Normativa COPAM 154, de 25 de agosto de 2010.

Tabela 9 - Padrões de Emissão

<b>Parâmetro</b>	<b>Concentrações</b>
HCl	1,8 k/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos que contenham mais de 0,5% de Cloreto
HF	5 mg/Nm <sup>3</sup>
CO	100 ppm, corrigido a 11% de O <sub>2</sub> , exceto quando o THC for inferior a 20 ppmv, desde que não seja ultrapassado o limite superior de 500 ppm, corrigido a 11% de O <sub>2</sub> .
SO <sub>x</sub> – medido como SO <sub>2</sub>	280 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 11% de O <sub>2</sub> , exceto quando enxofre for proveniente da matéria-prima. Nesses casos, o limite máximo se baseará no valor de SO <sub>x</sub> , calculado da seguinte forma: Para um teor de até 0,2% de SO <sub>3</sub> na farinha: 400 mg/Nm <sup>3</sup> , expresso como SO <sub>2</sub> ; Para um teor entre 0,2% e 0,4% de SO <sub>3</sub> na farinha, conforme a fórmula abaixo: $400 \text{ mg/Nm}^3 + (\% \text{SO}_3 - 0,2) \cdot 4000 \text{ mg/Nm}^3$ , expresso como SO <sub>2</sub> ; Para um teor acima de 0,4% de SO <sub>3</sub> na farinha: 1.200 mg/Nm <sup>3</sup> , expresso como SO <sub>2</sub> .
NO <sub>x</sub> - medido como NO <sub>2</sub>	450 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 11% de O <sub>2</sub> - Para fontes novas 730 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 11% de O <sub>2</sub> - Para fontes existentes (DE - 2000/76/EC)
Material Particulado Total (novas)	50 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 11% de O <sub>2</sub> .
Material Particulado Total (fontes existentes)	70 mg/Nm <sup>3</sup> , corrigido a 11% de O <sub>2</sub> . Para áreas não saturadas em material particulado e localizadas em regiões não urbanizadas, este padrão pode ser no máximo de 180 mg/Nm <sup>3</sup> , a 11% de O <sub>2</sub> , a critério do Órgão de Controle Ambiental.

Fonte: COPAM (2010).

Tabela 9 - Padrões de Emissão (continuação)

Parâmetro	Concentrações
THC	20 ppmv a 7%, medido como propano
Tolueno, Etilbenzeno, Xileno	100 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h (verificar TA Luft).
Benzeno,	20 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h (verificar TA Luft).

Fonte: COPAM (2010).

Na TAB. 10 estão apresentados os padrões de emissões para material particulado inorgânico.

Tabela 10 - Parâmetros de Emissões para materiais particulados

Parâmetros	Concentrações
Classe 1 - Cádmio, Mercúrio, Tálío	0,28 mg/Nm <sup>3</sup> para fluxo de massa igual ou maior a 1 g/h. Para fluxos menores o padrão não se aplica.
Classe 2 - Arsênio, Cobalto, Níquel, Selênio, Telúrio	1,4 mg/Nm <sup>3</sup> para fluxo de massa igual ou maior a 5 g/h. Para fluxos menores o padrão não se aplica.
Classe 3 - Antimônio, Chumbo, Cromo, Cianetos, Fluoretos, Cobre, Manganês, Platina, Paládio, Ródio, Vanádio, Estanho	7 mg/Nm <sup>3</sup> para fluxo de massa igual ou maior a 25 g/h. Para fluxos menores o padrão não se aplica.
Classe 1 + Classe 2	1,4 mg/Nm <sup>3</sup> . O somatório Classe 1 deve ser inferior a 0,28 mg/Nm <sup>3</sup>
Classe 1+ Classe 3	7 mg/Nm <sup>3</sup> . O somatório classe 1 deve ser inferior a 0,28 mg/Nm <sup>3</sup>
Classe 2 + Classe 3	7 mg/Nm <sup>3</sup> . O somatório classe 2 deve ser inferior a 1,4 mg/Nm <sup>3</sup>

Fonte: COPAM (2010).

Em um dos artigos do COPAM (8º), segundo Luiz (2016), estabelece-se que os resíduos coprocessados (com presença de metais que tem impacto diretamente nas emissões), deverão seguir padrões de concentrações de metais e limites de poder calorífico inferior (PCI), os quais são apresentados na TAB. 11 a seguir.

Tabela 11 – Quantidades máximas de metais para entrada no forno e PCI mínimo (substituição de combustível)

Parâmetros	Concentrações
Cádmio (Cd) + Mercúrio (Hg) + Tálcio (Tl)	= 100 mg/kg sendo Hg < 10mg/kg
Arsênio (As) + Cobalto (Co) + Níquel (Ni) + Selênio (Se) + Telúrio (Te)	= 1.500 mg/kg
Antimônio (Sb) + Cromo (Cr) + Estanho (Sn) + Chumbo (Pb) + Vanádio (V)	=5.800 mg/kg 5.800 mg/kg sendo Pb 3.000 mg/kg
PCI	= 2.000 kcal/kg
	=1.500 kcal/kg para resíduos sólidos urbanos

Fonte: COPAM (2010).

Na TAB. 12 demonstram-se os critérios para equivalência de substitutivos de combustível e de matéria prima (base úmida).

Tabela 12 – Critérios para equivalência

PARÂMETROS	UNIDADES	Substitutivo
PCI	kcal/kg	> 2000
PCB's	ppm	< 50
Hg	mg/kg	< 10
Somatório Grupo I (Cd + Hg + Tl)		Respeitando o somatório das concentrações listadas na licença de operação existente para coprocessamento de resíduos
Somatório Grupo II (As + Co+Ni+Se+Te)		Respeitando o somatório das concentrações listadas na licença de operação existente para coprocessamento de resíduos
Pb	mg/kg	<3000
Somatório Grupo III (Cr+Pb+Sb+Sn+V)		Respeitando o somatório das concentrações listadas na licença de operação existente para coprocessamento de resíduos
Cu	mg/kg	Respeitando os valores listados na licença de operação existente para coprocessamento de resíduos
Zn	mg/kg	Respeitando os valores listados na licença de operação existente para coprocessamento de resíduos
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + F + SO <sub>3</sub> + CaO + Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	%	>45%
PCB's	ppm	< 50

Fonte: COPAM (2010).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

O tema em questão, que é a formação e emissão de poluentes originados de coprocessamento em fábricas de cimento, é uma pesquisa descritiva se classificada quanto ao tipo de trabalho. Classifica-se assim de acordo com a definição de Gil (1988) apud Bertucci (2012) em que define como pesquisa descritiva, trabalhos que tenham como objetivo principal descrever características de determinada população ou fenômeno ou estabelecendo relações entre variáveis. Levanta hipóteses ou possibilidades que explicam essas relações.

Quanto a técnica utilizada a pesquisa pode ser classificada em documental que de acordo com Bertucci (2012) é um trabalho monográfico que tem como referências leituras, análises e interpretações de documentos já existentes sobre um determinado assunto/fenômeno. A consulta pode ser feita em livros, artigos científicos, relatórios de pesquisa, documentos internos que órgãos públicos, levantamento bibliográfico, entre outros documentos. É a nível organizacional, descrevendo e analisando situações com questões relevantes e propondo alternativas para minimizar os problemas identificados.

Os dados analisados foram obtidos de trabalhos de anos anteriores, levantados com informações de arquivos internos disponibilizados pela FEAM através do SIAM, o qual tem-se acesso a documentos de processos de licenciamento ambiental. Estas informações estavam dispostas em Relatórios de Automonitoramento das fábricas de cimento que realizam coprocessamento no estado de Minas Gerais. Nove empreendimentos, em que dois dos estabelecimentos apresentam dois fornos de clínquer, totalizando assim, onze fornos foram os fornos utilizados para estudo. Estes relatórios foram pesquisados referentes ao ano de 2014, objetivando avaliar as concentrações de alguns poluentes atmosféricos que são provenientes de coprocessamento de resíduos sólidos.

As localidades dos fornos analisados por alguns autores de acordo com a SUPRAM estão representados no QUADRO 4 a seguir.

Quadro 4 - Localidade dos fornos analisados

Forno	Regionais SUPRAM's
1	Zona da Mata
2	Central
3	Sul de Minas
4	Central
5	Alto São Francisco
6	Norte de Minas
7	Central
8	Zona da Mata
9	Zona da Mata
10	Sul de Minas
11	Sul de Minas

Fonte: Luiz (2016)

A FIG. 3 a seguir representa um mapa da divisão por regionais do estado de Minas Gerais.

Figura 3 - Divisão de regionais do estado mineiro



Fonte: SEMAD<sup>5</sup> (2016) apud Luiz (2016)

<sup>5</sup> Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD. **Supram's e Núcleos Regionais**. Disponível em: <<http://www.meioambiente.mg.gov.br/suprams-regionais/localizacao>>.

Luiz (2016) como forma de identificação da origem de formação dos respectivos poluentes dos fornos de clínquer elaborou um quadro (QUADRO 5) contendo os dados operacionais de coprocessamento de resíduos. Mas os dados de alimentação dos fornos não foram identificados, sendo assim foram informados possíveis combustíveis utilizados nas amostragens.

Quadro 5 - Atividades de coprocessamento dos fornos de clínquer analisados

Forno	Capacidade de produção (t/d clínquer)	Sistema de controle de poluição do ar	Combustível do Forno
1	2000	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, moinha de carvão, blends sólidos e líquidos.
2	6228	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, moinha de carvão, blends sólidos e líquidos.
3	5000	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, blends sólidos e líquidos, pneus.
4	2200	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, blends sólidos e líquidos, torta.
5	1266	Filtro de Manga	Coque de petróleo, moinha de carvão, pó de serra, blend, chip de pneu, óleo.
6	2500	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, moinha de carvão, blends, chip de pneu.
7	5000	Filtro de Manga	Coque de petróleo, moinha de carvão, blend, chip de pneu.
8	2800	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, moinha de carvão, blends sólidos, chip de pneu.
9	3500	Filtro de Manga	Coque de petróleo, moinha de carvão, blends sólidos, chip de pneu.
10	1600	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, moinha de carvão, blends sólidos e líquidos, pneus.
11	2800	Precipitador Eletrostático	Coque de petróleo, moinha de carvão, blends de sólidos e líquidos, pneus.

Fonte: Luiz (2016)

Calcula-se uma média das concentrações dos poluentes que apresentavam-se em forma de triplicata, para a questão de valores diferentes de correções de oxigênio, converte-se em alguns casos utilizando a equação 6, a fim de padronizar os dados de concentrações com uma correção de 11% de oxigênio.

$$CR = [(21-OR)/(21-OM)] \times CM \quad (6)$$

Em que:

CR = 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.

Depois da padronização das concentrações de cada parâmetro de 11% de O<sub>2</sub>, elaborou-se gráficos referentes as concentrações dos fornos de clínquer referentes ao ano de 2014, comparou-se com os limites máximos permitidos pela Deliberação Normativa (DN) COPAM nº 154/2010.

Utilizou-se uma escala de quatro períodos, chamados de campanhas, os quais representam cada trimestre do ano. Fez-se uma média, devido ao fato dos valores serem dispostos mensalmente e obteve-se os valores por “campanha”, sendo assim, pode-se comparar com o monitoramento trimestral exigido pela deliberação normativa.

Pode classificar-se quanto ao critério a ser utilizado para análises dos dados obtidos tanto uma pesquisa quantitativa, quanto qualitativa respectivamente. Pois demonstra técnicas para reduzir a quantidade de emissões e, a necessidade/importância de trabalhar-se com os valores propostos pelo CONAMA e levar-se em consideração um aspecto importante, o fato de que a emissão destes poluentes está aliada diretamente com a qualidade do ar.

A pesquisa busca gerar conhecimento sobre o tema e as possíveis soluções para driblar as emissões que podem ser prejudiciais tanto para os seres, quanto para o meio ambiente.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As emissões de dióxido de carbono, óxidos de enxofre, materiais particulados e óxidos de nitrogênio são características no processo de fabricação do cimento. Existindo assim certos limites, devido ao fato da inalação de substâncias provenientes destas emissões ser prejudicial ao meio ambiente e à saúde em forma de ácidos sulfúrico e nítrico. E estes limites se tornam mais rigorosos quando no processo de fabricação do cimento é introduzido o coprocessamento (SILVA et al., 2014).

Os resultados de automonitoramento dos poluentes atmosféricos de fábricas de cimento que utilizam resíduos sólidos como material para coprocessamento referentes ao ano de 2014 e com referência aos limites que a Deliberação Normativa (DN) COPAM nº 154/2010 estabelece, serão apresentados e analisados nos gráficos a seguir.

Observa-se que para diversos fornos não foi possível obter resultados para todas as campanhas devido a informações incompletas do sistema.

### 6.1 Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

A DN COMPAM 154 estabelece como padrão de emissão para NO<sub>x</sub> um valor de 450 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes novas e 730 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes existentes corrigido este valor a 11% de O<sub>2</sub>.

A definição de fontes existentes, nova e fixa de emissões de poluentes atmosféricos está presente no Art. 2º da Deliberação Normativa COPAM nº 187 de setembro de 2013.

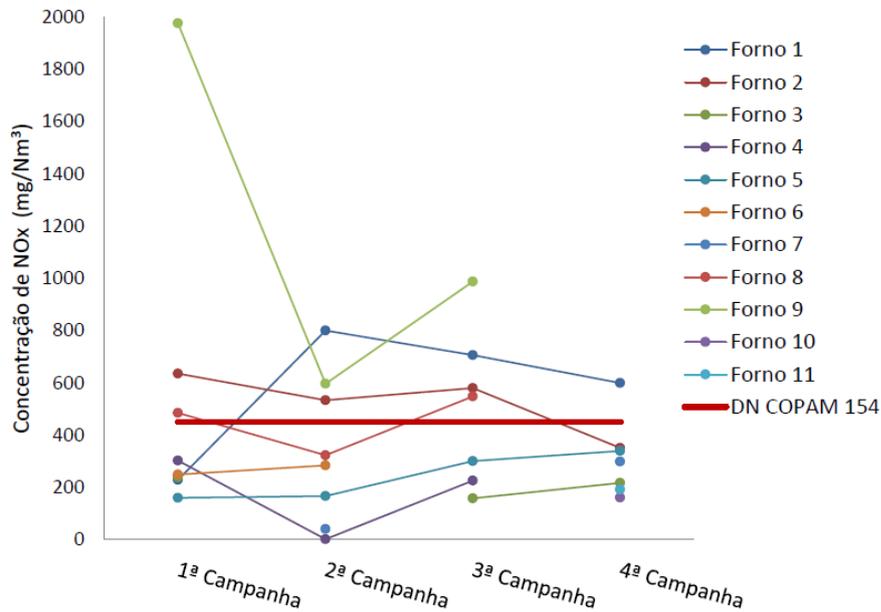
Fonte existente: fonte fixa de emissão de poluentes atmosféricos cujo início de instalação tenha ocorrido antes de 2 de janeiro de 2007, quando entrou em vigor a Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006, assim como aquela cuja Licença de instalação (LI) deferida tenha sido requerida anteriormente àquela data.

Fonte nova: fonte fixa de emissão de poluentes atmosféricos cujo início de instalação tenha ocorrido a partir de 2 de janeiro de 2007, excluídas aquelas cuja LI deferida tenha sido requerida anteriormente àquela data, observada a exceção mencionada no inciso anterior;

Fonte fixa de emissão de poluentes atmosféricos: qualquer instalação, equipamento ou processo situado em local fixo, que libere para a atmosfera substâncias no estado sólido, líquido ou gasoso.

O GRÁF. 6 apresenta os resultados de automonitoramento de óxidos de enxofre (NO<sub>x</sub>) dos fornos de clínquer com referência o ano de 2014 comparando-se ao limite da DN COMPAN 154.

Gráfico 6 - Resultados de automonitoramento de NO<sub>x</sub> dos fornos de clínquer



Fonte: LUIZ (2016)

De acordo com os padrões estabelecidos pela DN COPAM nº 154/2010 observa-se que em sua grande maioria são cumpridos. Dos 28 resultados obtidos, 17 estão abaixo no limite e apenas 11 estão acima do limite de 450 mg/Nm<sup>3</sup>. Se comparado ao limite de 730 mg/Nm<sup>3</sup> os resultados favoráveis tornam-se maiores, sendo apenas três resultados acima do permitido.

Segundo MALARD (2016) a legislação mineira é mais restritiva que a legislação de São Paulo (que considera o limite de 800 mg/Nm<sup>3</sup> corrigido a 10%) e valores alinhados a Diretiva Europeia 2000/76/EC, com limites de 500 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes novas e 800 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes existentes corrigidas a 10% (o que corrigido para 11% seriam aproximadamente os valores da DN). Porém houve um retrocesso se comparado a DN COPAM nº 26/1998 a qual o padrão era de 560 mg/Nm<sup>3</sup> corrigidos a 11% de O<sub>2</sub>, ou seja, o valor era 23% mais restritivo que o valor atual.

Baroncelli<sup>6</sup> (2009) apud Luiz (2016) afirma que existem técnicas de controle preliminar, como por exemplo, o uso de combustíveis de teor baixo de nitrogênio, modificações no processo de combustão e uso de aditivos.

<sup>6</sup> BARONCELLI, F. **Poluição Atmosférica – Aspectos Gerais**. Faculdade de Engenharia de Minas Gerais. Minas Gerais, 2009.

Experimentos em fornos de clínquer demonstram que se houve redução o nível do excesso de ar passaria de 10 para 5%, como por exemplo, reduzindo a concentração de oxigênio nos gases de exaustão de 2 para 1%, pode haver uma redução de até 15% das emissões de NO<sub>x</sub> (USEPA, 2000). Mas deve-se permanecer atento para não ocasionar o aumento da emissão de CO (LUIZ, 2016).

Outra modificação do processo que apresenta resultados bem positivos segundo a USEPA (2000) é um processo denominado CemStar, que consiste em adições de uma quantidade pequena de escória de autoforno ao material cru alimentado no forno, o que faz com que a quantidade de combustível necessária para a formação do clínquer seja reduzida. Este processo pode reduzir até 30% das emissões.

Uma tecnologia apresentada como uma alternativa é a “a tecnologia de injeção de biosólidos vem encontrando aplicação na indústria de cimento, e apesar de não ser tecnicamente um controle de remoção tipo SNCR, apresenta os princípios operacionais e a química muito semelhante desta tecnologia” (U.S. EPA, 2000<sup>7</sup> apud SIGNORETTI, 2008, p. 120).

Segundo RAMOS (2015) tecnologias pós-combustão eliminam o NO<sub>x</sub> que já foi formado no processo e que existem dois tipos dessa tecnologia que é a Redução Seletiva Catalítica (SCR) e a Redução Seletiva Não Catalítica (SNCR).

Uma técnica apresentada como resolução da remoção de NO<sub>x</sub> para os fornos 1, 2, 8 e 9, seria a Redução Catalítica Seletiva no sistema de controle de emissão segundo LUIZ (2016).

De acordo com a United States Environmental Protection Agency (USEPA) o processo de SCR utiliza uma tecnologia em que o NO<sub>x</sub> pode ser convertido em nitrogênio e água através de uma adição de amônia na presença de um catalisador. Chegam a ter um alcance de até 90% de eficiência. A amônia anidra é diluída com ar ou vapor que é injetada em seguida por um sistema de fluxo de gases quentes que atravessa o meio catalítico e ocorrem as reduções de NO<sub>x</sub>. As principais reações são:



A equação 6 é a principal reação, devido ao fato de que de 90 a 95% das emissões de NO<sub>x</sub> estão na forma de NO. Os catalisadores mais utilizados são de misturas de pentóxido de

---

<sup>7</sup> U.S. EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY NO<sub>x</sub> Control Technologies For The Cement Industry Final Report. Sanders, D. 2000

vanádio ( $V_2O_5$ ) e dióxido de titânio ( $TiO_2$ ), porque demonstram maior resistência a contaminação com óxidos de enxofre (USEPA, 2000). Segundo Signoretti (2008) a SCR em indústrias cimenteiras devem ser instaladas após um dispositivo coletor de particulado devido a uma grande concentração de material particulado. Afirma também que materiais como zeólitas estão sendo desenvolvidos como uma outra forma catalítica por causa de suas propriedades de suportar altas temperaturas.

Segundo Hamon Group<sup>8</sup> (2016) apud Luiz (2016) a SCR pode alcançar uma remoção de mais de 98% no  $NO_x$  que existem nos gases de exaustão dos sistemas de combustão e é a técnica mais eficaz para tal controle.

Silva (2008) afirma que para que a operação do sistema seja eficiente é necessário que os gases de exaustão tenham um excesso mínimo de  $O_2$  e que a temperatura esteja entre 230 a 450 °C que é em função do tipo de catalisador utilizado. Ou seja, o tipo de catalisador e a sua configuração são de extrema importância quando se aplica essa técnica uma vez que as reações acontecem na superfície.

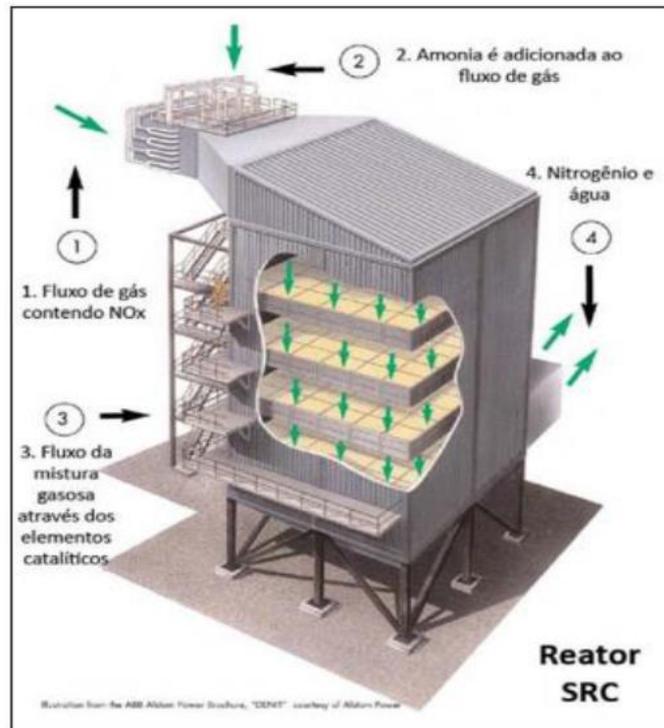
Para USEPA (2000) a redução por SCR em uma larga escala de produção de clínquer precisa ser melhorada em relação a alguns pontos, como por exemplo, a alta concentração nos gases de particulados, que são superiores a 500  $mg/Nm^3$  aproximadamente 1,0 lb/ton de clínquer, técnicas de limpeza do catalisador, vida útil do catalisador e o custo no investimento.

Na FIG. 4 é representado um exemplo de coluna de Redução Catalítica Seletiva.

---

<sup>8</sup> Hamon Group – Integrated Solutions for a clean environment. **Sistemas de remoção do  $NO_x$ .**

Figura 4 - Coluna de SCR

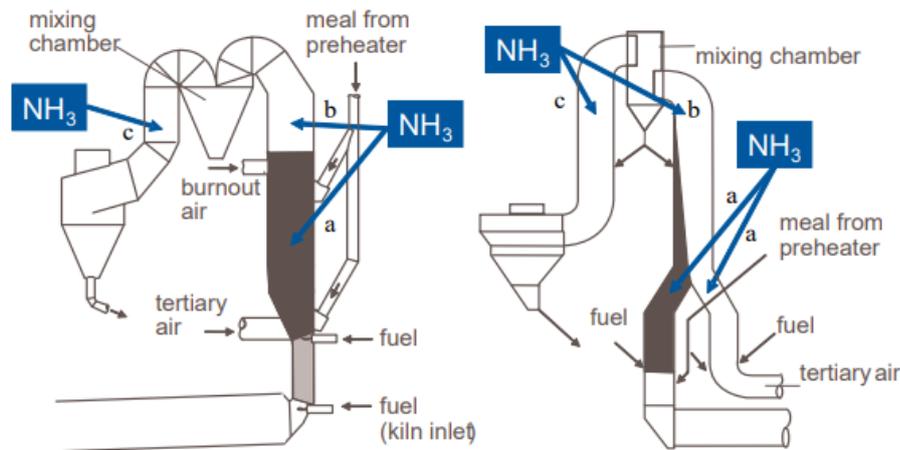


Fonte: Luiz (2016).

Outra técnica é a SNCR, que envolve as mesmas reações do processo de SCR mas sem a utilização de catalisadores. USEPA (2000) afirma que essa abordagem evita problemas que estão relacionados com a incrustação do catalisador, o que acontece na tecnologia SRC, mas em contrapartida, requer uma injeção de reagentes em temperaturas entre 870 a 1090 °C. São nessas temperaturas que a ureia se decompõem produzindo a amônia, a qual é responsável pela redução de NO<sub>x</sub>. Compostos como ácido cianúrico ((CNOH)<sub>3</sub>), piridina (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>N) e acetado de amônio (C<sub>2</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>) podem ser utilizados. Mas por questões de custos, segurança, simplicidade e formação de subprodutos, amônia e ureia estão sendo utilizadas na maioria das aplicações de SNCR.

O desempenho da SNCR dependerá segundo a Ramos (2015) do tempo de resistência, da quantidade de oxigênio, da temperatura, da turbulência e fatores característicos do gás de exaustão. USEPA (2007) afirma que a solução de amônia (20%) é a que apresenta melhor resultado em um sistema com pré-aquecedor e pré-calcinador. USEPA (2007) acredita que há três pontos possíveis para a injeção de SNCR de acordo com a FIG. 5 a seguir.

Figura 5 - Possíveis pontos de introdução de SNCR



Fonte: USEPA (2007)

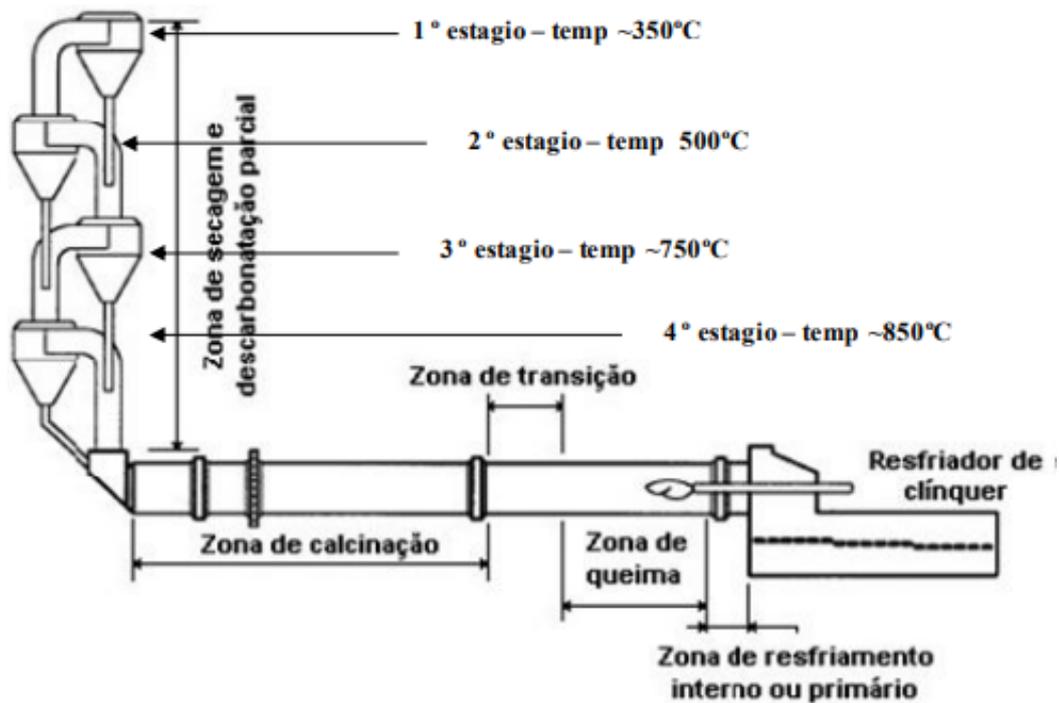
Observa-se que na (a) é na zona de combustão na parte em que o calcinador opera sob condições redutoras a (930 à 990 °C); (b) é na zona de oxidação sob a entrada de ar superior antes da câmara de deflexão (850 à 890 °C) e (c) área após a câmara de mistura antes da entrada para o estágio inferior do ciclone.

Conclui-se de acordo com os autores consultados, que apesar de ser um investimento mais caro, o SCR é o mais recomendado em questões de redução de NO<sub>x</sub>. O SCR consegue uma redução de até 95% se comparado ao SNCR que consegue uma redução de até 65% dependendo do processo, de acordo com os grupos que disponibilizam a venda desses sistemas.

Luiz (2016) conclui com suas pesquisas que o coque de petróleo utilizado nos fornos 1, 2, 8 e 9 pode ter sido o causador das emissões de NO<sub>x</sub> estarem bem acima do permitido, pelo fato de que o teor de nitrogênio nesse tipo de combustível é muito alto.

Neto (2012) utilizou dois tipos de testes para avaliação da quantidade de emissão de NO<sub>x</sub> em um forno de clínquer que utiliza o coprocessamento de pneus inservíveis. No primeiro teste, a injeção do resíduo foi feita pelo 4º estágio da torre de ciclone, início da zona de calcinação com um volume de resíduo coprocessado de 2 ton/h com uma concentração média de 572,1 mg/Nm<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub>. No segundo teste realizado foi injetado no mesmo ponto que o primeiro teste, mas o volume de resíduo foi aumentado para 5 ton/h e a concentração de NO<sub>x</sub> reduzida para 380,1 mg/Nm<sup>3</sup>. Os estágios da torre de ciclone estão demonstrados na FIG. 6 a seguir, a fim de uma melhor visualização.

Figura 6 - Torre de ciclone e forno de clínquer com pré aquecedor



Fonte: Neto (2012)

Neto (2012) concluiu com o primeiro teste realizado que houve uma redução de 34,2% de  $\text{NO}_x$  quando comparado a um forno de clínquer que não utiliza o coprocessamento e esse valor foi para 56,3% no segundo teste, ou seja, pneus inservíveis podem ser considerados bons agentes redutores de emissões de  $\text{NO}_x$  em fornos de clínquer. Ou seja, além de diminuir a quantidade de emissão, um pneu que demoraria cerca de 100 anos para se degradar e que é considerado um problema ambiental e de saúde pública, contribui diretamente com uma forma definitiva de eliminação desse resíduo.

## 6.2 Óxidos de Enxofre ( $\text{SO}_x$ )

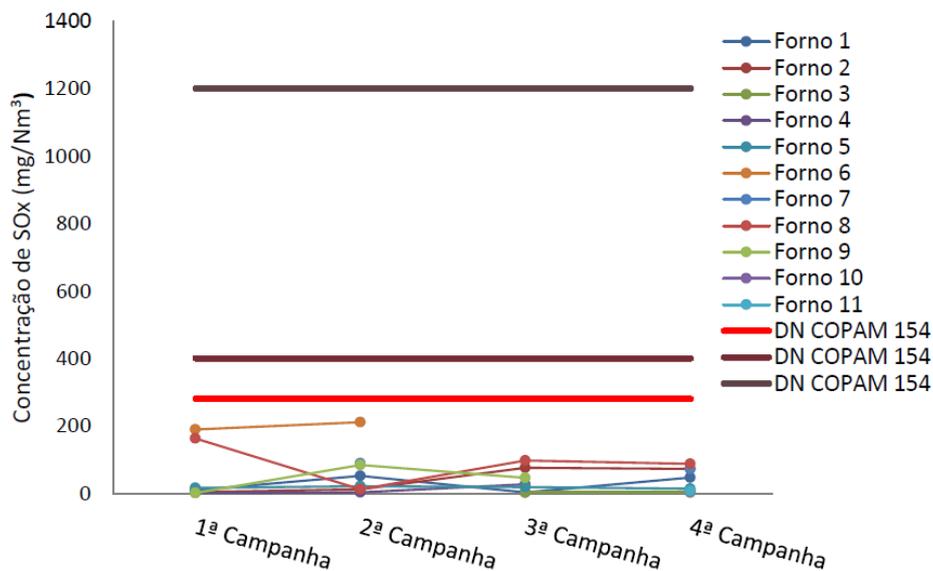
A DN COPAM nº 154/2010 determina um valor de  $280 \text{ mg/Nm}^3$  corrigido a 11%, mas quando o enxofre for oriundo de matéria-prima, o valor é mais flexível. Malard (2016, p. 161) ressalta que “nesse caso, o limite passa a ser de  $400 \text{ mg/Nm}^3$  para um teor de até 0,2% de  $\text{SO}_3$  na matéria-prima ou farinha;  $1.200 \text{ mg/Nm}^3$  para um teor de  $\text{SO}_3$  acima de 0,4%; e entre 0,2% e 0,4%” e que deve-se fazer o cálculo de acordo com a equação 8 a seguir:

$$\text{Teor } \text{SO}_x = 400 \text{ mg/Nm}^3 + (\% \text{SO}_3 - 0,2) \times 4000 \text{ mg/Nm}^3 \quad (8)$$

Malard (2016) afirma que o calcário que é a matéria-prima principal utilizada na produção de cimento, com padrões mais permissíveis, pode ser amplamente utilizado no processo produtivo devido ao seu alto teor de enxofre.

O GRÁF. 7 apresenta os resultados de automonitoramento de SO<sub>x</sub> dos fornos de clínquer referentes ao ano de 2014 comparando-se ao limite da DN COMPAN 154 com seus três valores aceitáveis.

Gráfico 7 - Resultados de automonitoramento de SO<sub>x</sub> dos fornos de clínquer



Fonte: LUIZ (2016)

Nota-se que conforme os padrões da DN COPAM n° 154/2010 todos os resultados obtidos dos respectivos fornos estão dentro dos três diferentes valores estabelecidos, 280 mg/Nm<sup>3</sup>, 400 mg/Nm<sup>3</sup> e 1.200 mg/Nm<sup>3</sup>.

Com uma comparação feita por Malard (2016) a flexibilização na deliberação é grande se analisada ao valor da DN COPAM n° 2/1998, que esse padrão era de 280 mg/Nm<sup>3</sup> independente de quantidade de enxofre na matéria-prima. A norma CETESB estabelece um padrão de 350 mg/Nm<sup>3</sup> corrigido a 10% de O<sub>2</sub> (equivalendo a 318 mg/Nm<sup>3</sup> a 11%). E afirma que:

Já a Diretiva 2010/75/UE, estabelece padrão de emissão de 50 mg/Nm<sup>3</sup> corrigido a 10% de O<sub>2</sub>, mas ressalta que a autoridade competente pode alterar o limite nos casos em que o SO<sub>2</sub> não resulte da coincineração de resíduos. A correção desse padrão de emissão para 11% de O<sub>2</sub> é equivalente a aproximadamente 45 mg/Nm<sup>3</sup>. Conforme a

EUROPEAN UNION<sup>9</sup> (2013), esse valor pode ser atingido utilizando as melhores técnicas disponíveis para redução de SO<sub>x</sub>, principalmente por meio do uso de carvão ativado (MALARD, 2016, p. 162).

Percebe-se que nenhuma medida precisa ser tomada ainda com relação a emissão de SO<sub>x</sub> nos fornos mineiros analisados, pois todos estão conforme a norma do estado.

### **6.3 Materiais Particulados (MP)**

Para materiais particulados a DN COPAM nº 154/2010 define um valor de 50 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes novas e 70 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes existentes, corrigidos a 11% de O<sub>2</sub>. Estabelece também que em regiões não urbanizadas ou em áreas não saturadas em material particulado, esse padrão não deve-se ultrapassar a 180 mg/Nm<sup>3</sup>. Malard (2016, p. 159) afirma que

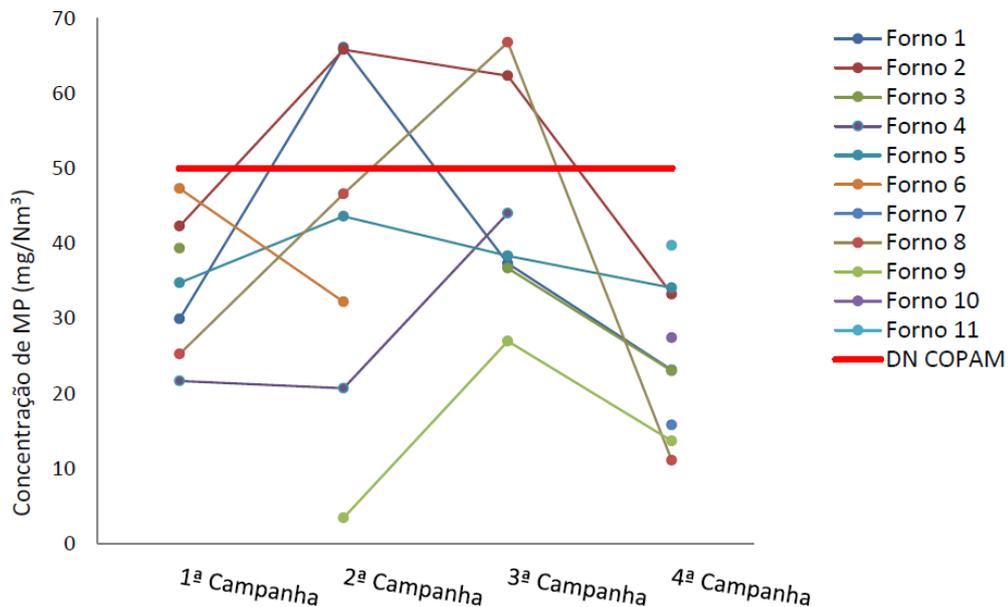
Desde a publicação dessa deliberação, não há registros de uso da prerrogativa de flexibilização do padrão. Pode-se atribuir isso a inexistência de regras e estudos para definição de áreas saturadas em material particulado. Além disso, uma fonte pode não estar localizada em uma região urbanizada, e ainda sim, os efeitos de suas emissões serem sentidos nessas áreas.

A DN COPAM nº 187 no ano de 2013 reservou um anexo especialmente para indústrias cimenteiras, a qual fixou desde 20/09/2013 o parâmetro de 50 mg/Nm<sup>3</sup> corrigido a 11% de O<sub>2</sub> para unidades que utilizam do coprocessamento de resíduos. O GRAF. 8 a seguir representa os resultados obtidos dos fornos de clínquer com automonitoramento de emissões de MP.

---

<sup>9</sup> Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and control. JRC Reference Reports.

Gráfico 8 - Resultados de automonitoramento de MP dos fornos de clínquer



Fonte: LUIZ (2016)

Comparando-se o estado de Minas Gerais e de certa forma o Brasil todo que adotou como padrão o valor de  $50 \text{ mg/Nm}^3$ , corrigido a 11%  $\text{O}_2$  é muito superior ao permitido pela Diretiva Europeia que tem um valor de  $30 \text{ mg/Nm}^3$ , a 10% de  $\text{O}_2$ , o que convertendo a um valor comparativo de 11% de  $\text{O}_2$  equivale a  $27 \text{ mg/Nm}^3$ .

Analisando o gráfico, pode-se concluir que nas quatro campanhas, quatro fornos ultrapassaram o limite máximo permitido. Mas se comparado ao valor da Diretiva 2010/75/UE, a fração de fornos abaixo no valor é de apenas dez fornos (dos 36 resultados obtidos, 26 descumpririam a diretiva), ou seja, uma melhoria nessa margem de emissão deveria ser feita.

Neto (2012) fez um experimento em uma fábrica no estado do Rio de Janeiro com o objetivo de avaliar a emissão de MP em fornos de clínquer. Ele concluiu que a parcela de material particulado emitido pelo forno de clínquer tem uma relação direta com a temperatura do gás que entra no filtro elétrico, sendo assim, a principal variável do processo que contribui diretamente para o aumento da emissão desses poluentes. Em se tratando de coprocessamento, esta técnica não influencia nas emissões de poluente quando um resíduo é introduzido no forno através do maçarico e na torre de ciclone, ou seja, o volume de resíduos coprocessados não altera a quantia de MP emitido pelos fornos, mas sim a temperatura da entrada do gás.

Luiz (2016) afirma que os coletores de material particulado que mais são utilizados em indústrias cimenteiras são os filtros de manga e os precipitados eletrostáticos, estes com uma desvantagem em relação aos primeiros devido ao fato de que quando atingem uma

concentração alta de CO (acima de 0,5%) eles são desligados para impedir explosão por inflamação de CO.

Santini (2011) ressalta que os filtros de manga possuem uma fácil instalação, operação e manutenção, uma vida útil longa quando são devidamente operados, possuem uma alta eficiência em coletar quase todos os tamanhos de partículas e pode ser usado sozinho. Estes são os motivos que tornam os filtros de manga os equipamentos mais empregados em se tratando de retirada de materiais particulados.

Drehmer e Camera (2018, p. 9) explica que filtro de manga é “um filtro constituído por sacos ou mangas de tecido, que recolhem o material filtrado e quando o ar sujo passa através da manga, acaba deixando uma camada de pó fixa depositada em sua superfície”, o ar limpo vai para a atmosfera e o pó fica armazenado no equipamento, podendo ser removido ou utilizado como adubo orgânico.

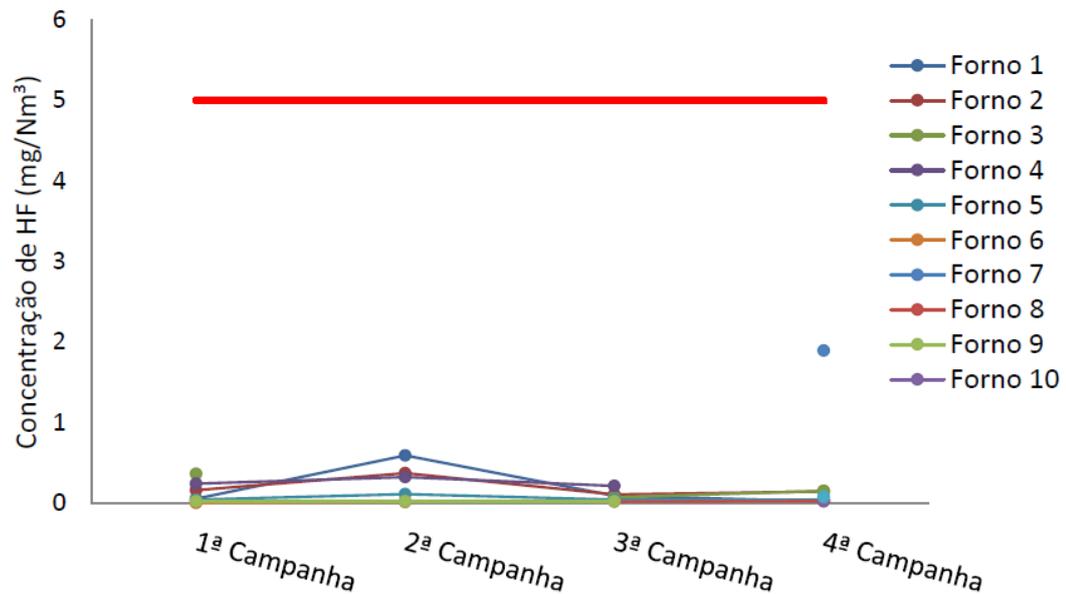
#### **6.4 Ácido Fluorídrico (HF) e Ácido Clorídrico (HCl)**

##### *HF*

Em se tratando de monitoramento de HF a DN COPAM nº 154/2010 define como padrão de emissão  $5 \text{ mg/Nm}^3$  sem estabelecer uma porcentagem de correção de oxigênio, possibilitando assim uma margem para emissões maiores devido a base utilizada.

O GRÁF. 9 apresenta os resultados de automonitoramento de ácido fluorídrico (HF) dos fornos de clínquer com referência o ano de 2014 comparando-se ao limite da DN COMPAN 154.

Gráfico 9 - Resultados de automonitoramento de HF dos fornos de clínquer



Fonte: LUIZ (2016)

A Resolução CONAMA nº 264/1999 indica o mesmo padrão, mas com uma correção de 7% de O<sub>2</sub>, que convertendo-se a 10% de O<sub>2</sub> para níveis de comparação, equivale a aproximadamente 4 mg/Nm<sup>3</sup>, o mesmo valor adotado pela CETESB. A Diretiva Europeia 2010/75/EU definiu 1 mg/Nm<sup>3</sup> também corrigido a 10% de O<sub>2</sub>.

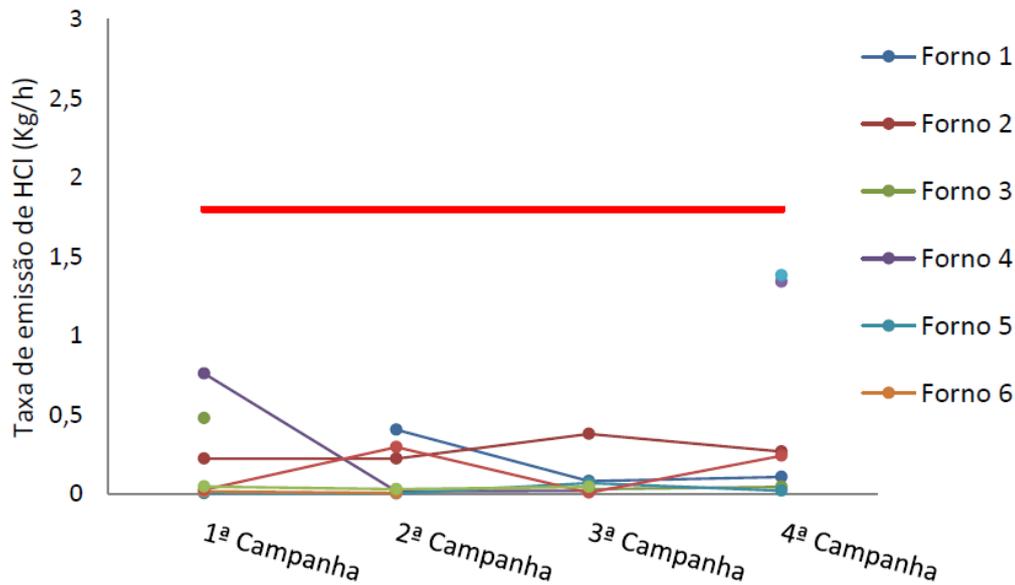
Observa-se no gráfico de automonitoramento de HF, que todos os resultados satisfazem os limites da legislação do estado de Minas Gerais e apenas um forno não atende ao nível estabelecido pela Diretiva Europeia.

#### *HCL*

O parâmetro estabelecido pela DN COPAM nº 154/2010 é de 1,8 kg/h ou 99% da remoção, mas assim como para o HF, não estabelece uma porcentagem de correção de O<sub>2</sub>. A norma CETESB e a norma europeia, ambas estabelecem como valor máximo, corrigido a 10% de O<sub>2</sub>, 10 mg/Nm<sup>3</sup>.

O GRÁF. 10 demonstra os resultados de automonitoramento de ácido clorídrico (HCl) dos fornos de clínquer com referência o ano de 2014 comparando-se ao limite da DN COMPAN 154.

Gráfico 10 - Resultados de automonitoramento de HCl dos fornos de clínquer



Fonte: LUIZ (2016)

Segundo Malard (2016), o ambiente alcalino dos fornos de clínquer proporciona uma adsorção de ácidos e óxidos. Não significando que todos os ácidos sejam eliminados, por este fato que foi preciso fixar os padrões de emissões nas legislações internacionais e nacionais.

No gráfico, pode-se observar que os limites são atendidos por todos os fornos, com valores bem abaixo do estabelecido pela DN COPAM 154.

Meystre (2016) relata que emissões de gases ácidos como é o exemplo do HCL e HF geralmente não é problema para os fornos das cimenteiras, pelo motivo que as reações com a matéria-prima alcalina são eficazes na adsorção.

O cloro e o flúor reagem com o CaO, formando cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>) e fluoreto de cálcio (CaF<sub>2</sub>). As reações também se podem dar como óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) e óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), formando-se cloretos e fluoretos alcalinos que podem volatilizar, entrando no ciclo interno do álcali previamente descrito (MEYSTRE, 2016, p. 74).

Uma alternativa para o controle eficaz do lançamento de metais é restringir a entrada de metais no processo que existem tanto nas matérias-primas, quanto nos combustíveis (United Nations Environment Programme, 2003).

Silva et al<sup>10</sup> (2016) apud Luiz 2016) destaca como o melhor método de controle dos metais, de acordo com recentes estudos, um sistema de lavagem a seco com filtros de magas,

<sup>10</sup> SILVA, M. et al. **Qualidade do Ar e Emissões Atmosféricas**. Centro Estadual de Educação Profissional de Curitiba-CEEP. Curitiba, 2016.

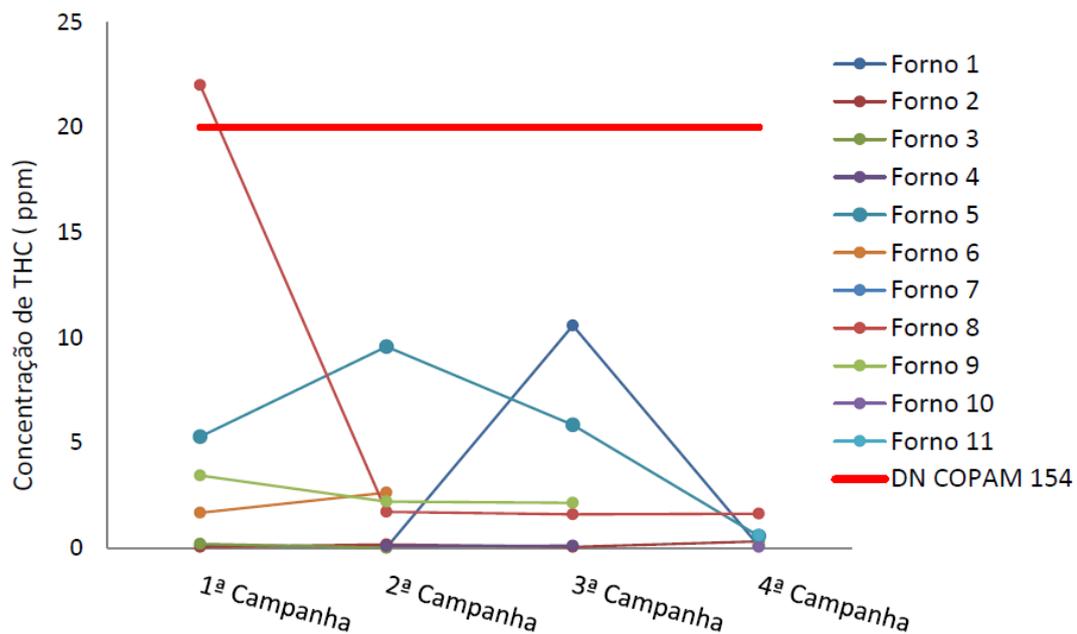
o qual é injetado cal virgem e carvão ativado, este inserido à lama de cal, remove com eficiência até 98% do mercúrio presente nos efluentes gasosos e não gera efluentes líquidos.

## 6.5 Hidrocarbonetos

Hidrocarbonetos totais, usualmente chamados de THC, é a medição mais comum desses compostos (Luiz, 2016). Conforme o estabelecido pela DN COM 154/2010 o padrão de emissão é de 20 ppmv (partes por milhão de volume) a 7%, medido com propano, equivalente a 14 ppmv de THC a 11%.

O GRÁF. 11 retrata os resultados de automonitoramento de THC dos fornos de clínquer com referência o ano de 2014 comparando-se ao limite da DN COMPAN 154.

Gráfico 11 - Resultados de automonitoramento de THC dos fornos de clínquer



Fonte: LUIZ (2016)

A Norma CETESB estabelece o mesmo padrão de emissão que a DN COPAM 154. Já a Diretiva Europeia 2010/75/EU apresenta padrão para COT (Total de Carbono Orgânico) de 10 mg/Nm<sup>3</sup> a 10% de O<sub>2</sub>. Convertendo o padrão estabelecido pela CETESB E DN COMPAM 154 para mg/Nm<sup>3</sup>, encontra-se um valor de 10 mg/Nm<sup>3</sup> a 11%.

No gráfico com os resultados de automonitoramento de THC, percebe-se que somente um valor está acima do permitido pela DN COPAM 154, o resultado da primeira campanha do forno 8.

Segundo Luiz (2016), que o resultado obtido pode ser em decorrência de fornecimento de combustíveis (chip de pneu) que não houve devido controle, com baixa resistência dos gases de combustão e/ou baixa turbulência no interior da câmara de combustão.

## 6.6 Utilização de raspas de pneus como coprocessamento

Ramos (2015) propôs um modelo que pudesse investigar a possibilidade do coprocessamento em indústrias cimenteiras, garantindo com que esse processo não interfira na qualidade do clínquer produzido e também que não atinja o meio ambiente. Como análise do seu projeto, utilizou-se duas empresas da região central do estado mineiro.

Para uma boa pesquisa e conseqüentemente boa avaliação dos resultados obtidos, deve-se conhecer a composição química da farinha de cru (TAB. 13), por ser responsável por uma parcela significativa da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera por causa do processo de produção do clínquer.

Tabela 13 - Componentes da farinha de cru na entrada do forno

Componentes	Composição 1	Composição 2
	% em peso	% em peso
SiO <sub>2</sub>	13,48	14,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,47	4,25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,19	1,88
SO <sub>3</sub>	0,27	0,08
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,07
K <sub>2</sub> O	0,61	0,60
CaO	43,07	42,63
MgO	1,01	0,49

Fonte: Ramos (2015)

Algumas misturas de combustíveis e suas composições químicas (TAB. 14) foram analisadas para que se pudesse calcular as emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. Raspas de pneus foram utilizadas no máximo 15% na mistura, por estar relacionada com emissões de MP, geração de CO no precalcinador, mantendo sempre o controle da combustão, sistema de despoejamento e controle na formação de NO<sub>x</sub> (RAMOS, 2015).

Tabela 14 - Composição Química e PCI dos combustíveis utilizados em fornos de clínquer

Composição dos combustíveis (%)	Carvão Mineral	Coque de Petróleo Importado 1	Coque de Petróleo Importado 2	Coque de Petróleo Nacional	Raspa de pneu
C	70,12	88,4	89,45	90,76	72,15
H	4,51	3,70	3,50	3,16	6,74
O	1,13	0,00	0,00	0,00	9,67
N	2,25	1,56	2,43	1,46	0,36
S	1,28	6,16	2,47	0,73	1,23
PCI (kJ/kg)	29928	34.350	34.859	35.069	32.580

Fonte: Ramos (2015)

As porcentagens de combustíveis por mistura nos 54 casos analisados por Ramos (2015) estão relacionadas no QUADRO 6 a seguir.

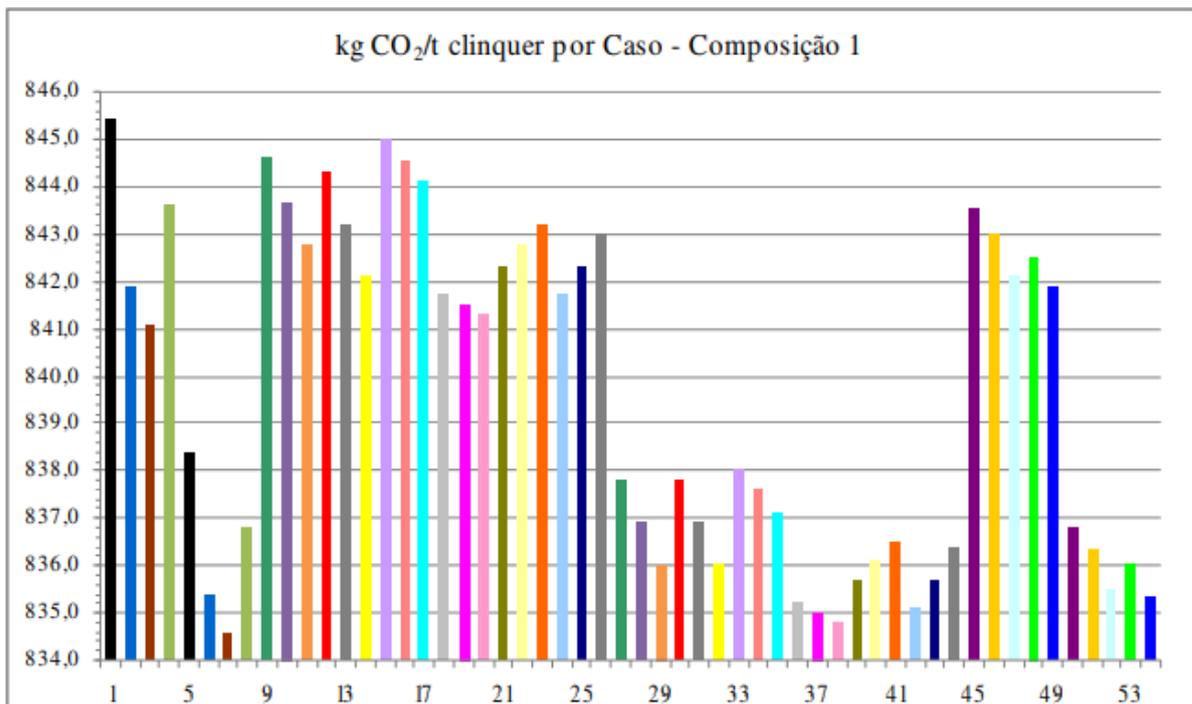
Quadro 6 - Porcentagem de combustíveis por mistura para cada caso

Mistura	Carvão Mineral (%)	Coque Pet Imp. 1 (%)	Coque Pet Imp. 2 (%)	Coque Pet Nac. (%)	Raspa de Pneu (%)	Mistura	Carvão Mineral (%)	Coque Pet Imp. 1 (%)	Coque Pet Imp. 2 (%)	Coque Pet Nac. (%)	Raspa de Pneu (%)
1	100	0	0	0	0	28	42,5	42,5	0	0	15
2	0	100	0	0	0	29	17,5	67,5	0	0	15
3	0	0	100	0	0	30	67,5	0	17,5	0	15
4	0	0	0	100	0	31	42,5	0	42,5	0	15
5	85	0	0	0	15	32	17,5	0	67,5	0	15
6	0	85	0	0	15	33	67,5	0	0	17,5	15
7	0	0	85	0	15	34	42,5	0	0	42,5	15
8	0	0	0	85	15	35	17,5	0	0	67,5	15
9	75	25	0	0	0	36	0	67,5	17,5	0	15
10	50	50	0	0	0	37	0	42,5	42,5	0	15
11	25	75	0	0	0	38	0	17,5	67,5	0	15
12	75	0	25	0	0	39	0	67,5	0	17,5	15
13	50	0	50	0	0	40	0	42,5	0	42,5	15
14	25	0	75	0	0	41	0	17,5	0	67,5	15
15	75	0	0	25	0	42	0	0	67,5	17,5	15
16	50	0	0	50	0	43	0	0	42,5	42,5	15
17	25	0	0	75	0	44	0	0	17,5	67,5	15
18	0	75	25	0	0	45	50	25	25	0	0
19	0	50	50	0	0	46	25	25	25	25	0
20	0	25	75	0	0	47	0	50	25	25	0
21	0	75	0	25	0	48	0	25	25	50	0
22	0	50	0	50	0	49	0	25	50	25	0
23	0	25	0	75	0	50	45	20	20	0	15
24	0	0	75	25	0	51	21,3	21,2	21,2	21,3	15
25	0	0	50	50	0	52	0	45	20	20	15
26	0	0	25	75	0	53	0	20	20	45	15
27	67,5	17,5	0	0	15	54	0	20	45	20	15

Fonte: Ramos (2015)

Os resultados obtidos por Ramos (2015) para as emissões de kg CO<sub>2</sub>/ton de clínquer foram dispostos nos gráficos apresentados a seguir. Considerou-se que para cada mistura de coque de petróleo, carvão mineral e combustíveis, há uma mistura com substituição parcial de 15% de raspas de pneus. No GRÁF. 12 estão os dados de emissões obtidos da composição 1 de farinha de cru.

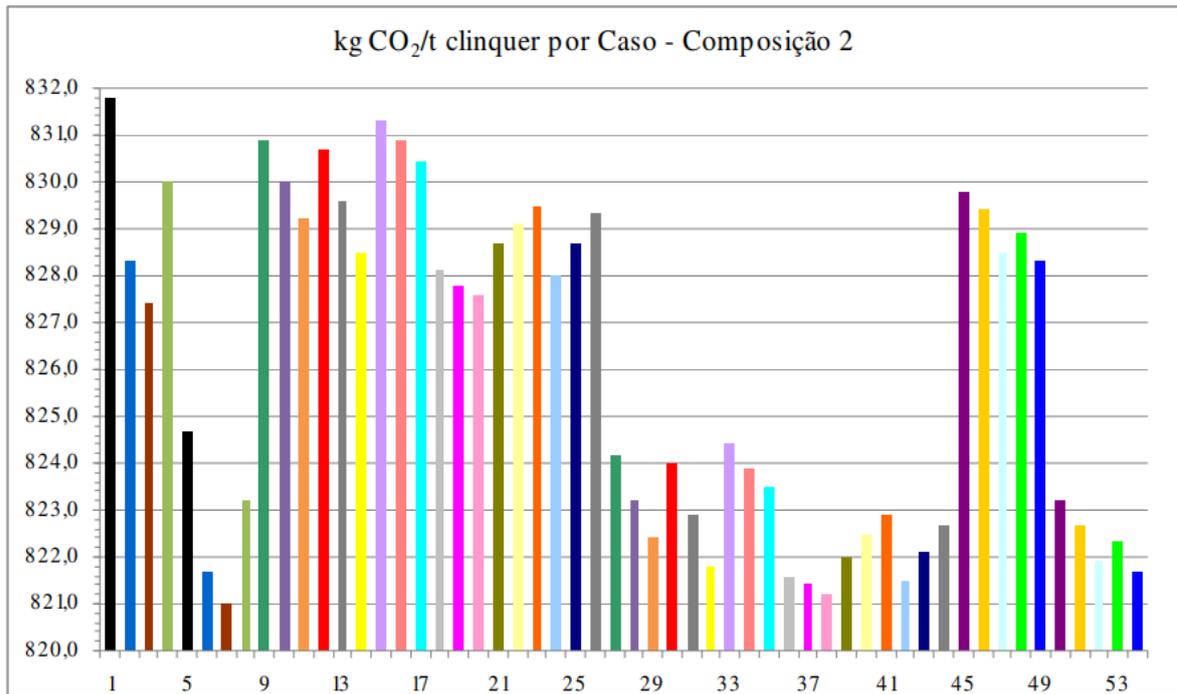
Gráfico 12 - Emissão de kg CO<sub>2</sub>/ton de clínquer para os casos estudados (Composição 1)



Fonte: Ramos (2015)

Ao adicionar um valor de 15% de raspas de pneus na mistura de combustíveis, infere-se que há uma redução significativa na emissão de CO<sub>2</sub>. Ramos (2015) explica que esse fato ocorre pela grande quantidade de hidrogênio na composição de pneus em relação à composição de outros combustíveis.

O GRÁF. 13 são os dados de emissões na composição 2.

Gráfico 13 - Emissão de kg CO<sub>2</sub>/ton de clínquer para os casos estudados (Composição 2)

Fonte: Ramos (2015)

Observa-se que ocorre o mesmo que na composição 1, ao adicionar-se à mistura uma porcentagem de raspas de pneus, ocorre a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub>.

Em ambos os gráficos, o caso 1 (100% Carvão Mineral) foi o que obteve maior valor de emissão e o caso 7 (85% de coque de petróleo importado e 15% de raspa de pneus) obteve-se o menor nível.

Conclui-se também que:

Considerando-se a substituição parcial do clínquer por escória de alto-forno, obtêm-se redução de aproximadamente 39.240 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, para uma produção aproximada de 1.128.860 toneladas de cimento por ano (cimento tipo CP I); redução de aproximadamente 359.100 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, para uma produção aproximada de 1.128.860 toneladas de cimento por ano (cimento tipo CP II-E); e reduções de aproximadamente 519.030 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, para uma produção aproximada de 1.128.860 toneladas de cimento por ano (cimento tipo CP III) (RAMOS, 2015, p. 119).

A Votorantim Cimentos (2017) relata que as operações de coprocessamento da empresa consumiram 676,8 mil toneladas de resíduos de pneus e biomassas (casca de arroz, cavacos de madeira, serragem e caroço do açaí) contribuindo assim para uma redução de 554,8 mil toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos e deixou de utilizar uma média de 10 mil caminhões de coque de petróleo.

## 6.7 Propostas de melhorias no sistema de controle das emissões

O processo de monitoramento das indústrias cimenteiras apresenta algumas falhas notadas durante a realização de pesquisas e obtenção de dados que serão listados a seguir visando melhoria nos sistemas.

Os sistemas que monitoram a qualidade do ar, os resíduos gerados e as emissões do estado de Minas Gerais, sejam eles SUPRAM e SIAM a nível regional ou FEAM a nível estadual, apresentam informações incompletas, devido a uma baixa qualidade nos relatórios de automonitoramento.

Os dados de automonitoramento das empresas são de difícil acesso, ou seja, nem sempre ficam para consulta pública rapidamente, porque podem expor fragilidades operacionais das empresas e não é feito de forma *online* ou com uma frequência coerente. Estes dados nem sempre são obtidos nos períodos determinados pelas normas ou com todas as informações necessárias. A periodicidade de automonitoramento das emissões atmosféricas deve seguir padrões mais restritivos

O Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental (RADA) que é o único Termo de Referência específico referente a revalidações de licenças de operação necessita-se de uma revisão, para que se obtenha uma avaliação consistente, observa-se como mencionado a falta de informações.

Como sugestão para melhorias destaca-se uma apresentação cumprindo ao exigido pela DN COMPAM nº 154/2010, em que deve-se implantar um monitoramento contínuo, com um encaminhamento “online” para o órgão ambiental responsável, das informações registradas dos parâmetros exigidos e disponibilização de relatórios com uma maior facilidade ao público.

## 7. CONCLUSÃO

Com base no estudo dos dados de pesquisas anteriores no aspecto quali-quantitativo conclui-se que o coprocessamento atende muito bem não somente as indústrias cimenteiras que têm redução de custo na produção e redução das emissões de poluentes, mas como também a sociedade e o meio ambiente, retirando materiais como pneus que demorariam até 100 anos para se degradarem e se caso fossem descartados indevidamente, causariam problemas como o acúmulo de água e riscos de incêndio.

A grande variedade de poluentes emitidos no processo de fabricação do clínquer deve ser levada em consideração pelas indústrias, na escolha correta dos equipamentos de controle e dos combustíveis/resíduos utilizados para que trabalhem sempre abaixo da legislação.

Alguns empreendimentos, como constatado, não atendem a frequência de monitoramento, têm resultados de emissões acima dos permitidos ou têm focado em apenas um tipo de emissão. Para essas empresas, deve ser adotado medidas mais eficientes para que não continue ocorrendo problemas. Cabe ao órgão regulamentador também aplicar penalidades mais severas quanto ao descumprimento de algumas dessas “infrações”, para que os problemas sejam logo resolvidos.

Conclui-se então que o coprocessamento de fato é uma boa técnica para ser adotada em fornos de clínquer, destinando assim corretamente resíduos sólidos e diversos benefícios. O coprocessamento não interfere no aumento de emissões de CO, não altera as concentrações de óxidos de enxofre, reduz as emissões de óxidos de nitrogênio e não tem relação com acréscimos de emissão de materiais particulados.

Esta prática de coprocessamento, mesmo bem avançada, ainda demanda uma quantidade significativamente grande de estudos, visando por exemplo, novas técnicas que reduzam a quantidade de SO<sub>2</sub> emitido e ações que utilizem ao máximo o resíduo sem que comprometa a qualidade do produto final, a operação do forno ou as emissões. Visando sempre redução das emissões, redução de custo e a melhoria da qualidade de vida.

Recomenda-se para trabalhos futuros uma análise das emissões de outros estados ou do Brasil, em relação as emissões de Minas Gerais, para servirem de comparativo em relação aos valores permitidos de cada norma respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- ALISSON, E. **Pesquisadores da USP desenvolvem cimento ecoeficiente**. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/pesquisadores-da-usp-desenvolvem-cimento-ecoeficiente/17215/>>. Acesso em: 18 jul. 2018.
- ANDRADE, L. F. **Cytogenotoxicity of SPL "(Spent Pot Liner)" by plant root tip bioassays**. 2008. 135 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras-UFLA, Lavras 2008.
- 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, **Índia**, v. **31**, p. **309-317**.
- BATTAGIN, A. F. Uma breve história do cimento Portland. **Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- BELATO, M. N. **Análise da Geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013. 192, p. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Itajubá-Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2013.
- BRANCÃO, L. O. **O que é forno rotativo de clínquer**. Disponível em: <<http://blogdocumento.blogspot.com/2014/10/o-que-e-forno-rotativo-de-clinquer.html>>. Acesso em: 18 jul. 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Proposta de Limites de Emissão de Fontes Fixas Existentes: Setor Cimenteiro**. 2010.
- \_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. p. 292. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2017.
- CARALHO, P. S. L. de; MELO, P. P. D. M. L. Panoramas setoriais: Mudanças Climáticas, Cimento. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico Social (BNDS)**. 2016. p. 32-37. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7207/1/Cimento\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7207/1/Cimento_P.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2018.
- CONAMA. **Resolução Conama nº 264/1999**. Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. 20 mar. 2000. p. 80-83.
- COPAM. **Deliberação Normativa COPAM nº 154/ 2010**. Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. 25 ago. 2010.
- DREHMER, D. T., CAMERA, R. L. **Análise da conformidade legal do processo de licenciamento ambiental e gestão de resíduos sólidos em uma cooperativa varejista do Rio Grande do Sul**. Cruz Alta, v. 2, n. 1, p 2-22, ago. 2018.

ECYCLE. **O que é coprocessamento e quais as vantagens ambientais que ele pode oferecer?** 11 set. 2017. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/67-dia-a-dia/5918-o-que-e-coprocessamento-e-quais-as-vantagens-ambientais-que-ele-pode-oferecer-.html>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

FREIRE, D. **Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO<sub>2</sub>**. 27 jun. 2016. Disponível em: <[http://agencia.fapesp.br/especialistas\\_discutem\\_papel\\_da\\_industria\\_do\\_cimento\\_nas\\_emissoes\\_de\\_co2/23449/](http://agencia.fapesp.br/especialistas_discutem_papel_da_industria_do_cimento_nas_emissoes_de_co2/23449/)>. Acesso em: 28 abr. 2018.

GAUTO, M. A.; ROSA, G. R. **Química Industrial**. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 6, p. 173-192.  
\_\_\_\_\_. O cimento. In: \_\_\_\_\_. **Processos e Operações Unitárias da indústria Química**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2011. cap. 6, p. 259-282.

HILL, S.C; SMOOT, L. D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. **Progress in Energy and Combustion Science**, Provo, v. 26, p 417-458, mar. 2000.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Indústria sobe em oito dos 14 locais pesquisados em dezembro e avança em 12 dos 15 locais no acumulado de 2017**. 2018. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/19955-industria-sobe-em-oito-dos-14-locais-pesquisados-em-dezembro-e-avanca-em-12-dos-15-locais-no-acumulado-de-2017.html>>. Acesso 28 abr. 2018.

International Energy Agency (IEA). **Cement technology roadmap plots path to cutting CO<sub>2</sub> emissions 24% by 2050**. 6 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/newsroom/news/2018/april/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050.html>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

Isotec Ambiental. **O que é Blendagem de resíduos**. 11 abr. 2017. Disponível em: <<http://isotecambiental.com.br/o-que-e-blendagem-de-residuos/>>. Acesso em: 01 maio 2018.

KIHARA, Y.; VISEDO G. A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil. **Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)**. 23 maio 2014. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil/>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

LEÃO, T. S. V. **O estudo da eficiência energética: combustíveis do processo de calcinação**. 2012. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)-Centro Universitário de Formiga-UNIFOR-MG, Formiga, 2012.

LUIZ, I. M. de C. **Avaliação das emissões atmosféricas do setor de coprocessamento no estado de Minas Gerais: Análise dos dados de automonitoramento**. 2016. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária)-Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MALARD, A. A. M. **Avaliação ambiental do setor de coprocessamento no estado de Minas Gerais**. 2016. 246 p. Tese de Doutorado (Engenharia Química)-Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

MEYSTRE, J. A. **Análise do coprocessamento de resíduo sólido urbano na indústria de cimento Portland no Brasil**. 2016. 215 p. Tese de Doutorado (Pós Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Itajubá-Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2016.

NETO, B. C S. **Proposição de um sistema de gestão na atividade de coprocessamento de resíduos industriais em fornos de cimento**. 2012. 195 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão) – Universidade Federal Fluminense. 2012

NIELSEN, P. B.; JEPSEN, O. L. An overview of the formation of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> in various pyroprocessing systems. **F.L. Smidth & Co. A/S**. Copenhagen, 1990, p. 255-276.

PANORAMA. **Panorama do Coprocessamento Brasil 2015**. Documento da ABCP. Dez. 2015. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/53158/R%20-%20E%20-%20DAITON%20FERNANDO%20MUNHOL%20DE%20SOUZA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

RAMOS, M. D. **Estudo da formação e emissão de poluentes na atmosfera originários do coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento**. 2015. 125 p. Tese de Doutorado (Pós Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Itajubá-Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2015.

RESENDE, A. L. de O. **Alternativas para redução de emissões de NO<sub>x</sub> em fornos de clínquerização com coprocessamento**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Centro Universitário de Formiga – Unifor-MG, Formiga, 2017.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. da S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 112 p.

RODRIGUES, et. al. **Modelagem matemática de um forno rotativo empregado na produção de clínquer**. 2013. 8 p. 2013.

SANTINI, A. M. M; FILHO, A. O. S. **Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento; casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações**. 2004. Campinas, 2004. 18 p.

SANTINI, J. **Filtro de mangas para o controle de emissões atmosféricas de particulado gerados no beneficiamento de mármore e granitos**. 2011. 59 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Passo Fundo, 2011.

SANTOS, A. **Copa do mundo impulsiona consumo de cimento da Rússia**. 25 abr. 2018. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/copa-do-mundo-impulsiona-consumo-de-cimento-na-russia/>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

SANTOS, F. O. dos. **Coprocessamento e a contaminação ambiental: Perspectivas Para a Saúde Ambiental**. 1. ed. Curitiba, 2015. 83 p.

SIGNORETTI, V. T. **Controle das Emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e Metais Pesados Quando se Utilizam Combustíveis Alternativos e de Alto Teor de Enxofre na Indústria de Cimento**. 2008. 205 p. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Itajubá- Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2008.

SINDBORPR. **Pneus Inservíveis: os que são, para quê servem e para onde devem ir?** 07 mar. 2014. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/sindicatos/sindbor/news11328content242899.shtml>>. Acesso em: 1 maio 2018.

SILVA, A. S. et al. Mitigação das emissões de SO<sub>x</sub> na indústria cimenteira. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**. Niteroi, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2. 2014. Disponível em: <<http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/viewFile/V9N2A5/SGV9N2A5>>. Acesso em: 04 set. 2018.

SILVA, M. A. L. da. **Perspectiva para redução das emissões de óxidos de nitrogênio nos processos de combustão no polo petroquímico de Camacari**. 2008. 140 p. Dissertação de Mestrado (Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo – Ênfase em Produção Limpa) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

SILVA, R. J. da; SIGNORETTI, V. T. **Formação de NO<sub>x</sub> em fornos rotativos de produção de clínquer da indústria do cimento**. Itajubá, 12 p, dez. 2006.

SNIC. **Dados do setor**. 2016. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

SOUZA, G. A. A. et al. **Arquitetura de terra: alternativa sustentável para os impactos ambientais causados pela construção civil**. Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p 1-13, maio 2015.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME). **Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases**. 2003. UNEP Chemicals, Geneva, Switzerland, 2003.

U.S. EPA (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). **NO<sub>x</sub> Control Technologies For The Cement Industry Final Report**. Sanders, D. 2000. 114 p.

U. S. Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2018**. 2018. 200 p.

Votorantim Cimentos. **Relatório Integrado**. 2017. 121 p.