



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DO SETOR DE  
COPROCESSAMENTO NO ESTADO DE MINAS GERAIS: ANÁLISE DOS DADOS  
DE AUTOMONITORAMENTO**

**ISABELA MÁRCIA DE CARVALHO LUIZ**

**BELO HORIZONTE  
2016**

ISABELA MÁRCIA DE CARVALHO LUIZ

AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DO SETOR DE  
COPROCESSAMENTO NO ESTADO DE MINAS GERAIS: ANÁLISE DOS DADOS  
DE AUTOMONITORAMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Centro Federal de Educação Tecnológica  
de Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Ambiental  
e Sanitarista.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>.Doutora Patrícia Procópio Pontes

BELO HORIZONTE  
2016



Serviço Público Federal – Ministério da Educação  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENGENHARIA  
AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**ATA DE DEFESA FINAL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

Aos 29 dias do mês de **novembro** de 2016, no *campus* I do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, reuniram-se as professoras Patrícia Procópio Pontes, Patrícia Sueli de Rezende e Tânia Cristina de Souza, para participarem da banca de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “*Avaliação das emissões atmosféricas do setor de coprocessamento no estado de Minas Gerais: análise dos dados de automonitoramento*” de autoria do(a) aluno(a) *Isabela Márcia de Carvalho Luiz*, do curso de Engenharia de Ambiental e Sanitária. Uma vez avaliado, o trabalho foi declarado:

- Aprovado.  
 Reprovado.

Belo Horizonte, 29 de novembro de 2016.

Banca Examinadora:

*Patrícia Pontes*

\_\_\_\_\_  
Profª. Orientadora: Dra. Patrícia Procópio Pontes

*Patrícia Sueli de Rezende*

\_\_\_\_\_  
Profª. Dra. Patrícia Sueli de Rezende

*Tânia Cristina de Souza*

\_\_\_\_\_  
Tânia Cristina de Souza

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar a Deus, pelas bênçãos de ter me encaminhado para a realização do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, que me ajudou a crescer pessoalmente e profissionalmente e que tenho muito amor em exercê-lo. Ao nosso Mestre Jesus, por ter sido o meu guia e me dado forças em todas as dificuldades surgidas ao longo do curso.

Aos meus familiares, em especial a meus pais, aos meus irmãos, e ao meu namorado Érico pelo apoio, companheirismo e palavras de incentivo, amor e carinho.

Aos meus colegas e amigos do CEFET- MG, pela amizade, parceria e trabalhos em grupo e a todos os professores do curso que foram muito importantes na minha vida acadêmica.

À instituição de ensino CEFET-MG, pela oportunidade de aprendizado e infraestrutura nos estudos.

À Gerência de Produção Sustentável da FEAM por ter me ajudado a crescer profissionalmente, em especial ao Antônio Malard, que me deu o suporte necessário para a realização do meu trabalho.

À minha orientadora, Professora Dra Patrícia Procópio Pontes, que me acompanhou ao longo do ano, me dando conselhos e direções para a execução do trabalho.

## RESUMO

A poluição atmosférica tem sido um dos grandes problemas que afetam o meio ambiente e a sociedade nas últimas décadas. A indústria cimenteira é uma das fontes responsáveis por grandes impactos ambientais provocados pela emissão de gases poluentes. Muitas cimenteiras vêm utilizando a técnica do coprocessamento na produção de clínquer, que consiste na destruição térmica de resíduos a altas temperaturas em fornos de fabricação de clínquer, com aproveitamento de conteúdo energético e/ou fração mineral, sem a geração de novos resíduos. Apesar de contribuir com a economia de combustíveis convencionais e matérias primas, gerando receita às cimenteiras por meio da redução de custos operacionais, uma das grandes preocupações da queima de resíduos nos fornos rotativos refere-se às suas emissões atmosféricas, que devem ser analisadas e monitoradas periodicamente. O objetivo geral desse trabalho foi avaliar as emissões atmosféricas dos fornos rotativos das cimenteiras que realizam a atividade de coprocessamento no Estado de Minas Gerais a partir de relatórios de automonitoramento de 2014. A metodologia para a realização do estudo consistiu no levantamento de informações contidas nos Relatórios de Automonitoramento de 9 empreendimentos que realizam a prática do coprocessamento no Estado de Minas Gerais. Os poluentes atmosféricos analisados foram: MP, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HF, HCl, hidrocarbonetos, metais e dioxinas e furanos. Os resultados apontaram que a maioria dos fornos rotativos atendem aos padrões de emissão estabelecidos na DN COPAM nº 154/2010. No entanto, alguns empreendimentos emitem parâmetros em concentrações acima dos padrões de emissão da legislação, indicando a necessidade de um melhor controle na emissão desses poluentes. Para os parâmetros emitidos em desacordo com a norma ambiental, foram pesquisadas e apresentadas propostas de melhoria nos sistemas de controle de emissão dos empreendimentos que requerem uma maior atenção.

Palavras-Chave: Coprocessamento, emissões atmosféricas, poluentes atmosféricos, fornos de clínquer.

## **ABSTRACT**

Air pollution has been one of the major problems affecting the environment and society in recent decades. The cement industry is one of the sources responsible for major environmental impacts caused by the emission of polluting gases. Many cement plants have been using the coprocessing technique in the production of clinker, which consists of the thermal destruction of residues at high temperatures in clinker kilns, using energy content and / or mineral fraction, without the generation of new residues. Although it contributes to the economics of conventional fuels and raw materials, generating revenue to the cement plants through the reduction of operating costs, one of the major concerns about the burning of waste in rotary kilns is their atmospheric emissions, which must be analyzed and monitored periodically. The general objective of this work was to evaluate the atmospheric emissions of the rotary kilns of the cement mills that carry out the coprocessing activity in the State of Minas Gerais, based on self-monitoring reports for 2014. The methodology for conducting the study consisted of the collection of information contained in the Reports Of Self-monitoring of 9 projects that carry out the practice of coprocessing in the State of Minas Gerais. The air pollutants analyzed were: MP, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HF, HCl, hydrocarbons, metals and dioxins and furans. The results showed that most of the rotary kilns meet the emission standards established in DN COPAM nº 154/2010. However, some ventures emit parameters in concentrations above the emission standards of the legislation, indicating the need for a better control in the emission of these pollutants. For the parameters issued in disagreement with the environmental standard, proposals for improvement in the emission control systems of the projects that require greater attention were researched and presented.

Key Words: Coprocessing, atmospheric emissions, air pollutants.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Processo simplificado de fabricação do cimento .....	6
FIGURA 2- Pontos de alimentação de resíduos para coprocessamento .....	15
FIGURA 3- Exemplos de alimentação de combustíveis e matérias-primas alternativas .....	17
FIGURA 4 - Marco regulatório da atividade de coprocessamento no Brasil .....	27
FIGURA 5- Divisão do Estado de Minas Gerais por Regionais.....	38
FIGURA 6- Filtro de mangas com entrada externa do ar poluído .....	57
FIGURA 7- Coluna de Redução Catalítica Seletiva .....	61
FIGURA 8- Diagrama esquemático do sistema de recuperação de COV's por adsorção em carvão ativado .....	64
FIGURA 9- Secador Spray .....	66
FIGURA 10- Fluxograma geral para o tratamento dos poluentes do coprocessamento de resíduos utilizando lavador a seco (Proposta para o forno 1) .	68
FIGURA 11- Fluxograma geral para o tratamento dos poluentes do coprocessamento de resíduos utilizando adsorção (Proposta para o forno 8).....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos metais pesados de acordo com seu grau de toxicidade .....	26
Tabela 2 - Teores máximos de metais para entrada no forno e PCI mínimo (substituição de combustível) .....	30
Tabela 3 - Critérios para equivalência .....	32
Tabela 4- Padrões de emissões atmosféricas para coprocessamento em forno rotativo .....	36
Tabela 5- Localização dos fornos analisados.....	37
Tabela 6- Dados de operação da atividade de coprocessamento nos fornos analisados .....	39
Tabela 7- Fornos em inconformidade com a DN 154/2010 .....	53
Tabela 8- Técnicas propostas para remoção dos poluentes dos fornos de clínquer.	54



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Resultados de automonitoramento de MP dos fornos de clínquer .....	42
Gráfico 2- Resultados de automonitoramento de SOx dos fornos de clínquer .....	43
Gráfico 3 - Resultados de automonitoramento de NOx dos fornos de clínquer .....	43
Gráfico 4- Resultados de automonitoramento de HF dos fornos de clínquer .....	45
Gráfico 5- Resultados de automonitoramento de HCl dos fornos de clínquer .....	45
Gráfico 6- Resultados de automonitoramento de THC dos fornos de clínquer .....	46
Gráfico 7- Resultados de automonitoramento do somatório de tolueno, etilbenzeno e xileno dos fornos de clínquer.....	47
Gráfico 8- Resultados de automonitoramento de benzeno dos fornos de clínquer ...	47
Gráfico 9- Resultados de automonitoramento de metais classe 1 dos fornos de clínquer .....	48
Gráfico 10- Resultados de automonitoramento de metais classe 2 dos fornos de clínquer .....	48
Gráfico 11- Resultados de automonitoramento de metais classe 3 dos fornos de clínquer .....	49
Gráfico 12- Resultados de automonitoramento de metais classe 1+2 dos fornos de clínquer .....	50
Gráfico 13- Resultados de automonitoramento de metais classe 1+3 dos fornos de clínquer .....	51
Gráfico 14- Resultados de automonitoramento de metais classe 2+3 dos fornos de clínquer .....	51
Gráfico 15- Resultados de automonitoramento de dioxinas e furanos dos fornos de clínquer .....	52

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
3.1. A produção de Cimento em Minas e no Brasil .....	4
3.2. Localização do parque industrial em Minas Gerais .....	4
3.3. Fabricação do cimento .....	5
3.4. Combustíveis utilizados na indústria cimenteira .....	7
3.4.1. Coque de Petróleo.....	7
3.4.2. Carvão Mineral.....	9
3.4.3. Carvão Vegetal .....	10
3.4.4. Óleo Combustível .....	10
3.4.5. Energia Elétrica .....	11
3.4.6. Combustíveis Alternativos .....	11
3.4.6.2. Resíduos que podem ser Co-processados em Fornos de Cimentos ....	12
3.5. Atividade de Coprocessamento.....	14
3.6. Poluentes gerados pela prática do coprocessamento.....	18
3.6.1. Material Particulado (MP).....	18
3.6.2. Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) .....	19
3.6.3. Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> ).....	21
3.6.4. Hidrocarbonetos.....	22
3.6.6. Ácido Clorídrico (HCl) .....	24
3.6.7. Ácido Fluorídrico (HF).....	25
3.6.8. Metais .....	25
3.7. Legislações aplicáveis ao setor de coprocessamento no Brasil.....	26
3.7.1. Deliberação Normativa COPAM nº 154/2010 .....	27
3.7.2. Avaliação dos padrões de emissões atmosféricas DN COPAM nº 154/2010 .....	33
3.7.2.1. Material Particulado (MP).....	33
3.7.2.2. Óxido de enxofre (SO <sub>x</sub> ) .....	33

3.7.2.3. Óxido de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) .....	34
3.7.2.4. Ácido Fluorídrico (HF).....	34
3.7.2.5. Ácido Clorídrico (HCl) .....	34
3.7.2.6. Hidrocarbonetos.....	34
4. METODOLOGIA.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
5.1. Resultados de automonitoramento.....	42
5.2. Propostas de melhoria no sistema de controle de emissão .....	53
5.2.1. Remoção de Material Particulado .....	55
5.2.2. Remoção de NO <sub>x</sub> .....	58
5.2.3. Remoção de VOC's/THC .....	62
5.2.4. Remoção de Metais Classe 1 .....	65
5.2.5. Análise geral dos resultados.....	67
6. CONCLUSÕES .....	69
REFERÊNCIAS.....	71

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar tem sido, desde a Revolução Industrial, um grave problema nos centros urbanos industrializados, com a presença cada vez maior das indústrias como fontes poluidoras (STEFFENS, 2013). Desde que a poluição do ar passou a gerar uma série de consequências à saúde do homem e ao meio ambiente, o seu combate tem-se tornado uma das prioridades das autoridades de diversos países, bem como de organizações nacionais e internacionais, sejam elas governamentais ou não. (MALARD, 2009).

Para a implementação de medidas protetoras contra a poluição do ar e seus efeitos, é necessário conhecer as fontes mais prováveis desta poluição e as concentrações nas quais os poluentes se tornam presentes na atmosfera (ELSON, 1992 apud STEFFENS, 2013).

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

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2010), mais da metade de todo custo direto de produção de uma fábrica de cimento corresponde às despesas com combustíveis e energia elétrica. A fim de melhorar o desempenho econômico das indústrias cimenteiras, surge então uma técnica denominada coprocessamento, que consiste na destruição térmica de resíduos a altas temperaturas em fornos de fabricação de clínquer (principal matéria-prima do cimento), com aproveitamento do conteúdo energético e/ou fração mineral, sem a geração de novos resíduos (ROCHA et al, 2009). A técnica contribui com a economia de combustíveis e matérias primas minerais não renováveis, proporcionando aos geradores uma alternativa para a destinação final e às cimenteiras uma forma de reduzir custos operacionais por meio da receita adquirida com a queima e substituição parcial do combustível convencional (FEAM, 2008).

Apesar dos inúmeros benefícios obtidos com o coprocessamento de resíduos, seja no aspecto ambiental quanto no aspecto econômico, os efeitos de sua utilização

no meio ambiente e na saúde de trabalhadores e populações que vivem nas proximidades das indústrias cimenteiras devem ser mais conhecidos e estudados.

O Estado de Minas Gerais tem um grande potencial de adoção da prática do coprocessamento, por ser o maior produtor de cimento do Brasil, possuindo, atualmente, doze indústrias em operação, totalizando dezoito fornos rotativos, que, juntos, são responsáveis por cerca de 20% da capacidade instalada do país (FEAM, 2016). Várias cimenteiras que realizam a atividade de coprocessamento em Minas Gerais estão localizadas próximo a centros urbanos, tornando-se necessária a realização de um rígido controle das emissões provenientes de seus fornos de clínquer.

Para isso, tanto as empresas quanto o órgão ambiental devem verificar as concentrações dos poluentes lançados pelas chaminés dos fornos de clínquer em Minas Gerais, comparando-as com os padrões estabelecidos na Deliberação Normativa COPAM nº 154/2010, a fim de evitar danos à saúde humana e ao meio ambiente e garantir uma qualidade satisfatória ao ar.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Avaliar as emissões atmosféricas dos fornos rotativos das cimenteiras que realizam a atividade de coprocessamento no Estado de Minas Gerais, a partir de relatórios de automonitoramento de 2014.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar as concentrações dos poluentes atmosféricos provenientes da produção do clínquer em sistemas-fornos rotativos, por meio do coprocessamento.
- Comparar os resultados de automonitoramento com os padrões estabelecidos na Deliberação Normativa COPAM nº 154/2010.
- Apresentar técnicas para remoção dos poluentes originados dos fornos de coprocessamento que não atenderam à legislação ambiental, como propostas de melhoria do sistema de controle das emissões dos empreendimentos analisados.

### **3. ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1. A produção de Cimento em Minas e no Brasil**

Segundo o Relatório Anual 2013 do SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, o Brasil teve no final de 2013, um aumento de 2,4% no consumo de cimento em relação ao ano anterior, atingindo 71 milhões de toneladas. Isso significou um consumo per capita de 353 kg/hab/ano.

Dados apontam que o tipo de cimento mais produzido no Brasil é o Cimento Portland Composto (CPII), representando 58,8% da produção total. Segundo a NBR 11578/91, esse tipo de cimento apresenta em sua composição cerca de 94 a 56% de clínquer e sulfatos de cálcio, 6 a 34% de escória granulada de alto-forno, 6 a 14% de material pozzolânico e até 10% de material carbonático. Atualmente, os revendedores são os principais consumidores de cimento no Brasil, representando 54% do consumo total, seguido das concreteiras (21%), construtoras e empreiteiras (12%), consumidores industriais como fibrocimento, pré-moldados e argamassas (6%), artefatos (5%), órgãos públicos e prefeituras (1%) e importação (1%) (SNIC, 2013).

De acordo com a Feam (2008), em 2007 foram comercializadas 44 milhões de toneladas de cimento no Brasil, sendo que o estado de Minas Gerais é responsável por aproximadamente 48% da produção nacional.

#### **3.2. Localização do parque industrial em Minas Gerais**

Os fatores que levam uma indústria cimenteira a instalar-se em determinada região são a facilidade de obtenção das matérias-primas e de escoamento da produção, que são existentes em Minas Gerais. Uma das razões de o estado de Minas Gerais ser o maior produtor de cimento no Brasil são a abundância e a excelente qualidade do seu calcário (FEAM, 2016).

Em Minas Gerais, as indústrias produtoras de cimento estão distribuídas em várias regiões, sendo o principal pólo localizado no vetor norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte, contemplando os municípios de Pedro Leopoldo,

Matozinhos e Vespasiano. Dentre os 12 empreendimentos existentes em operação, 10 realizam a prática do coprocessamento em Minas Gerais.

### 3.3. Fabricação do cimento

Para a fabricação do cimento, duas matérias primas básicas são necessárias: o calcário (87%) e a argila (11%), que contém respectivamente  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$ . São feitas adições de minério de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), areia ( $\text{SiO}_2$ ) e bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para correção dos argilo-minerais (FEAM, 2008).

De acordo com Silva (2009), o processo de fabricação do cimento é composto pelas seguintes etapas:

- **Mineração:** Extração e remoção das matérias primas constituintes do cimento (calcário e argila).
- **Britagem:** Processo de fragmentação da matéria-prima para obtenção da granulometria apropriada para o processo.
- **Pré-homogeneização:** A pré-homogeneização procura garantir uma composição definida ao longo de todo o depósito para o material a ser enviado ao moinho. Mediante o conhecimento prévio da composição físico-química e mineralógica das matérias-primas determina-se a quantidade de cada constituinte.
- **Moagem da matéria-prima:** Consiste no processo de moagem e secagem das matérias primas (calcário, argila e outros materiais corretivos, alimentados no moinho). Esses materiais são misturados e reduzidos a partículas cerca de 50 microns. O produto desta moagem é conhecido como “farinha”.
- **Clinquerização:** A matéria-prima é submetida a um processo de aquecimento em um forno rotativo que leva à produção final do clínquer, principal constituinte do cimento.

Após esse processo, o clínquer (material cinza, granular e sinterizado) é resfriado e moído finamente em moinhos de bolas ou rolos e durante essa moagem é feita a adição de gesso em quantidades suficientes para resultar numa concentração



de 2% a 3% de sulfato no cimento, necessária para ajuste do tempo de pega do produto de modo a permitir sua utilização. Outras adições como escória de alto forno, pozolanas e cinzas, são realizadas nessa etapa de fabricação do cimento composto. O produto é ensacado ou armazenado em silos e em seguida despachado em caminhões, ou vagões graneleiros (SANTI, 2003). A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do processo de fabricação do cimento.

FIGURA 1 - Processo simplificado de fabricação do cimento



Fonte: Adaptado de WBCSD (2009)

De forma sucinta, o processo de fabricação de cimento consiste na homogeneização das matérias-primas, seguido pela fragmentação para obtenção da granulometria desejada e calcinação em um forno rotativo (forno de clínquer). O clínquer é moído finamente em conjunto com o gesso, resultando no produto final, o cimento (FEAM, 2010). Vale destacar que no estado de Minas Gerais, não existem unidades que fabriquem clínquer pelo processo via úmida.

De forma sucinta, o processo de fabricação de cimento consiste na homogeneização das matérias-primas, seguido pela fragmentação para obtenção da granulometria desejada e calcinação em um forno rotativo (forno de clínquer). O clínquer é moído finamente em conjunto com o gesso, resultando no produto final, o cimento (FEAM, 2010).

As emissões atmosféricas são provenientes dos diferentes pontos do processo de produção de cimento, dependendo das matérias-primas e combustíveis, dos procedimentos de preparação, dos tipos de fornos e dos sistemas de controle de emissão de gases. Os principais passos da produção, fontes de emissão potenciais, são: Mineração e preparação de matérias-primas; Manuseio de combustíveis; Produção de clínquer; Moagem final; Ensacamento; Armazenamento; Mistura; Transporte e Carregamento do material (WBCSB, 2012).

### **3.4. Combustíveis utilizados na indústria cimenteira**

A indústria do cimento consome grande quantidade de energia, sendo que mais da metade de todo o custo direto de produção de uma fábrica corresponde às despesas com combustíveis e energia elétrica (SNIC, 2010).

Em 2013, a indústria de cimento no Brasil consumiu 5,32 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), equivalente a aproximadamente 6% do consumo industrial total (EPE, 2014). Dentre as fontes de energia utilizadas pelo setor de cimento destacam-se o coque de petróleo, a moinha de carvão vegetal, o carvão mineral, o óleo combustível, a eletricidade e os combustíveis alternativos.

#### **3.4.1. Coque de Petróleo**

O coque do petróleo é originado do coqueamento, processamento dos resíduos pesados derivados da destilação do petróleo, que aumenta o rendimento global de uma refinaria em termos de produção de derivados leves e médios. Existem dois tipos de coque: o coque verde e o coque calcinado. Atualmente no Brasil, somente a Petrobrás é responsável pela sua produção (PETROBRAS, 2016).

O coque de petróleo que era considerado combustível alternativo pela indústria de cimento, atualmente é o combustível principal mais utilizado. No Brasil, em 2006, o coque de petróleo respondeu por 66% do total dos combustíveis queimados nas cimenteiras (BEN, 2008), e a tendência é o uso cada vez mais intensivo devido à sua alta disponibilidade e baixo preço.

De acordo com Paula (2009), o coque de petróleo é caracterizado pelo seu alto teor de carbono, alto poder calorífico, baixos conteúdos de voláteis e baixos teores de cinzas. No entanto, o coque de petróleo tem como desvantagens o alto teor de nitrogênio, que favorece o aumento das emissões de  $\text{NO}_x$  e o alto teor de enxofre, proporcionando também aumento das emissões de  $\text{SO}_x$  e maior dificuldade de controle do processo.

A indústria de cimento pode utilizar o coque de petróleo com alto teor de enxofre devido às condições alcalinas existente no seu processo de produção. O dióxido de enxofre, originado da queima do coque de petróleo reage com os compostos de cálcio, sódio e potássio, contidos no cru, resultando os compostos:  $\text{CaSO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , que são incorporados ao clínquer (PAULA et al, 2010).

Atualmente são produzidos dois tipos de coque nas refinarias de petróleo: coque fluido e coque verde. O coque fluido é obtido de processos contínuos através do coqueamento em leito fluidizado. É formado por pequenas esferas de diâmetro inferior a 1mm, muito duras, contendo de 5% a 6% de voláteis, sendo que sua dureza dificulta o processo de moagem. Já o coque verde é obtido de processos não contínuos por meio do coqueamento retardado, apresentando tamanho e forma bastante irregulares. Seu conteúdo de enxofre varia entre 0,5% e 5% e apresenta maior teor de voláteis que o coque fluido. O Brasil atualmente só produz o coque verde e exporta a maior parte de sua produção, devido a seu baixo teor de enxofre, menor do que 1% (PAULA, 2009).

### 3.4.2. Carvão Mineral

Segundo Paula (2009), o carvão mineral é um combustível fóssil sólido, de cor entre castanha e negra, formado pela decomposição parcial de matéria vegetal, livre do contato com o ar e, em muitos casos, sob a influência de aumento de pressão e de temperatura que perderam oxigênio e hidrogênio e se enriqueceram em carbono, em um processo denominado carbonização.

O carvão mineral brasileiro é de qualidade inferior aos carvões do hemisfério norte, tem um alto teor de cinzas, o que dificulta sua aplicação como carvão metalúrgico, sendo bastante usado como energético nas usinas de geração de energia elétrica (PAULA, 2009).

O teor de cinzas dos carvões minerais brasileiros não é um fator limitante para sua queima nos fornos rotativos em fábricas de cimento. Segundo Junior (1993), o carvão pode ser utilizado sem problemas até teores de cinzas entre 35 e 40%, caso se tenha a presença de pelo menos 25% de materiais voláteis em sua composição.

As cinzas presentes no carvão podem ser consideradas como matérias-primas argilosas para fabricação do clínquer, são altamente reativas, fornecendo ao cimento excelentes propriedades de resistência à compressão, às águas agressivas e à impermeabilidade (SILVA, 1994).

O carvão mineral pode ser dividido em quatro principais classes segundo a quantidade de carbono fixo presente em sua composição: linhito, sub-betuminoso, antracito e betuminoso, sendo este último utilizado na indústria cimenteira, misturado ao coque, tendo em vista que o coque possui maior poder calorífico, é mais fácil de moer e possui baixo conteúdo de cinzas (BELATO, 2013).

De acordo com Paula (2009), o carvão contém elementos traços que podem causar maior impacto ao meio ambiente e merecem considerações especiais. Os elementos traços comumente encontrados nas cinzas do carvão são: Cloro, Flúor, Bromo, Iodo, Zinco, Cromo, Níquel, Chumbo, Arsênio, Cádmio, Tálcio e Vanádio.

### 3.4.3. Carvão Vegetal

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, produzindo, segundo o Balanço Energético Nacional (2007), 10,5 milhões de toneladas/ano.

Por ser facilmente desagregado, esse material produz muitos finos de carvão vegetal, devido à sua quebra durante a produção, transporte e manuseio, chegando a 20% em peso do total produzido (CARNEIRO, 2007).

De acordo com Paula (2009), o sistema de peneiramento para o carvão vegetal existente nas usinas gera finos com fração abaixo de 6 mm, denominado moinha. A moinha não tem aplicação industrial nos altos fornos das siderúrgicas. E sendo considerado um subproduto, ela é vendida a terceiros por um preço atrativo. Esses finos possuem praticamente as mesmas vantagens do carvão vegetal em valor energético, constituindo-se em um combustível alternativo interessante para a indústria de cimento.

### 3.4.4. Óleo Combustível

O óleo combustível foi considerado um combustível padrão para o setor durante muitos anos, sendo uma das principais fontes energéticas na fabricação de cimento. Atualmente devido ao seu alto custo é utilizado quase que exclusivamente para dar partida ao forno rotativo. Em 2006, representou apenas 0,7% do consumo total de combustíveis utilizados pela indústria de cimento brasileira (BEN, 2008).

De acordo com Paula (2009), o óleo combustível derivado de petróleo, também chamado óleo combustível pesado ou óleo combustível residual é a parte remanescente da destilação das frações do petróleo, designadas de modo geral como frações pesadas, obtidas em vários processos de refino. A composição bastante complexa dos óleos combustíveis depende não só do petróleo que os originou, como também do tipo de processo e misturas que sofreram nas refinarias, de modo que se podem atender as várias exigências do mercado consumidor numa ampla faixa de viscosidade.

A especificação básica para os óleos combustíveis são a viscosidade, o ponto de fluidez e o teor de enxofre. A indústria de cimento optou por tipos mais viscosos e baratos (PAULA, 2009).

#### 3.4.5. Energia Elétrica

O custo da energia elétrica numa cimenteira representa 10,8% do custo total da produção de cimento (BUGALHO, 1998).

O consumo de energia elétrica para movimentação mecânica dos equipamentos de uma fábrica de cimento é de aproximadamente 90 a 120 kWh/t cimento. A maior parte deste consumo é para moagem final do cimento que pode variar entre 16,5 a 63,5 kWh/t com um valor médio de 36 kWh/t de cimento (CEMBUREAU, 1999).

Há vários fatores que afetam o consumo de energia elétrica no processo de moagem, entre eles a dureza do clínquer maior que a normal, a granulometria final de cimento, o tipo e eficiência dos moinhos e os percentuais de aditivos ativos permitidos por normas para cada tipo de Cimento Portland (PAULA, 2009).

#### 3.4.6. Combustíveis Alternativos

Os combustíveis alternativos utilizados na indústria de cimento em sua maior parte são derivados de resíduos industriais e agrícolas dos quais uma grande parte podem ser co-processados nos fornos rotativos de produção de clínquer. Geralmente os resíduos que apresentam poder calorífico inferior (PCI) maior que 11.300 kJ /kg (base seca), podem ser utilizados como alternativa energética para o processo de produção de cimento (PAULA, 2009).

O emprego de resíduos como combustíveis alternativos complementares na indústria de cimento é visto como um ganho ambiental e uma forma viável de reduzir o custo de produção do cimento. O seu uso permite a redução do consumo de combustíveis fósseis, conserva os recursos naturais e fornece uma maneira ambientalmente sadia para o seu tratamento, ajudando a diminuir o passivo ambiental existente. A indústria cimenteira é incentivada a processá-los, pois ao invés de pagar

pelo seu suprimento, ela passa a ter uma receita extra pela destinação final desses resíduos (PAULA, 2009).

#### 3.4.6.1. *Resíduos Proibidos no Coprocessamento em Fornos de Cimentos*

Os tipos de resíduos que não podem ser coprocessados em fornos de cimento são:

- a) Resíduos de serviço de saúde;
- b) Resíduos domiciliares brutos;
- c) Explosivos;
- d) Elementos radioativos;
- e) Agrotóxicos;
- f) Lodo de fossas orgânicas;
- g) Materiais com alto teor de metais pesados;
- h) Materiais com alto teor de Cloro; e
- i) Materiais com baixo poder calorífico ou sem contribuição na substituição de matérias-primas (CONAMA, 1999; VOTORANTIM, 2008).

#### 3.4.6.2. *Resíduos que podem ser Co-processados em Fornos de Cimentos*

Os tipos de resíduos que podem ser coprocessados em fornos de cimento são:

- a) Substâncias oleosas: óleos hidráulicos, óleos lubrificantes, etc;
- b) Catalisadores usados;

- c) Resinas, colas e látex;
- d) Pneus inservíveis;
- e) Madeiras;
- f) Solventes, Ceras;
- g) Borrachas não cloradas;
- h) Carvão Ativado usado como Filtro;
- i) Borrás de Tintas;
- j) Borrás Ácidas;
- k) Resinas Fenólicas e Acrílicas;
- l) Elementos Filtrantes de Filtros de Óleo;
- m) Lodos de estação de tratamento de esgoto – ETE; e
- n) Papel, entre outros (VOTORANTIM, 2008).

Esses resíduos podem ser alimentados nos fornos separadamente, ou em forma de *blends*, que são misturas de vários resíduos preparadas em unidades específicas para esse fim, popularmente conhecidas como blendeiras.

Segundo levantamento realizado pela FEAM (2016), dentre os resíduos consumidos pelo setor de coprocessamento no Estado de Minas Gerais, os *blends* (composição heterogênea de resíduos perigosos e não perigosos) são os mais utilizados, correspondendo a 48% do total, seguido dos pneumáticos (pneus e derivados de borracha) que representam 29% e os resíduos oleosos (tortas, borras, lodo e misturas oleosas) com 12%.

Os pneus usados quando atingem o fim da sua vida útil, ficam impróprios para uso e não podem ser mais restaurados, tornando-se inservíveis. Eles possuem alto poder calorífico, em torno de 33 MJ/kg, superior à maioria dos carvões que têm em média 27 MJ/kg, além disso apresentam teor de cinzas inferior a maior parte dos tipos de carvão, e menos enxofre do que o carvão betuminoso (PAULA, 2009).



Os pneus inservíveis têm sido utilizados como fonte alternativa de combustível na produção de clínquer de cimento Portland em vários países (PAULA, 2009). No Brasil, o coprocessamento de pneus na fabricação do cimento ganhou força a partir de 2002, quando entrou em vigor a resolução CONAMA 258 – aprovada em 26/08/99, que exige dos fabricantes e importadores de pneus a coleta e destinação adequada dos pneus inservíveis.

### **3.5. Atividade de Coprocessamento**

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

As indústrias de cimento podem receber os resíduos diretamente dos geradores ou, quando necessário, por meio de empresas qualificadas para adequação de parâmetros químicos ou físicos (blendeiras), ou empresas de soluções ambientais que intermediam as negociações, com o objetivo de tratar os resíduos em conformidade com a necessidade das indústrias cimenteiras, trazendo agilidade, segurança e qualidade à operacionalização do coprocessamento (SOUSA, 2013).

De acordo com Belato (2013), os combustíveis fósseis vêm sendo substituídos com sucesso por diferentes tipos de resíduos industriais e passivos ambientais desde o início dos anos 70 pela Europa, Japão, EUA, Canadá e Austrália. A proporção do uso de combustíveis alternativos pela indústria do cimento Portland varia muito dependendo da região e do país.

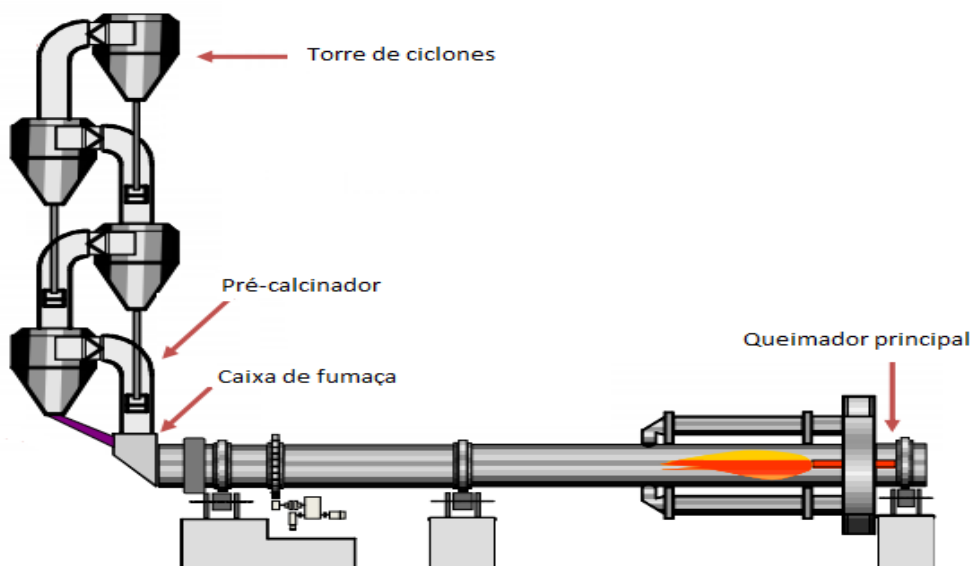
Segundo dados de 2006 da Cement Sustainability Initiative, os países da Europa substituem em 20% os combustíveis convencionais por alternativos. Enquanto a América do Norte, o Japão, a Austrália e a Nova Zelândia apresentam uma taxa média de 11% de substituição, os países da América Latina têm uma taxa de 10%. A Ásia apresentou a menor porcentagem, com apenas 6% de uso de combustíveis alternativos (WBCSD, 2009).

No Brasil, a indústria cimenteira tem usado numerosos sub-produtos industriais como aditivos desde 1952, destacando-se a utilização da escória granulada de altos-fornos, as cinzas volantes de usinas termelétricas e o gesso. Na década de 70 iniciou-se também o uso de combustíveis alternativos como palha de arroz, casca de coco babaçu, moinha de carvão vegetal, pneus e carvão com alto teor de cinzas. A crise do petróleo nos anos 70 e 80, trouxe inúmeros ensinamentos para o setor a partir da substituição de óleo combustível por carvão nacional de baixa qualidade e outros materiais energéticos alternativos (MARCIANO, KIHARA e ESPER, 1996).

Em geral, pesquisas indicam que o coprocessamento oferece como vantagens a eliminação térmica de resíduos perigosos e passivos ambientais e a diminuição do consumo de combustíveis derivados do petróleo.

Do ponto de vista tecnológico, o coprocessamento consiste na alimentação ou injeção dos resíduos no sistema-forno de clínquer, em diferentes pontos (Figura 2). O modo e o local de alimentação dos resíduos têm influência nas emissões atmosféricas (EUROPEAN UNION, 2013).

FIGURA 2- Pontos de alimentação de resíduos para coprocessamento



Fonte: Adaptado de Votorantim, 2009.

De acordo com a Feam (2010), o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer se apresenta como uma tecnologia viável para a destinação final dos resíduos sólidos, considerando as especificidades do processo de fabricação de cimento, tais como elevadas temperaturas do forno, tempo de residência dos materiais e dos gases, turbulência no interior no forno, dentre outros fatores que possibilitam uma destruição segura de grandes volumes de resíduos. O coprocessamento de resíduos deve respeitar as características do clínquer a fim de não alterar a qualidade do produto final, o cimento.

Além de vantagens econômicas como a redução dos custos de produção, a utilização de resíduos como combustíveis apresenta diversas vantagens ambientais, tais como redução do consumo de combustíveis fósseis e da emissão de CO<sub>2</sub>; aproveitamento de resíduos que poderiam ser destinados a aterros ou ter disposições finais inadequadas; aproveitamento do potencial energético dos resíduos; ausência de cinzas no processo de coprocessamento e a consequente minimização dos impactos associados à sua disposição em aterros (FEAM, 2016).

Segundo Santi (2003), os argumentos técnicos a favor do emprego de resíduos como combustíveis alternativos em fornos de clínquer são:

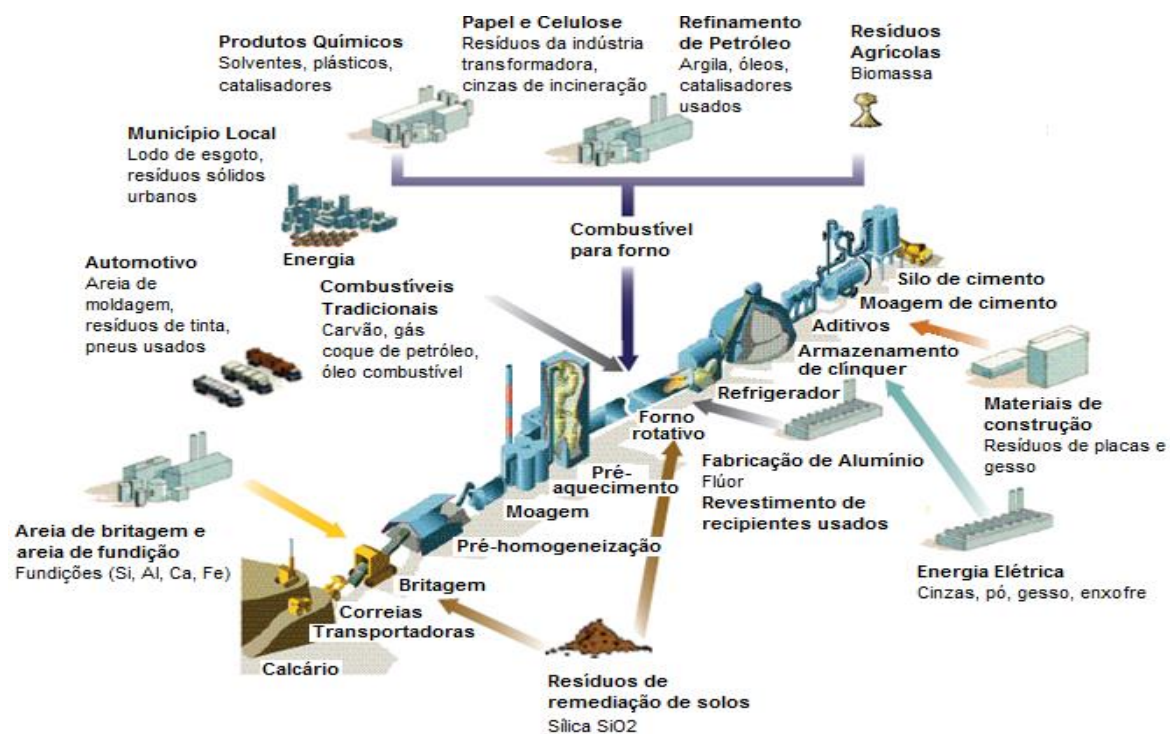
- a) Características térmicas da combustão dos fornos: temperaturas de processo maiores que 1450°C;
- b) Tempo de residência de cerca de 30 minutos para os materiais sólidos e 3 segundos para os gases;
- c) Condições de oxigenação adequadas;
- d) Turbulência elevada;
- e) Ambiente alcalino;
- f) Interação dos gases de combustão com a matéria-prima (*farinha*);
- g) Elevada capacidade de alimentação de resíduos;
- h) Equipamentos de despoeiramento de alta eficiência; e
- i) Preços competitivos, quando comparados aos praticados pelas incineradoras.

Uma das maiores preocupações da realização do coprocessamento de resíduos, refere-se às suas emissões atmosféricas. A indústria de cimento já possui elevado potencial poluidor associado a esse aspecto ambiental, que pode ser potencializado ao realizar o coprocessamento de determinados resíduos (FEAM 2010).

Entre os principais parâmetros que devem ser tratados com atenção, destacam-se o material particulado, dióxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, além de metais tóxicos como mercúrio, chumbo, cádmio, arsênio, antimônio e cromo, os produtos de combustão incompleta, os ácidos halogenados e as dioxinas e furanos (USA, 1991).

A possibilidade de utilização de diversos tipos de resíduos em fornos de clínquer é extremamente ampla, variando de resíduos inertes a resíduos perigosos (FEAM, 2010). A Figura 3 exemplifica vários resíduos com potencial de uso, bem como suas atividades geradoras.

FIGURA 3- Exemplos de alimentação de combustíveis e matérias-primas alternativas



Fonte: Adaptado de WBCSD, 2014.

### 3.6. Poluentes gerados pela prática do coprocessamento

De acordo com Rocha et al. (2011), resíduos classificados como perigosos contêm metais pesados e durante o coprocessamento desses resíduos, os metais pesados são redistribuídos, sendo os mais voláteis (como Hg e Tl) emitidos juntamente com os gases pela chaminé principal do forno, e os semivoláteis (Cd, Pb, Sb e Se) e não voláteis (As, Cr, Cu, Ni) normalmente incorporados ao clínquer (MILANEZ, 2007 apud ROCHA et al, 2011). Devido, principalmente, a essas propriedades, os fornos de clínquer são considerados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos uma das maiores fontes de poluentes atmosféricos perigosos.

Além da emissão de metais pesados, o coprocessamento também é fonte potencial de geração de diversos outros poluentes, como material particulado (MP), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), compostos orgânicos voláteis (COV), gases ácidos e micro poluentes orgânicos (FEAM, 2010).

A descrição dos poluentes, bem como os seus efeitos no meio ambiente e na saúde humana serão abordados nos itens a seguir.

#### 3.6.1. Material Particulado (MP)

O termo “Material Particulado” inclui emissões de poeiras espessas, finas, fuligem, partículas e aerossóis. As emissões de material particulado dos fornos de cimento têm sido reduzidas dramaticamente nas últimas duas e três décadas devido ao aperfeiçoamento em design e operação, incluindo o aumento do uso de modernos equipamentos. Entretanto, as emissões de material particulado em fornos mal equipados ou mal operados podem ser altas e contabilizadas em alguns países como acima de 40% do total de emissões industriais de materiais particulados (WBCSB, 2012).

O tamanho do material particulado varia de 0,001 a 500  $\mu\text{m}$ , sendo que a maior parte desse material apresenta diâmetro entre 0,1 e 10  $\mu\text{m}$ . Partículas com diâmetro

de 10  $\mu\text{m}$  ou menos são denominadas PM10, e consistem de uma fração "fina" (partículas com diâmetro 2,5  $\mu\text{m}$  ou menos) e de uma fração "grosseira" (partículas com diâmetro entre 2,5 e 10  $\mu\text{m}$ ). As partículas com diâmetro inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  são chamadas PM2,5, e são hábeis em penetrar nas regiões mais profundas do trato respiratório, podendo ser absorvidas nos alvéolos pulmonares. Cerca de 1% do PM10 é respirável (pode penetrar até áreas pulmonares em que ocorre as trocas gasosas), enquanto que 80% do PM2,5 é respirável (USEPA, 1996).

As partículas inaláveis (diâmetros inferiores a 10  $\mu\text{m}$ ) provocam inúmeras reações no ser humano, que vão desde irritação das mucosas, aparecimento de processo alérgico, aumento de incidência de doenças respiratórias, alterações mutagênicas e falência de órgãos (BARONCELLI, 2009).

Além de danos à saúde humana, a emissão de MP aumenta as taxas de reação na atmosfera e reduzem a visibilidade, interferindo nos níveis de radiação solar que chegam ao solo, alterando sua temperatura e influenciando no crescimento das plantas (BELATO, 2013).

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

Segundo Cónsul et al. (2004), os óxidos de nitrogênio (denominados NO<sub>x</sub>), são o óxido nítrico (NO), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Dentre os NO<sub>x</sub>, o NO e o NO<sub>2</sub> são os componentes de nitrogênio mais emitidos nos processos de combustão. Destes, mais de 95% das emissões estão sob a forma de NO. No entanto, uma vez lançado na atmosfera, o NO rapidamente se transforma em NO<sub>2</sub> e as taxas de emissão mássica de NO<sub>x</sub> são sempre calculadas, considerando seus dois compostos, como exclusivamente NO<sub>2</sub>.

Na indústria cimenteira, o NO<sub>x</sub> é formado pela reação do nitrogênio atmosférico e dos combustíveis com o oxigênio a altas temperaturas de operação nas câmaras de combustão. Os tempos de residência nos fornos e os tipos de queimadores também têm influência na quantidade de NO<sub>x</sub> emitida para a atmosfera (WOOD, 1994).

As emissões de NO<sub>x</sub> nos sistemas de combustão resultam de três principais mecanismos: NO térmico, NO do combustível e NO imediato. Nos fornos rotativos da

indústria de cimento, o NO térmico e NO do combustível são os mecanismos mais relevantes, sendo o NO térmico a principal rota do mecanismo de formação das emissões de NO<sub>x</sub>, devido às altas temperaturas envolvidas na queima ou nas etapas de formação do clínquer, juntamente com a atmosfera oxidante no forno (WOOD, 1994).

Os fatores determinantes para a formação de NO<sub>x</sub> térmico em forno rotativo de produção de clínquer são: estabilidade da temperatura; estabilidade da taxa de alimentação; a queimabilidade da mistura crua; a temperatura adiabática de chama; o formato da chama; a taxa de excesso de ar; os tempos de retenção do material e dos gases na zona de queima; e o controle dos álcalis e do enxofre (MANTEGAZZA, 2004).

De acordo com Júnior e Lacava (2003), os óxidos de nitrogênio, uma vez lançados na atmosfera, ao entrarem em contato com o vapor d'água, formam o ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) que, em conjunto com o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> formado a partir da emissão de SO<sub>2</sub> durante a queima de combustíveis com teores de enxofre, representam os principais constituintes da chuva ácida. Conseqüentemente, ocorre um aumento na acidez do solo e das águas e diversos danos são causados aos animais, aos vegetais e ao ser humano.

Além da chuva ácida, a ação de raios ultravioleta (UV) de origem solar sobre o NO<sub>2</sub> liberado no meio ambiente ocasiona transformações fotoquímicas que levam à formação do ozônio (O<sub>3</sub>) no nível do solo. Juntamente com esse composto, o NO<sub>x</sub>, os compostos orgânicos voláteis, o SO<sub>2</sub>, os aerossóis e os materiais particulados formam o smog fotoquímico (névoa marrom-amarelada que aparece primariamente sobre áreas urbanas em dias ensolarados). Além de limitar a visibilidade nas grandes cidades, em quantidade excessiva o smog ameaça as pessoas, os animais e as plantas. No ser humano, por exemplo, esse fenômeno provoca irritação nos olhos e nas vias respiratórias (JUNIOR e LACAVA, 2003).

A presença do ozônio na troposfera (nível do solo) tem conseqüências completamente diferentes da sua presença na estratosfera, pois esse composto representa um risco para a saúde humana. De acordo com a CETESB (1997), a

presença desses oxidantes fotoquímicos na atmosfera tem sido associada à redução da capacidade pulmonar e ao agravamento de doenças respiratórias, como a asma.

Um efeito específico do  $O_3$  é a quebra das ligações  $C=C$  existentes nos compostos orgânicos. Em altas concentrações do poluente, os tecidos humanos, vegetais e animais são totalmente destruídos. Nas plantas seu efeito pode ser detectado pela coloração prateada. O mesmo efeito também pode ser observado em borrachas e plásticos, que tornam-se ressecados e quebradiços.

De acordo com Lopes (1995), o  $NO_x$  e o  $O_3$  provocam edemas pulmonares, uma vez que, ambos sendo solúveis em gordura, são capazes de penetrar profundamente nos alvéolos, provocar a desnaturação de proteínas e tornar as paredes dos alvéolos e dos capilares porosas. Assim, os pulmões vão acumulando lentamente um líquido espumoso. O estágio final do edema é a morte por asfixia.

Dentro das células humanas, os óxidos de nitrogênio podem formar o íon nitrito,  $NO_2^-$ , que recebem o oxigênio da hemoglobina e formam o  $NO_3^-$ . O íon  $Fe^{2+}$  da hemoglobina é oxidado a  $Fe^{3+}$  e através dessa oxidação, o ferro da hemoglobina perde sua capacidade de ligar-se reversivelmente ao  $O_2$ . Esse fenômeno, chamado de metaemoglobina ou cianose, característico pela coloração azulada dos lábios, pode ser letal e afeta, sobretudo, as crianças (TAMAROZZI et al 2006).

Uma concentração elevada de  $NO$  pode, também, provocar danos irreversíveis ao tecido foliar nos vegetais. O  $NO_x$  e o  $O_3$  diminuem a permeabilidade das membranas celulares, destroem a clorofila e a carotenoide, e conseqüentemente diminuem a capacidade fotossintética. Além disso, esses compostos bloqueiam a troca gasosa das folhas (JÚNIOR e LACAVA, 2003).

### 3.6.3. Óxidos de Enxofre ( $SO_x$ )

Devido à crescente preocupação com a não agressão ao meio ambiente, o estudo sobre as emissões de óxidos de enxofre ( $SO_x$ ) nos fornos rotativos da indústria de cimento tem ganho maior importância, principalmente devido a atual tendência de se utilizar combustíveis com baixo conteúdo calorífico e altos teores de enxofre (SIGNORETTI, 2008).



Os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) englobam uma série de óxidos, entre eles o SO,  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , sendo que 99% de suas emissões estão sob a forma de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). As principais fontes de enxofre na indústria de cimento são os sulfatos e sulfetos, presentes na composição da farinha e nos combustíveis (WBCSB, 2012).

A formação dos óxidos de enxofre varia consideravelmente dependendo da temperatura, do nível de excesso de oxigênio, do nível de álcalis, do nível de cloro e da presença de monóxido de carbono e de outros elementos menores durante a combustão (BELATO, 2013).

Durante o processo de fabricação do clínquer, 50% a 90% do enxofre é absorvido, sendo incorporado ao clínquer ou emitido na forma de material particulado. Há ainda uma parte do enxofre que é retido no sistema na forma de incrustações ou como parte do ciclo volátil. Já durante a combustão, praticamente todo o enxofre proveniente dos combustíveis é oxidado a  $\text{SO}_2$  (SIGNORETTI, 2008 apud BELATO, 2013).

O  $\text{SO}_2$  em concentrações acima de 0,5 ppm causa desconforto pelo seu odor irritante. A exposição continuada a concentrações entre 0,03 e 0,11 ppm, ou 80 a 275  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  médios a cada 24 horas provocam disfunções respiratórias. Teores de 0,20 a 0,40 ppm podem levar a morte quando a exposição é persistente (RAMOS, 1997).

Segundo Signoretti (2008), uma vez lançado na atmosfera, o  $\text{SO}_2$  é oxidado formando o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) que, além de prejudicar a fauna e a flora, elevam a corrosão de superfícies metálicas. A precipitação ácida no solo causa a sua degradação e minimiza a concentração de nutrientes para as plantas.

#### 3.6.4. Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos são compostos formados exclusivamente por átomos de carbono e de hidrogênio, aos quais se podem juntar átomos de oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) dando origem a diferentes compostos de outros grupos funcionais (CARNEIRO, 2010). Os hidrocarbonetos contemplam os Compostos Orgânicos Voláteis (COV's) ou Carbono Orgânico Total (COT), que são a soma de todas as

substâncias orgânicas contidas no gás de exaustão e que participam de reações fotoquímicas na atmosfera.

Os hidrocarbonetos aromáticos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, também conhecidos por BTEX, fazem parte desses compostos Orgânicos Voláteis (COV'S) e apresentam altos índices de toxicidade. São compostos líquidos voláteis, incolores, com cheiro característico, altamente inflamáveis, apresentam pontos de ebulição relativamente baixos, que vão de 80° a 138° C, evaporando-se rapidamente. São compostos pouco solúveis em água, porém, miscíveis com a maioria dos solventes orgânicos (VIEIRA, 2004).

A exposição aos compostos BTEX, dependendo da concentração e do tempo de exposição, pode causar sérios riscos à saúde que vão desde fadiga, irritação no nariz, olhos e garganta, fraqueza, confusão mental, convulsões até o coma e à morte. O benzeno, é considerado o mais tóxico dos demais por ser potencialmente carcinogênico (MELLO, 2007).

As emissões de hidrocarbonetos ocorrem devido à queima incompleta de combustíveis orgânicos, que ocorre quando há deficiência de oxigênio no processo de combustão, ou quando há uma queda na temperatura de chama. Dessa forma, para que haja uma redução das emissões desses compostos, é necessário que haja excesso de ar durante a queima. Outro fator causador da formação de hidrocarbonetos no processo de combustão é a baixa turbulência dos gases no interior da câmara de combustão e o baixo tempo de residência dos gases de combustão também no interior da câmara (ARAÚJO, 2002 apud MANTEGAZZA, 2004).

A presença de hidrocarbonetos na atmosfera é causadora de “*smog* fotoquímico” em grandes concentrações urbanas, principalmente na presença de NO<sub>x</sub>, o que leva a formação de ozônio.

#### 3.6.5. Dioxinas e Furanos

As dioxinas e furanos são duas classes de compostos orgânicos aromáticos tricíclicos, de função éter, com estrutura quase planar e que possuem propriedades físicas e químicas semelhantes (ASSUNÇÃO & PESQUERO, 1999). São compostos

orgânicos contendo carbono, hidrogênio, oxigênio e cloro e são reconhecidamente tóxicos, com grande potencial nocivo à saúde humana. Entre esses efeitos citam-se lesões dermatológicas, mal-formação de fetos, abortos, câncer e patologias neurológicas e no fígado. (JÚNIOR & GABAÍ).

Essas substâncias químicas tóxicas fazem parte dos Poluentes Orgânicos Persistentes (POP's) e afetam negativamente a saúde humana e o meio ambiente, persistindo por longos períodos de tempo no ambiente e têm como característica a bioacumulação, ou seja, podem acumular e passar de uma espécie a outra por meio da cadeia alimentar.

As dibenzodioxinas policloradas (PCDD) e os dibenzofuranos policlorados (PCDF) são compostos orgânicos aromáticos halogenados, que são subprodutos da combustão abaixo de 400°C e de processos químicos na presença de cloro. Esses compostos químicos persistentes, devido aos graves efeitos sobre a saúde humana e ao meio ambiente, são referenciados como “as substâncias químicas mais tóxicas que a humanidade conhece” (SANTI, 2003).

A formação de dioxinas e furanos está intimamente ligada a presença de cloro nos combustíveis e/ou nas matérias-primas utilizadas na produção de cimento e ocorre principalmente durante o resfriamento de 450°C para 200°C, sendo importante o rápido resfriamento. Os longos tempos de residência aliado as altas temperaturas do forno favorecem a baixa emissão dessas substâncias (EUROPEAN UNION, 2013).

Dessa forma, uma das possíveis alternativas para minimizar a emissão de dioxinas e furanos seria a utilização de combustíveis, resíduos e matérias-primas com ausência de cloro na produção do clínquer.

#### 3.6.6. Ácido Clorídrico (HCl)

O ácido clorídrico é o principal gás ácido gerado no coprocessamento. O fator determinante na formação e emissão deste gás é a presença de cloro nos resíduos. Na presença de hidrogênio, a maior parte do cloro disponível é convertido em HCl, que é um gás incolor, tóxico e corrosivo (FEAM, 2016).

A inalação do gás pode resultar em tosse, queimação ou até sufocamento. Exposições prolongadas ao vapor podem causar descoloração dos dentes. No meio

ambiente, os vapores podem afetar temporariamente a qualidade do ar (BRASINTER, 2014).

### 3.6.7. Ácido Fluorídrico (HF)

O Fluoreto de Hidrogênio (HF) é um gás altamente corrosivo, com efeitos semelhantes ao HCl para o meio ambiente e a saúde humana. Na saúde humana, sua inalação pode causar irritações e queimaduras. Há possibilidade de ocorrer edema pulmonar, danos gerais ao pulmão e até a morte (FAENQUIL, 2003).

Além dos danos à saúde humana, os fluoretos são também fortes agentes fitotóxicos, causando danos nas plantas, através de alterações metabólicas, lesões foliares, redução no crescimento e desenvolvimento, que resultam em prejuízos ao ecossistema como um todo. São tóxicos para os vegetais em concentrações menores que 1 ppb e quando a concentração deste poluente na atmosfera chega a 0,8 g/m<sup>3</sup> ou mesmo 0,2 g/m<sup>3</sup>, lesões já aparecem em espécies sensíveis (NARDI et al, 2004).

### 3.6.8. Metais

As principais preocupações com o uso de matérias-primas secundárias e de combustíveis derivados de resíduos são a incorporação de metais pesados no clínquer e seus efeitos no desempenho do cimento, assim como suas emissões atmosféricas (FEAM, 2016).

De acordo com a Environmental Toxicology Internation (1992), a exposição a altas concentrações de determinados elementos, como os metais, pode resultar em efeitos adversos à saúde. Nos EUA, os dez metais de maior interesse são representados por quatro regulamentados como carcinogênicos (arsênio, berílio, cádmio e cromo) e seis não carcinogênicos (antimônio, bário, chumbo, mercúrio, prata e telúrio). Esses metais tóxicos, podem ficar adsorvidos na superfície do particulado emitido pela chaminé do sistema de despoeiramento e podem ser liberados e entrar em contato com a pele ou tecido do pulmão.

Conforme estabelecido pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (2000), os metais também podem ser classificados conforme seu grau de toxicidade,

sendo a classe I composta dos metais mais tóxicos e a classe III composta dos metais menos tóxicos. A tabela 1 apresenta essa classificação.

Tabela 1 - Classificação dos metais pesados de acordo com seu grau de toxicidade

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

Fonte: (IPCC, 2000)

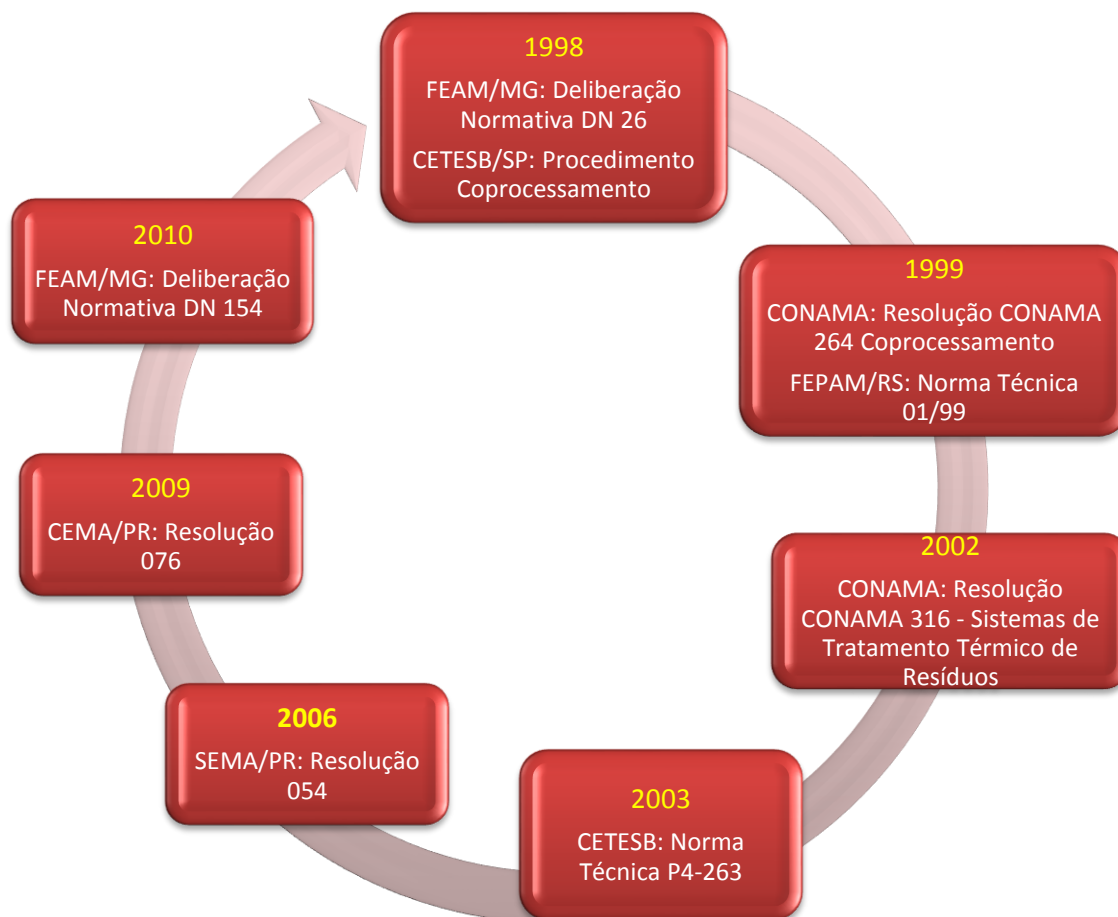
Os metais da classe I merecem maior atenção devido ao seu alto grau de toxicidade. Além disso, o Tl e o Hg são voláteis, tornando seu controle mais complexo. Enquanto o Tl é praticamente todo precipitado com o material particulado, somente uma parte do Hg é coletada no sistema de despoeiramento, sendo o restante emitido na forma de vapor junto com os gases de exaustão. A importância do controle do mercúrio é ressaltada, uma vez que esse metal persiste no meio ambiente e bioacumula na cadeia alimentar, afetando principalmente o sistema nervoso de humanos e animais, bem como apresenta importante função na química da atmosfera e de outros compartimentos ambientais (SIQUEIRA, 2005).

O cádmio também merece destaque por ser um poluente tóxico persistente e bioacumulativo. A inalação de gases contendo Cádmio podem levar à pneumonite e edema pulmonar, além de causar destruição de células epiteliais (SIQUEIRA, 2005).

### **3.7. Legislações aplicáveis ao setor de coprocessamento no Brasil**

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria e a Associação Brasileira de Cimento Portland (2012), o coprocessamento passou a ser regulamentado no Brasil em 1998 e o estado de Minas Gerais foi pioneiro no estabelecimento de procedimentos legais, com a publicação da Deliberação Normativa COPAM nº 26/1998. Em 1999, a atividade passou a ser regulamentada pela Resolução CONAMA Nº 264, de 26 de agosto de 1999, que define procedimentos, critérios e aspectos técnicos de licenciamento ambiental para o coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer. A Figura 4 apresenta o marco regulatório da atividade no país.

FIGURA 4 - Marco regulatório da atividade de coprocessamento no Brasil



Fonte: CNI & ABCP (2012)

Além dessas normatizações, a Deliberação Normativa COPAM nº 187/2013, que estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas no estado de Minas Gerais, também se aplica à atividade no Estado de Minas Gerais.

### 3.7.1. Deliberação Normativa COPAM nº 154/2010

Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa COPAM nº 154/2010 dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Essa legislação modificou a Deliberação Normativa COPAM nº 26/1998 de mesmo título, que entretanto não foi revogada. Ambas as normas devem ser consideradas no estado, sendo a DN COPAM

nº 26/1998 aplicável somente em relação a itens abordados somente por ela. Em caso de abordagem de itens similares, prevalece a DN COPAM nº 154/2010.

A DN nº 154/2010 é uma legislação composta de vinte e um artigos, referentes a conceitos e definições; licenciamento ambiental; conteúdo do PCA (Plano de Controle Ambiental); equivalência de resíduos; monitoramento de emissões atmosféricas; teste de queima; análises do clínquer; padrões de concentração para os resíduos a serem coprocessados; condições de operação dos fornos de clínquer; limitações do uso de resíduos como combustível ou matéria-prima fundente e/ou mineralizador; proibição do coprocessamento de determinados resíduos; e transporte rodoviário dos resíduos. A seguir é feita uma abordagem de cada artigo da legislação.

O artigo 1º apresenta as definições dos conceitos aplicados na deliberação, entre eles o de coprocessamento, que remete à prática de utilização de resíduos para substituição de matérias-primas e/ou aproveitamento energético em fornos de clínquer.

A obrigatoriedade de Licenças Prévia, de Instalação e de Operação, concedidas pelo COPAM, para a utilização do forno de clínquer para coprocessamento de resíduos (sendo pré-requisito ter Licença de Operação para fabricação de cimento e também ter cumprido todas as medidas de controle ambiental estabelecidas na licença) é apresentada no artigo 2º. O artigo também condiciona a atividade de coprocessamento à realização do teste de queima, que servirá de base para que somente sejam coprocessados os resíduos com concentração de elementos igual ou inferior à verificada no teste.

O artigo 3º determina a apresentação de Plano de Controle Ambiental (PCA) na formalização de processos de licença de operação, mencionando como escopo mínimo: declaração de origem e destino dos resíduos; geradores dos resíduos e respectivas Licenças de Operação; descrição sucinta dos processos geradores dos resíduos e fluxogramas simplificado com a indicação dos pontos de geração; resultados dos ensaios de amostra bruta; quantidades geradas e estocadas; descrição do sistema de armazenamento de resíduos na Unidade de Mistura e Pré-condicionamento de Resíduos (UMPCR) e/ou na unidade onde será realizada a

operação de coprocessamento; a taxa de alimentação dos resíduos; as fichas de emergência dos resíduos; metodologia de coprocessamento utilizada com definição dos pontos de alimentação dos resíduos; condições normais de operação do forno de clínquer; plano do teste de queima; estudo de dispersão atmosférica; programa de monitoramento atmosférico e do clínquer; manual de procedimentos, operação, segurança e emergência; e os resultados do teste em branco do forno.

O artigo 4º estabelece que o teste de queima deverá ser acompanhado por técnicos da SUPRAM, sendo a data acordada entre o empreendedor e o órgão ambiental. A deliberação determina que o teste de queima deve ser realizado para novos resíduos a serem coprocessados, no âmbito da Licença de Operação.

A periodicidade trimestral para o automonitoramento das emissões atmosféricas no forno rotativo e monitoramento durante todo o teste de queima com amostragem isocinética é determinada no artigo 5º.

O artigo 6º estabelece periodicidade trimestral para testes de lixiviação do clínquer. Vários componentes, inclusive metais pesados, são incorporados a matriz do clínquer, demonstrando a necessidade de monitoramento desse material, para segurança dos trabalhadores dos empreendimentos e consumidores do cimento.

O encaminhamento dos resultados de auto monitoramento, referentes aos artigos 5º e 6º, ao órgão ambiental com periodicidade trimestral é abordado no artigo 7º, enquanto o artigo 8º estabelece que os resíduos a serem coprocessados em forno de clínquer deverão observar os padrões de concentração de metais e os limites de Poder Calorífico Inferior (PCI) conforme apresentados na Tabela 2.



Tabela 2 - Teores máximos de metais para entrada no forno e PCI mínimo (substituição de combustível)

Parâmetros	Limites
Cádmio (Cd) + Mercúrio (Hg) + Tálho (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; e 1.500 kcal/kg para resíduos sólidos urbanos

Fonte: Adaptada de DN COPAM nº 154/2010.

Um ponto muito importante da DN é abordado no artigo 8º, que insere os teores máximos de metais na entrada do forno, para que haja um controle em suas emissões. O artigo, em seu parágrafo único, também destaca que os laudos de resíduos deverão ser elaborados por laboratório credenciado, observando as Deliberações Normativas do COPAM nº 89/2005, 120/2008 e 140/2009, sendo encaminhado trimestralmente à SUPRAM.

No artigo 9º é definido o monitoramento contínuo dos parâmetros MP, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub> e THC com encaminhamento *on-line* para o órgão ambiental. Além disso, estabelece que os sistemas de alimentação de resíduos deverão estar equipados com intertravamento elétrico que interrompa imediatamente a alimentação dos mesmos quando ocorrer algumas condições específicas, entre elas queda de temperatura, queda do teor de O<sub>2</sub> no sistema e emissões acima do padrão. Em seu parágrafo 1º, informa que 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.

O PCI mínimo de 2000 kcal/kg para o coprocessamento é definido no artigo 10º. Além disso, esse artigo relata que somente os elementos Ca, Si, Al, Fe, F, S, K e Na, presentes nos resíduos, caracterizam substituição de matéria-prima fundente e/ou

mineralizador e a sua utilização só poderá ser realizada quando a concentração desses elementos for superior a 45% em peso, além de respeitar os limites de emissão.

A proibição do coprocessamento de resíduos domiciliares brutos, dos serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins, atendendo ao disposto na Resolução CONAMA 264/99 é apresentada no artigo 11º.

O artigo 12º trata da permissão do coprocessamento dos resíduos domiciliares pré-tratados ou tratados, com PCI mínimo de 1.500 kcal/kg, enquanto o artigo 13º refere-se ao transporte rodoviário de resíduos perigosos Classe I, estabelecendo que deverá ser realizado por empresa transportadora que possua Autorização Ambiental de Funcionamento ou Licença de Operação, regra aplicada para todas as outras atividade no estado.

O artigo 14º estabelece que o "*blend*" (mistura de resíduos) deve atender aos padrões de entrada no forno e limites de emissão e os padrões de emissões atmosféricas são estabelecidos no artigo 15º.

O artigo 16º refere-se aos resíduos equivalentes, novo conceito trazido pela deliberação. Trata-se de resíduos cuja análise de massa bruta demonstre que as concentrações de seus elementos são iguais ou inferiores às listadas na Licença de Operação para coprocessamento conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios para equivalência

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Substituto de combustível</b>	<b>Substituto de matéria-prima</b>
PCI	kcal/kg	> 2.000	-
PCB's	ppm	< 50	< 50
Hg	mg/kg	< 10	-
Somatório Grupo I (Cd + Hg + Tl)		Respeitando o somatório das concentrações listadas na LO	-
Somatório Grupo II (As + Co+Ni+Se+Te)		Respeitando o somatório das concentrações listadas na LO	-
Pb	mg/kg	< 3.000	-
Somatório Grupo III (Cr+Pb+Sb+Sn+V)		Respeitando o somatório das concentrações listadas na LO	-
Cu	mg/kg	Respeitando o somatório das concentrações listadas na LO	-
Zn	mg/kg	Respeitando o somatório das concentrações listadas na LO	-
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%

Fonte: Adaptada de DN COPAM nº 154/2010

Segundo o referido artigo, a taxa de alimentação de resíduos equivalentes, isolada ou conjuntamente, poderá ultrapassar a taxa prevista na LO existente desde que informada e os limites de emissão sejam observados. Também é mencionado que a equivalência será reconhecida por meio de anuência da SUPRAM, sem necessidade de novo Teste de Queima.

A revalidação da LO para coprocessamento do resíduo original deverá contemplar todos os resíduos equivalentes agregados e é estabelecida no artigo 17º e os custos de análise de processos de licenciamento são abordados no artigo 18º.

A alimentação de resíduos para coprocessamento no moinho de carvão/coque poderá ser efetuada após licenciamento dessa unidade para tal fim e para cada resíduo especificamente (artigo 19º).

Excepcionalmente, o coprocessamento poderá ser autorizado para destruição de armas, entorpecentes, medicamentos vencidos e outras solicitações, a critério do COPAM conforme estabelecido no artigo 20º.

O artigo 21º refere-se à publicação da Deliberação Normativa e a revogação de dispositivos contrários, mas não revoga a DN COPAM nº 26/1998.

### 3.7.2. Avaliação dos padrões de emissões atmosféricas DN COPAM nº 154/2010

Conforme estabelecido na DN COPAM nº 154/2010, os empreendimentos em Minas Gerais devem fazer o automonitoramento dos seguintes parâmetros: MP, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, THC, HCl, HF, tolueno, etilbenzeno, xileno, benzeno e metais. A campanha de monitoramento das emissões atmosféricas relativa à Licença de Operação, deve conter, no mínimo, esses parâmetros, com periodicidade trimestral.

Para cada um dos parâmetros, cujo automonitoramento é obrigatório no estado de Minas Gerais, foi realizada uma avaliação do seu padrão de emissão atmosférica, apresentada a seguir.

#### *3.7.2.1. Material Particulado (MP)*

A DN COPAM nº 154/2010 estabelece padrões de emissão de MP de 50 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes novas e 70 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes existentes, ambos corrigidos a 11% de O<sub>2</sub>. Além disso, estabelece que 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 critério do órgão de controle ambiental.

#### *3.7.2.2. Óxido de enxofre (SO<sub>x</sub>)*

A DN COPAM nº 154/2010 estabelece padrão de emissão para SO<sub>x</sub>, medido como SO<sub>2</sub>, corrigido a 11% de O<sub>2</sub>, de 280mg/Nm<sup>3</sup>, mas quando o enxofre for proveniente de matéria-prima, esse valor pode ser mais flexível. Nesse caso, o limite passa a ser de 400 mg/Nm<sup>3</sup> para um teor de até 0,2% de enxofre na matéria-prima,

1.200 mg/Nm<sup>3</sup> para um teor acima de 0,4%, e entre 0,2% e 0,4%, deve-se calcular o padrão de emissão a partir da fórmula apresentada pela equação abaixo.

$$\text{Padrão de Emissão para SO}_x = 400 \text{ mg/Nm}^3 + (\% \text{SO}_3 - 0,2) \times 4.000 \text{ mg/Nm}^3$$

#### 3.7.2.3. Óxido de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

A DN COPAM nº 154/2010 estabelece padrão de emissão de NO<sub>x</sub>, medido como NO<sub>2</sub>, de 450 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes novas e 730 mg/Nm<sup>3</sup> para fontes existentes, corrigido a 11% de O<sub>2</sub>.

#### 3.7.2.4. Ácido Fluorídrico (HF)

A DN COPAM nº 154/2010, estabelece padrão de emissão de 5 mg/Nm<sup>3</sup>, mas sem definir a porcentagem de correção de oxigênio, oferecendo margem para emissões muito superiores em virtude da base utilizada.

#### 3.7.2.5. Ácido Clorídrico (HCl)

A DN COPAM nº 154/2010, estabelece padrão de emissão de 1,8 kg/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos que contenham mais de 0,5% de Cloreto, mas sem definir a porcentagem de correção de oxigênio.

#### 3.7.2.6. Hidrocarbonetos

A medição mais comum desses compostos é na forma de hidrocarbonetos totais (THC). A DN COPAM nº 154/2010, estabelece padrão de emissão para THC de 20 ppmv a 7%, medido como propano. A Deliberação também estabelece padrões específicos para os hidrocarbonetos aromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, baseados na norma TA Luft "Technical Instructions on Air Quality Control" conforme informado na própria deliberação, mas não estabelece padrões de emissão para dioxinas e furanos. O padrão de emissão para a soma do tolueno, etilbenzeno e xileno é de 100 mg/Nm<sup>3</sup> e para o benzeno é estabelecido o padrão de 20 mg/Nm<sup>3</sup>, ambos para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h.

### 3.7.2.7. *Material Particulado Inorgânico*

A DN COPAM nº 154/2010 divide os materiais particulados inorgânicos em três classes de toxicidade: Classe 1 (mais tóxicos e prejudiciais à saúde), composta de Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg), Tálcio (Tl); Classe 2, composta de Arsênio (As), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Selênio (Se), Telúrio (Te); e Classe 3 (menos tóxicos) composta de Antimônio (Sb), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Cianetos, Fluoretos, Cobre (Cu), Manganês (Mn), Platina (Pt), Paládio (Pd), Ródio (Rh), Vanádio (V), Estanho (Sn).

Para cada uma dessas classes há um padrão de emissão correspondente ao somatório de cada um dos seus constituintes. Para o somatório dos metais classe 1, o padrão de emissão é de 0,28 mg/Nm<sup>3</sup> corrigida a 10% de O<sub>2</sub> (para fluxo de massa igual ou maior a 1 g/h). Para o somatório dos metais classe 2, o padrão de emissão é de 1,4 mg/Nm<sup>3</sup> (para fluxo de massa ≥ 5 g/h). E para o somatório dos metais classe 3, o padrão de emissão é de 7 mg/Nm<sup>3</sup> (para fluxo de ≥ 25 g/h).

Além disso, é definido um padrão de emissão para o somatório das classes 1 e 2, 1 e 3, e 2 e 3. Sendo os padrões definidos como de 1,4 mg/Nm<sup>3</sup> para o somatório das classes 1+2, e de 7 mg/Nm<sup>3</sup> para o somatório das classes 1+3 e 2+3. A deliberação não define a porcentagem de correção de oxigênio, oferecendo margem para emissões muito superiores, em virtude da base utilizada.

Destaca-se que ao estabelecer limites de emissão para o somatório entre as classes, conseqüentemente ocorre uma redução dos limites para cada uma das classes, do que quando analisadas separadamente.

A tabela 4 apresenta um resumo dos padrões de emissões atmosféricas para a legislação avaliada.

Tabela 4- Padrões de emissões atmosféricas para coprocessamento em forno rotativo

Parâmetro	DN COPAM nº 154/2010
HCl	1,8 kg/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos com mais de 0,5% de Cloreto
HF	5 mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>x</sub> - medido como SO <sub>2</sub>	280 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> ) Até 0,2% de SO <sub>3</sub> na farinha: 400 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> ) Entre 0,2% e 0,4% de SO <sub>3</sub> na farinha: 400 mg/Nm <sup>3</sup> + (%SO <sub>3</sub> -0,2) x 4000 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> ) Acima de 0,4% de SO <sub>3</sub> na farinha: 1.200 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> )
NO <sub>x</sub> - medido como NO <sub>2</sub>	450 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> ) para fontes novas 730 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> ) para fontes existentes
MP total	50 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> ) para fontes novas 70 mg/Nm <sup>3</sup> (11% O <sub>2</sub> ) para fontes existentes
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
Benzeno	20 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h
Classe 1 Cd, Hg, Tl	0,28 mg/Nm <sup>3</sup> para fluxo de massa ≥ 1 g/h
Classe 2 As, Co, Ni, Se, Te	1,4 mg/Nm <sup>3</sup> para fluxo de massa ≥ 5 g/h
Classe 3 Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, V, Sn, Cianetos, Fluoretos	1,4 mg/Nm <sup>3</sup> para fluxo de massa ≥ 5 g/h
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: Adaptada de DN COPAM nº 154/2010

#### 4. METODOLOGIA

Para a avaliação das emissões atmosféricas do setor de coprocessamento no Estado de Minas Gerais, foram levantadas informações nos arquivos da FEAM, por meio do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM), no qual se tem acesso aos documentos que compõem os processos de licenciamento ambiental. As informações acerca das emissões atmosféricas foram encontradas nos Relatórios de Automonitoramento das cimenteiras que realizam a prática do coprocessamento em Minas Gerais. Os dados foram relativos a 9 empreendimentos. No entanto, como dois desses empreendimentos apresentam 2 fornos de produção de clínquer, o número total de fornos analisados foi 11.

A localização dos fornos analisados (Tabela 5) está representada pelas Superintendências de Regularização Ambiental – SUPRAM's, divisão regional das agências de licenciamento ambiental no estado de Minas Gerais. O mapa contendo a divisão do estado por regionais é apresentada na Figura 5.

Tabela 5- Localização dos fornos analisados

<b>Forno</b>	<b>Regionais SUPRAM's</b>
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: Carvalho (2016)



FIGURA 5- Divisão do Estado de Minas Gerais por Regionais



Fonte: Semad (2016)

Os relatórios de automonitoramento de cada empreendimento, referentes ao ano de 2014, foram pesquisados com o objetivo de obter os valores das concentrações de cada poluente atmosférico proveniente do coprocessamento de resíduos sólidos. Os poluentes atmosféricos analisados foram: material particulado (MP), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), ácido fluorídrico (HF), cloreto de hidrogênio (HCl), hidrocarbonetos, metais e dioxinas e furanos.

Para identificar melhor a origem de formação dos poluentes, foi elaborada a tabela 6 com os dados de operação da atividade de coprocessamento de resíduos nos fornos de produção de clínquer analisados. Porém, os dados de alimentação de combustíveis nos fornos clínquer não foram identificados nos relatórios de amostragem apresentados, sendo, desta forma, informadas as possíveis tipologias de combustíveis utilizadas quando da realização das amostragens.

Tabela 6- Dados de operação da atividade de coprocessamento nos fornos analisados

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

\*Abreviações : PE= Precipitador Eletrostático; FM= Filtro de Manga.

Fonte: Carvalho (2016)

A unidade dos padrões de lançamento para a maioria dos poluentes atmosféricos é definida como mg/Nm<sup>3</sup>. Em todos os relatórios de automonitoramento foi necessário calcular uma média das concentrações dos poluentes, que se apresentavam normalmente, em triplicata. Esses valores eram estabelecidos de acordo com diferentes valores de correção de oxigênio. Dessa forma, de modo a padronizar os valores, em alguns casos foi necessário realizar uma conversão a fim de que todas as concentrações estivessem com uma correção de oxigênio a 11%. A conversão para a concentração do poluente na porcentagem de oxigênio padrão foi realizada de acordo com a equação abaixo:

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

Onde:

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.

Após a elaboração das planilhas dos 9 empreendimentos contendo o resultado médio das concentrações a 11% de O<sub>2</sub> de cada parâmetro, foram elaborados os gráficos referentes às concentrações dos poluentes atmosféricos provenientes dos fornos de clínquer no ano de 2014, verificando se suas concentrações estão de acordo com os padrões de emissões atmosféricas da DN COPAM nº 154/2010 (os padrões de emissão de cada parâmetro foram inseridos nos gráficos). Como as dioxinas e furanos não possuem padrão estabelecido na legislação mineira, foi utilizado o padrão estabelecido na RESOLUÇÃO CONAMA nº 316/2002.

A escala temporal dos gráficos foi estabelecida por meio de 4 períodos (campanhas), nos quais cada campanha corresponde a um trimestre do ano. Como nos relatórios de automonitoramento, os valores são dispostos mensalmente, foi realizada uma média a cada três meses do ano a fim de obter os valores por

“campanha”, totalizando 4 campanhas. Os resultados dos gráficos foram apresentados de 3 em 3 meses a fim de compatibilizar com o monitoramento trimestral das emissões atmosféricas exigido pela DN COPAM 154.

Após a comparação dos resultados com os padrões de emissão estabelecidos na DN COPAM 154, foram apresentadas propostas de melhoria nos sistemas de controle das emissões para os fornos que não atenderam a legislação ambiental.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Resultados de automonitoramento

Os resultados de automonitoramento de cada um dos poluentes atmosféricos com potencial de emissão provenientes do coprocessamento de resíduos sólidos, referentes ao ano de 2014, bem como os limites estabelecidos pela DN COPAM nº 154/2010, são apresentados nos gráficos 1 a 15. Observa-se que, para vários fornos, não foram obtidos resultados para todas as campanhas, referentes a cada trimestre do ano de 2014.

Gráfico 1- Resultados de automonitoramento de MP dos fornos de clínquer

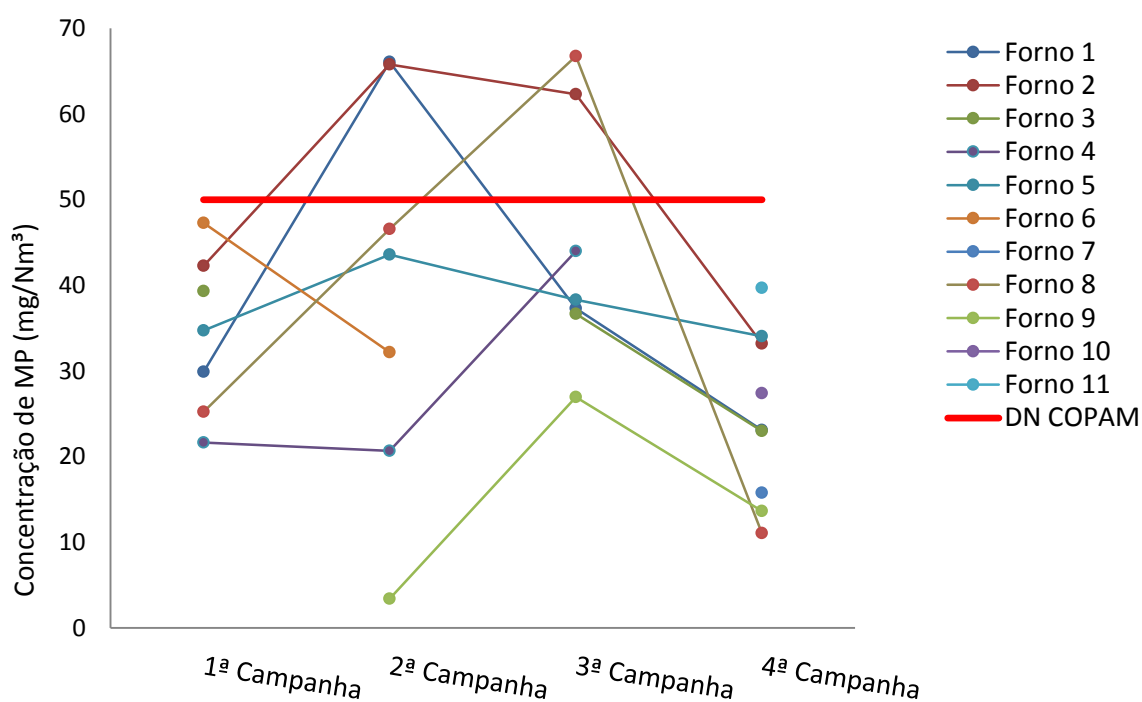


Gráfico 2- Resultados de automonitoramento de SOx dos fornos de clínquer

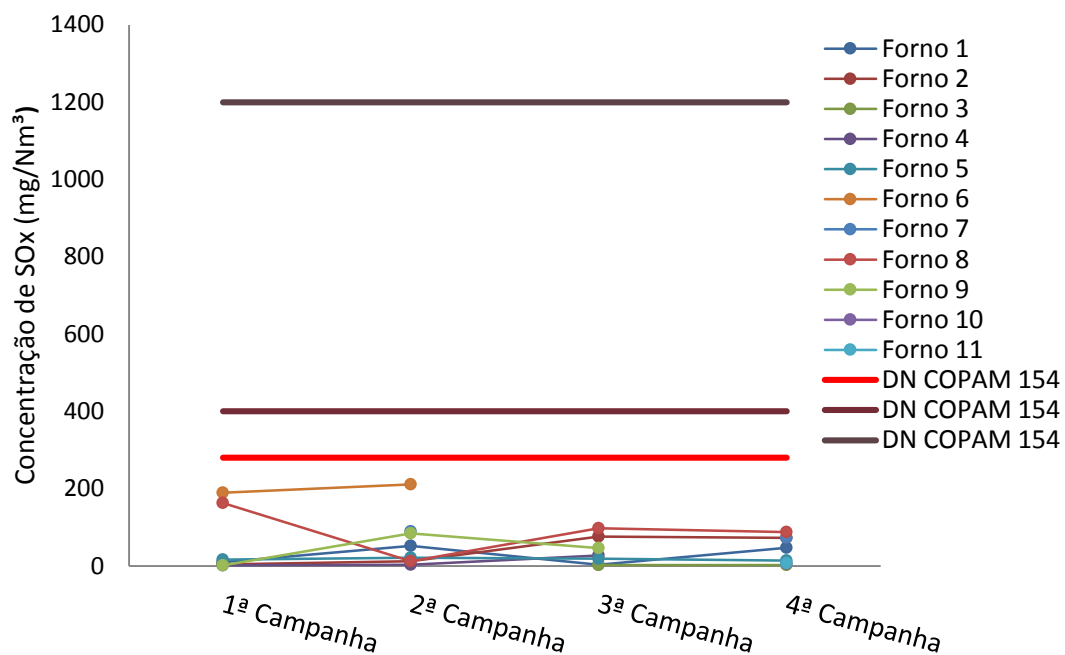
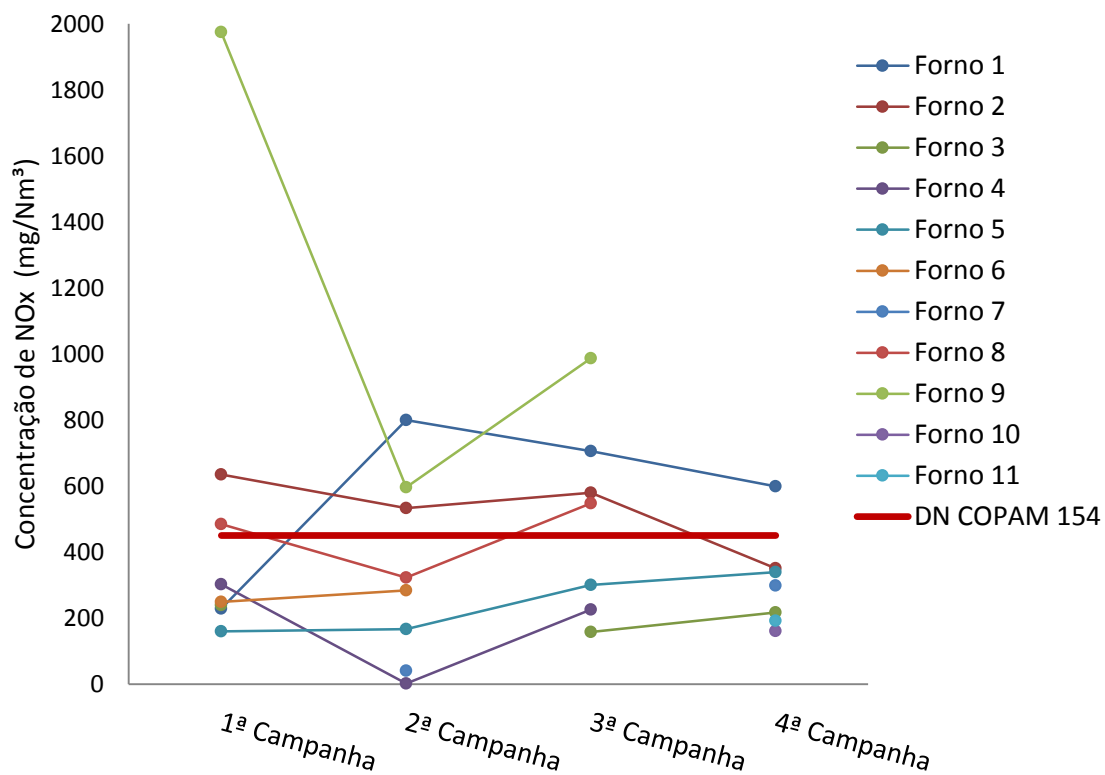


Gráfico 3 - Resultados de automonitoramento de NOx dos fornos de clínquer



O resultados de automonitoramento de SO<sub>x</sub> dos fornos de clínquer, referentes ao ano de 2014 (Gráfico 2), indicaram o atendimento aos limites estabelecidos pela DN COPAM nº 154/2010 de 280 mg/Nm<sup>3</sup>, 400 mg/Nm<sup>3</sup> (para um teor de até 0,2% de enxofre na matéria-prima) e 1.200 mg/Nm<sup>3</sup> (para um teor acima de 0,4%). Já os resultados de automonitoramento de MP e NO<sub>x</sub> dos fornos de clínquer (Gráficos 1 e 3, respectivamente), indicaram vários descumprimentos ao padrão estabelecido na legislação mineira.

Uma emissão de material particulado acima do valor estabelecido na legislação ambiental foi observada também por Maury&Blumenschein (2012), no Distrito Federal, na região da Fercal em Sobradinho, onde se localizavam duas grandes fábricas de cimento. Os pesquisadores observaram, ainda que essas fábricas ocasionavam impacto à saúde das comunidades próximas devido à forte poluição gerada pela emissão de material particulado e problemas respiratórios na população local.

Santos Neto (2012) realizou um estudo para propor um sistema de gestão ambiental em um processo de coprocessamento e observou que a retirada de um dos resíduos do coprocessamento reduziu a emissão de material particulado até que se atingisse o padrão estabelecido na legislação ambiental. Esse resultado indica que o tipo de resíduo coprocessado pode influenciar a emissão de material particulado na fábrica de cimento, devendo os fornos 1, 2 e 8 avaliarem melhor a composição dos seus blends sólidos e líquidos coprocessados. O pesquisador observou, ainda, que a temperatura de entrada dos gases no forno elétrico pode influenciar a emissão de material particulado.

Resultados de pesquisas indicam uma eficiência de destruição de resíduos no coprocessamento 100 mil vezes melhor do que a estabelecida pela legislação ambiental americana, exceto para as emissões de NO<sub>x</sub>. Para diminuir da taxa de emissão de NO<sub>x</sub>, pode-se utilizar RDF (*Refuse derived fuel*) como combustível alternativo, entretanto o uso de combustíveis alternativos pode piorar as emissões de metais pesados, apresentando-se perigosamente fora dos limites estabelecidos pelos órgãos ambientais (ROCHA et al, 2011).

De acordo com as tipologias de combustíveis utilizadas nos fornos 1,2,8 e 9 apresentadas na metodologia, o uso do coque de petróleo nos empreendimentos, pode ter sido a causa de suas emissões de NOx estarem acima do padrão estabelecido, devido ao alto teor de nitrogênio desse tipo de combustível

Gráfico 4- Resultados de automonitoramento de HF dos fornos de clínquer

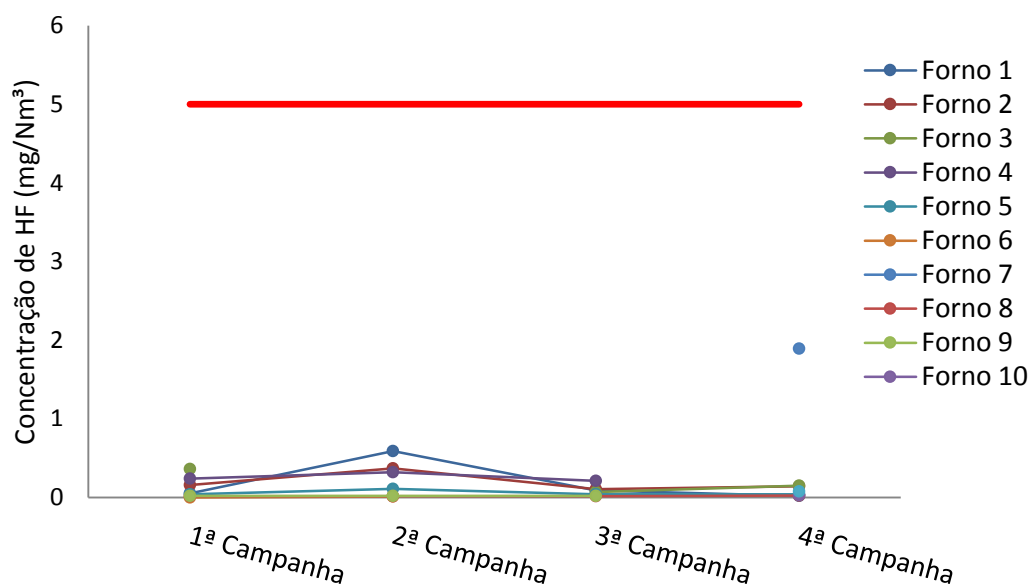


Gráfico 5- Resultados de automonitoramento de HCl dos fornos de clínquer

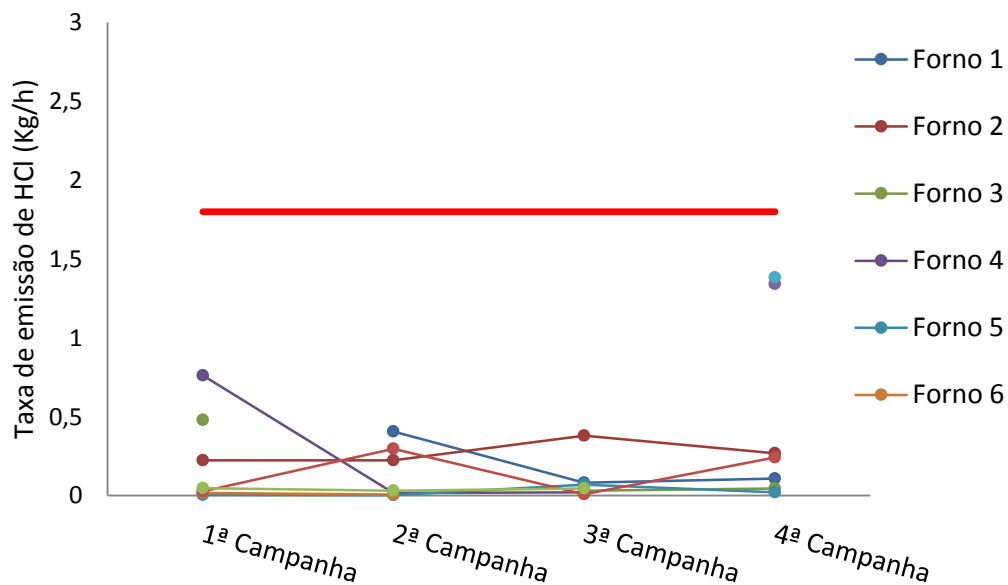
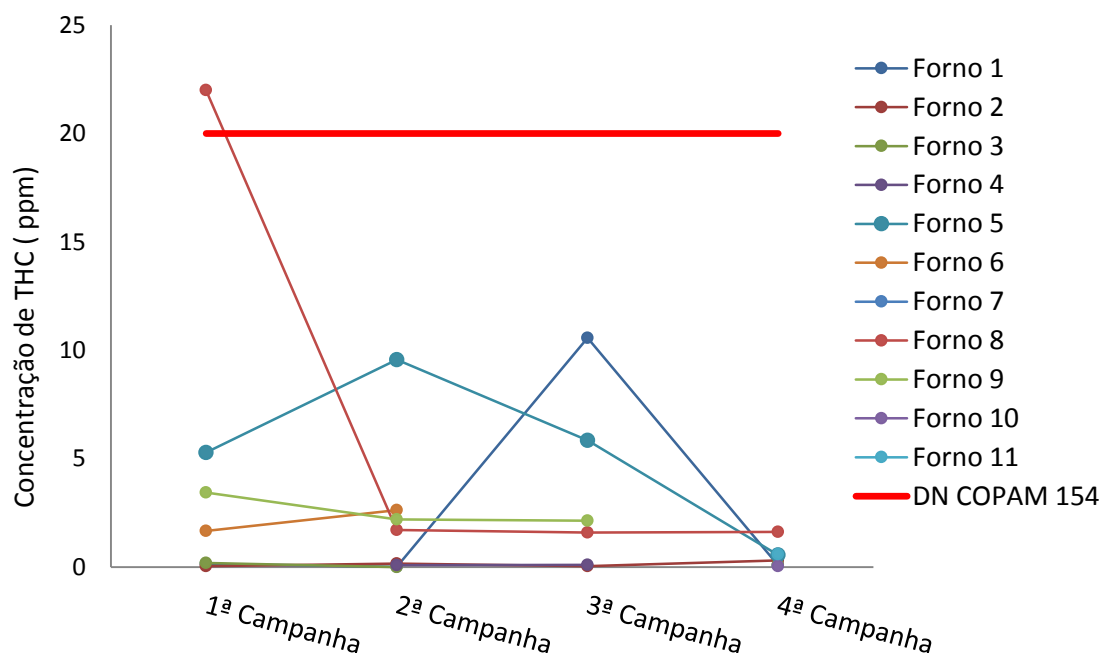




Gráfico 6- Resultados de automonitoramento de THC dos fornos de clínquer



Os resultados de automonitoramento de HF e HCl dos fornos de clínquer, referentes ao ano de 2014 (gráficos 4 e 5) indicaram que todos os resultados atendem aos limites estabelecidos na legislação mineira, enquanto os resultados de automonitoramento de THC dos fornos de clínquer (gráfico 6), indicou apenas um resultado acima do limite estabelecido pela legislação mineira. A emissão de THC acima do padrão estabelecido do forno 8 pode ter ocorrido em um caso de fornecimento de combustível (chip de pneu) não controlado, de uma mistura pouco eficaz com o ar comburente (originando uma deficiência de oxigênio), de uma baixa turbulência dos gases no interior da câmara de combustão e/ou de um baixo tempo de residência dos gases de combustão (ARAÚJO, 2002 apud MANTEGAZZA, 2004).

Os gráficos 7 e 8 apresentam os resultados de automonitoramento do somatório tolueno+etilbenzeno+xileno e do benzeno, respectivamente, dos fornos de clínquer, referentes ao ano de 2014, sendo observado atendimento aos limites estabelecidos na legislação mineira.

Gráfico 7- Resultados de automonitoramento do somatório de tolueno, etilbenzeno e xileno dos fornos de clínquer

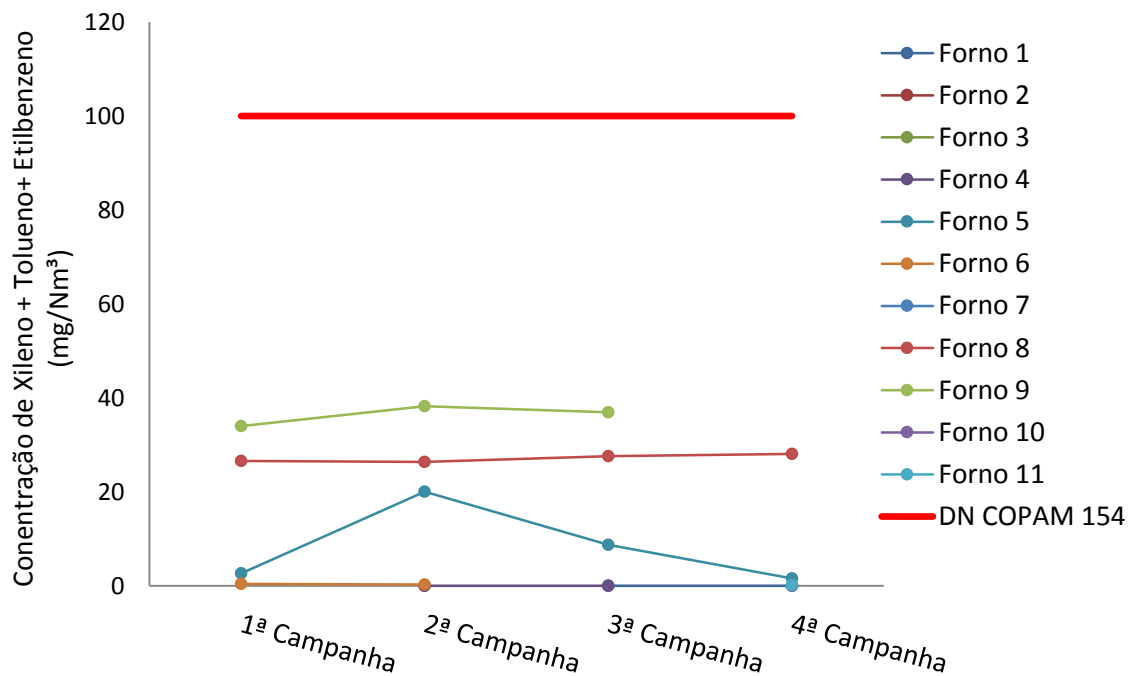


Gráfico 8- Resultados de automonitoramento de benzeno dos fornos de clínquer

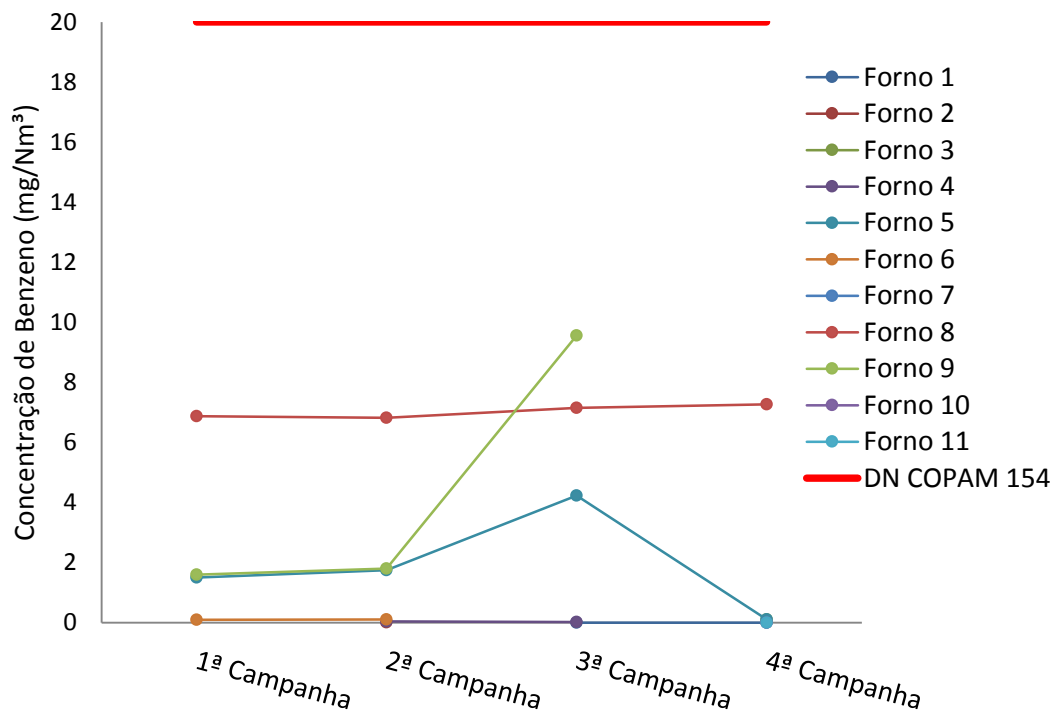


Gráfico 9- Resultados de automonitoramento de metais classe 1 dos fornos de clínquer

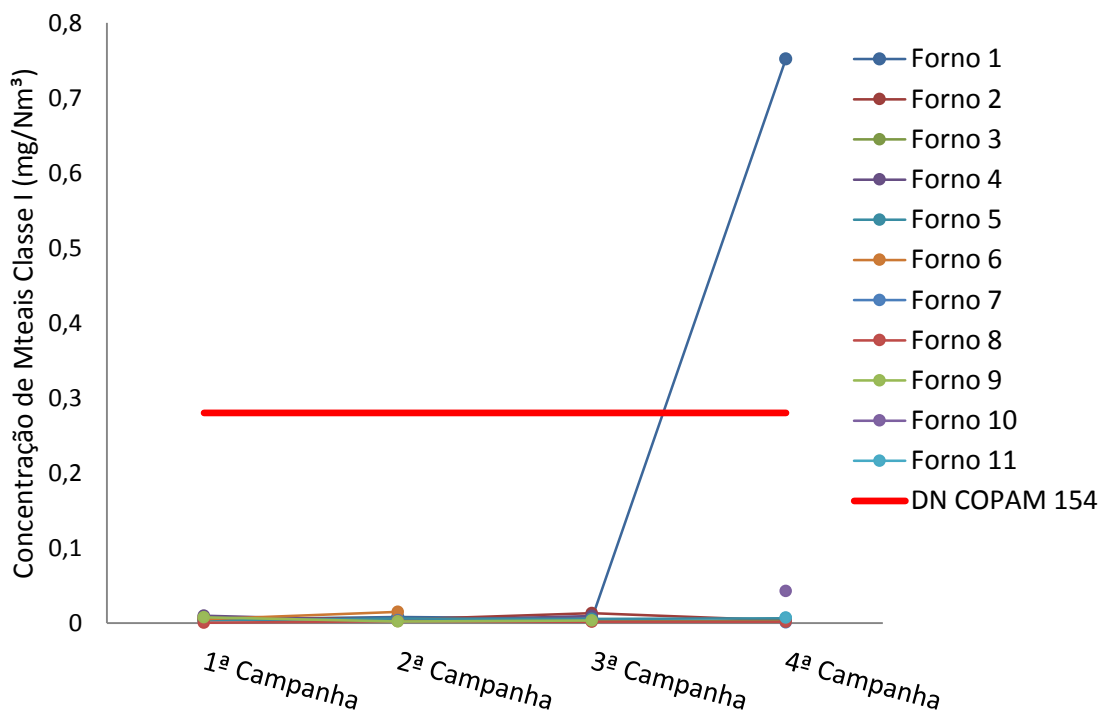


Gráfico 10- Resultados de automonitoramento de metais classe 2 dos fornos de clínquer

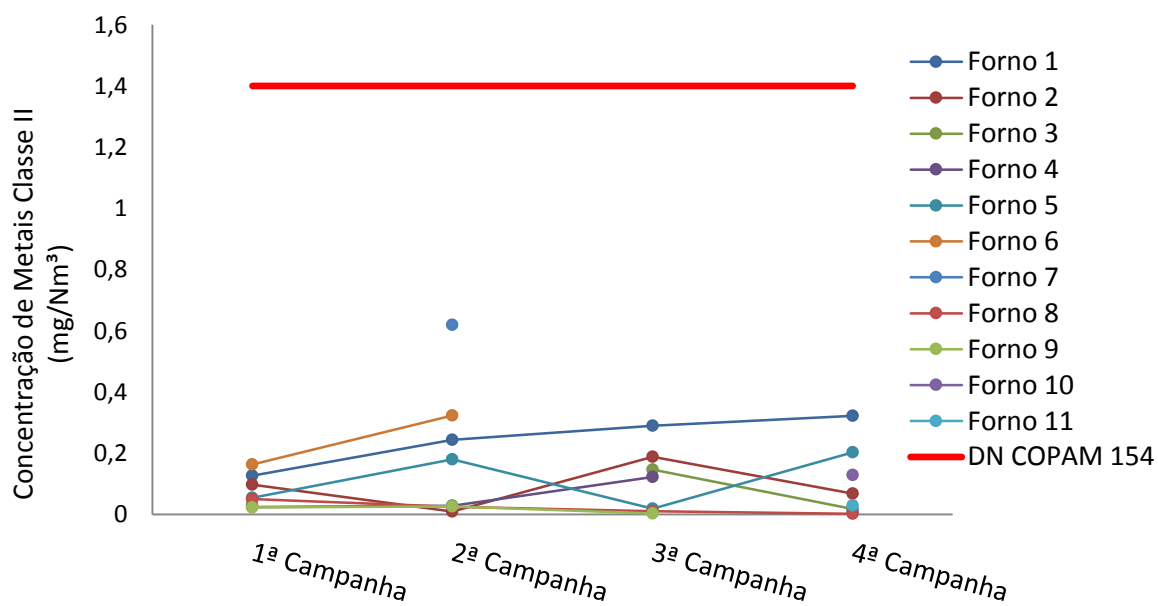
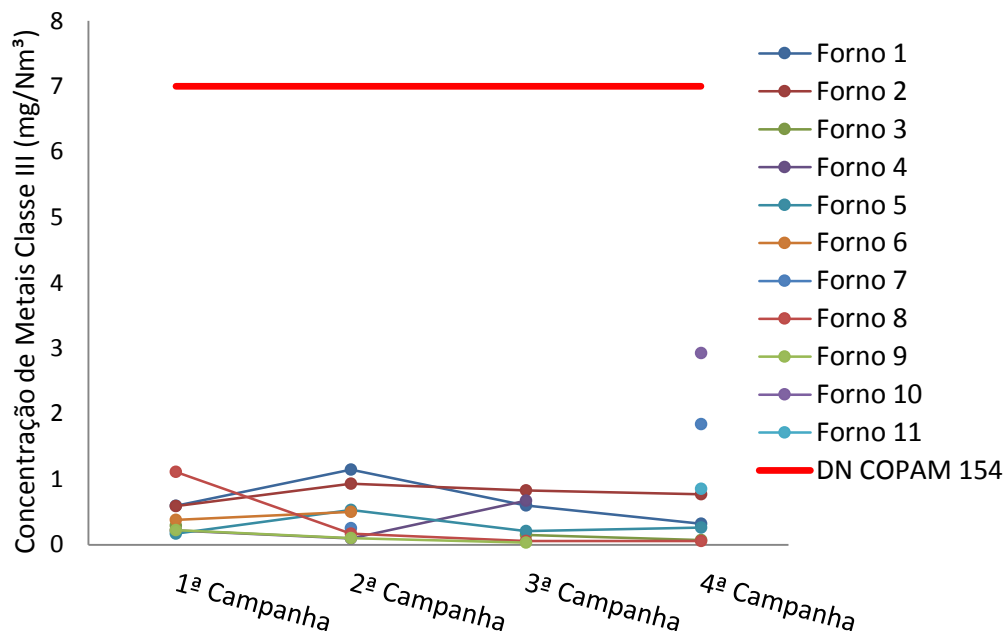


Gráfico 11- Resultados de automonitoramento de metais classe 3 dos fornos de clínquer



Os resultados de automonitoramento para os metais classe 1 referentes ao ano de 2014, indicaram que apenas um valor ultrapassou os limites estabelecidos na legislação mineira. A utilização de blends sólidos e líquidos no forno 1 deve ser mais controlada a fim de evitar a emissão desses poluentes. A utilização de resíduos contendo mercúrio, cádmio ou tálio desse ser evitada nesse forno. Já os resultados de automonitoramento para os metais classe 2 e 3 respectivamente, indicaram apenas valores abaixo dos limites estabelecidos pela DN COPAM nº 154/2010.

Metais classe 1 apresentam um maior risco de emissão nos fornos de cimento e uma maior necessidade de controle ambiental. Durante o coprocessamento de resíduos, os metais mais voláteis (tais como Hg e Tl) são emitidos juntamente com os gases na chaminé do forno, os semivoláteis (Cd, Pb, Sb, e Se) e os não voláteis (As, Cr, Cu, Ni) usualmente são incorporados ao clínquer (ROCHA et al, 2011).

Equipamentos de controles de vapores de sais metálicos são essenciais para que não ocorra sua dispersão na atmosfera (MILANEZ et al, 2009).

Os gráficos 12, 13 e 14 apresentam os resultados de automonitoramento do somatório das classes de metais dos fornos de clínquer, referentes ao ano de 2014, estando todos os valores encontrados abaixo dos limites estabelecidos na deliberação. O gráfico 15 apresenta os resultados para dioxinas e furanos.

Gráfico 12- Resultados de automonitoramento de metais classe 1+2 dos fornos de clínquer

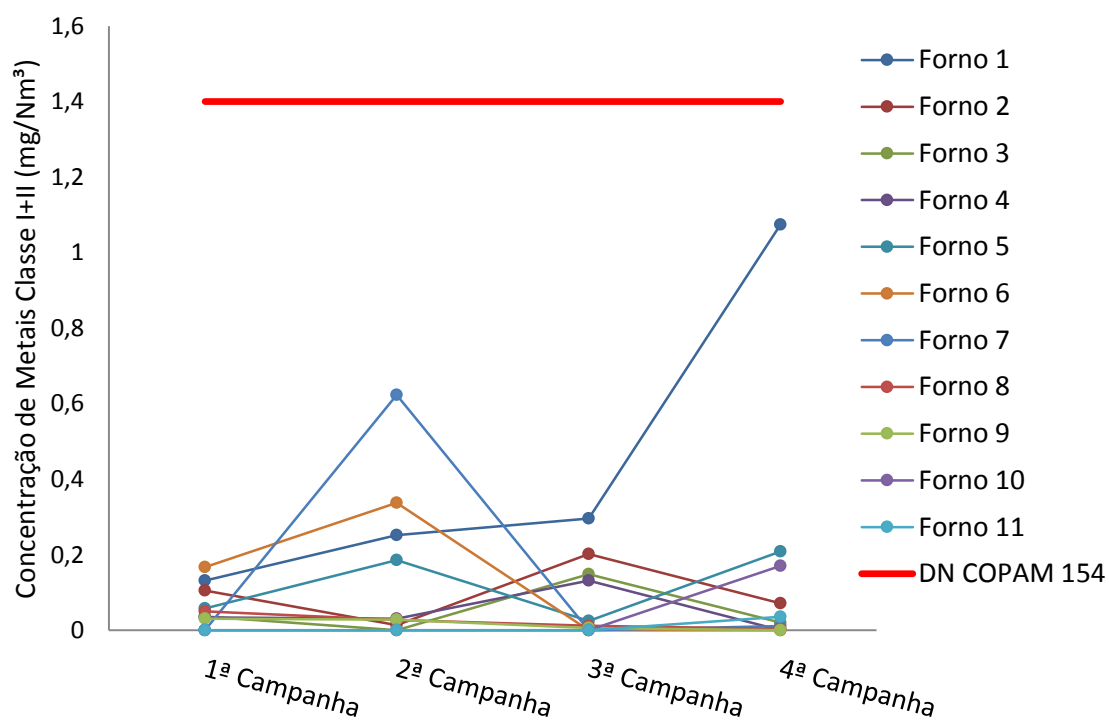


Gráfico 13- Resultados de automonitoramento de metais classe 1+3 dos fornos de clínquer

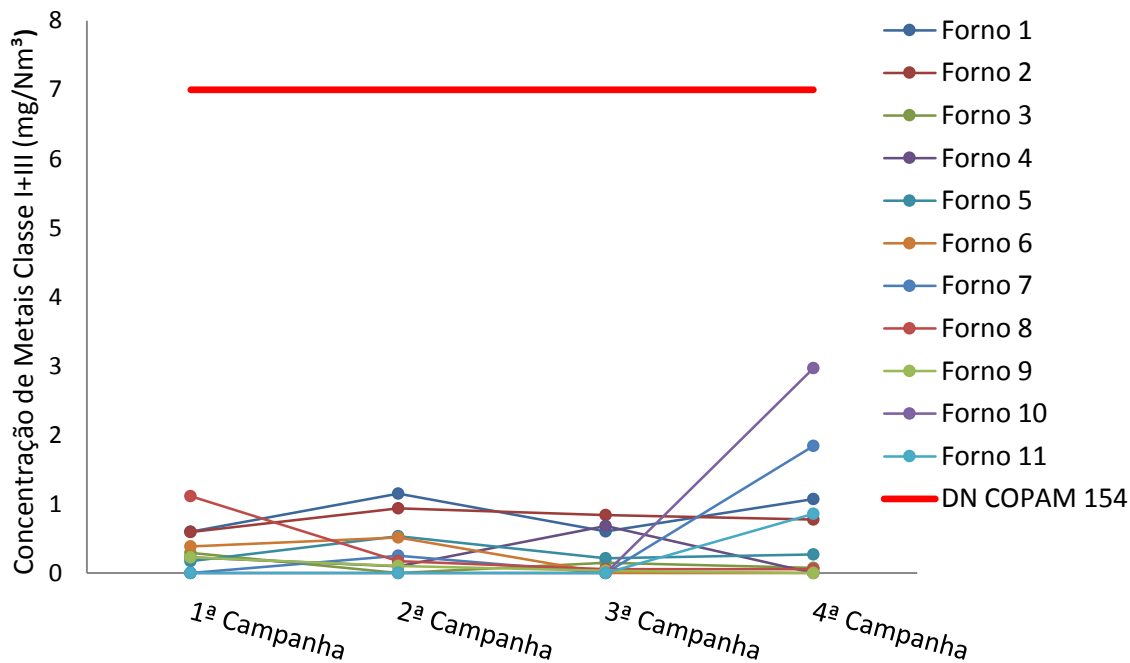


Gráfico 14- Resultados de automonitoramento de metais classe 2+3 dos fornos de clínquer

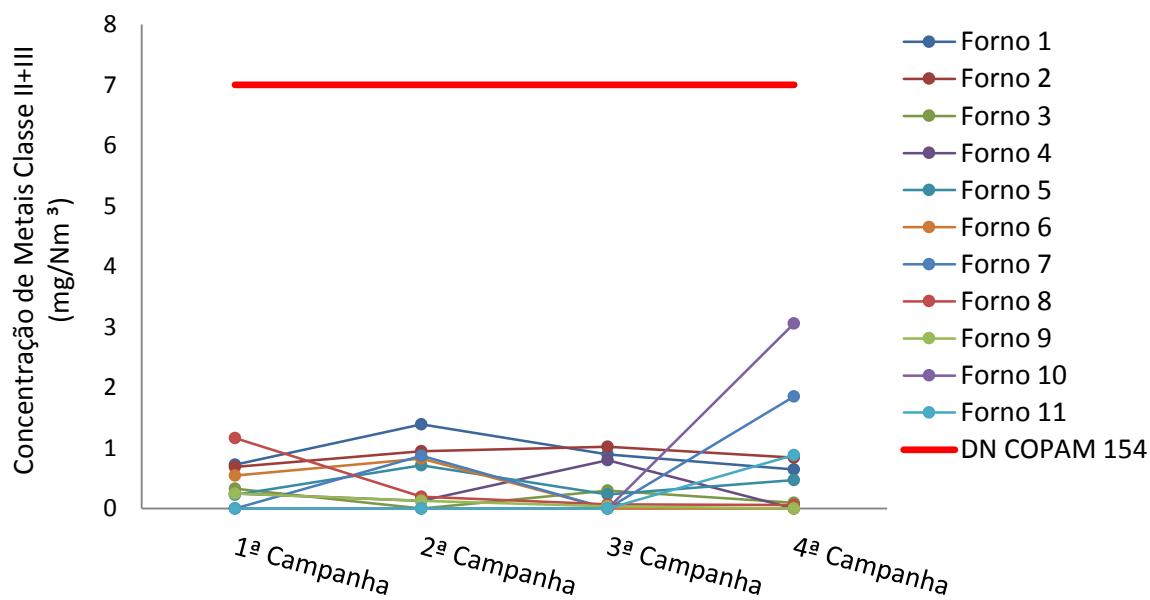
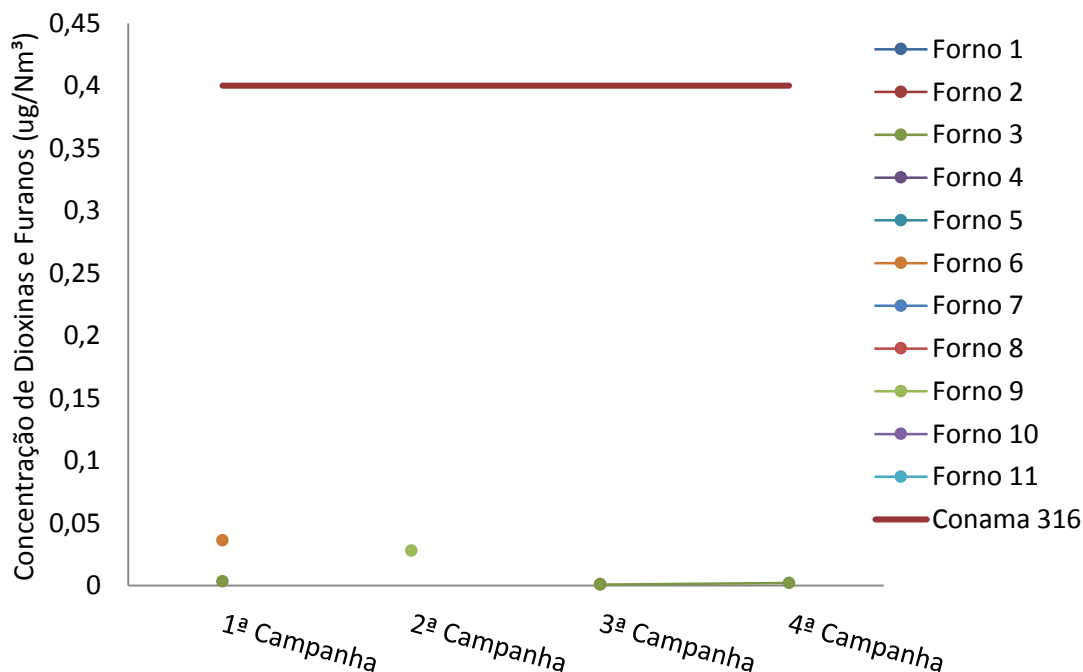


Gráfico 15- Resultados de automonitoramento de dioxinas e furanos dos fornos de clínquer



Como a DN COPAM nº 154/2010 não estabelece limites para o parâmetro dioxinas e furanos, foi utilizado o padrão estabelecido na Resolução CONAMA nº 316/2002, que estabelece diretrizes para tratamento térmico de resíduos. As empresas de Minas Gerais que realizam o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer e realizam a amostragem dos parâmetros de dioxinas e furanos, devem atender a resolução CONAMA. Os resultados de automonitoramento para dioxinas e furanos, referentes ao ano de 2014 (Gráfico 15), indicaram que todos os valores encontrados estão abaixo dos limites estabelecidos na Resolução.

Ao analisar os resultados de automonitoramento dos poluentes atmosféricos citados, constatou-se que os fornos 1, 2, 8 e 9 não atenderam a todos os padrões de lançamentos exigidos na legislação ambiental. Como os fornos 8 e 9 referem-se a um mesmo empreendimento, verificou-se que três dos nove empreendimentos estão em inconformidade com a legislação em pelo menos um dos parâmetros citados. Dessa

forma, constata-se que a maioria dos empreendimentos estão em conformidade com os padrões de emissão da DN COPAM 154 na atividade do coprocessamento em Minas Gerais.

A tabela 5 apresenta os fornos cujos parâmetros estão em inconformidade com os padrões de emissão da DN COPAM 154.

Tabela 7- Fornos em inconformidade com a DN 154/2010

<b>Empreendimentos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>Fornos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>MP</b>	X	X						X			
<b>NOX</b>	X	X						X	X		
<b>THC</b>								X			
<b>METAIS CLASSE 1</b>	X										

Fonte: Luiz (2016)

## 5.2. Propostas de melhoria no sistema de controle de emissão

Por meio de pesquisas nos Relatórios de Avaliação de Desempenho Ambiental (Radas), constatou-se que os 3 empreendimentos que apresentaram inconformidade com a legislação realizam o controle das emissões atmosféricas, com foco apenas no material particulado.

Visando propor melhorias nos sistemas de controle de emissão dos fornos de coprocessamento dos 3 empreendimentos, foram pesquisadas e apresentadas as melhores técnicas com base na eficiência de remoção dos poluentes, a fim de que suas concentrações de lançamento sejam minimizadas e conseqüentemente enquadradas aos padrões exigidos na DN COPAM 154/2010.

Assim, como proposta de melhoria para redução da emissão de material particulado, os filtros atualmente utilizados dos fornos 1, 2 e 8 (precipitadores eletrostáticos), poderiam ser substituídos por filtros de manga para uma melhor retenção de material particulado. Para remoção de NOx, poderia ser implantada a tecnologia de Redução Catalítica Seletiva no sistema de controle de emissão dos mesmos.



No forno 1, para um melhor controle de emissão de metais, poderia ser implementado um lavador de gás a seco com filtro de mangas. Um sistema de adsorção com carvão ativado poderia ser utilizado para melhor retenção de VOC'S/THC no forno 8, e, no forno 9, poderia ser implantada a tecnologia de Redução Catalítica Seletiva para um melhor controle de emissão de NOx.

A tabela 6 apresenta um resumo das técnicas de controle propostas para o sistema de controle de emissão dos fornos de clínquer 1, 2, 8 e 9 visando uma melhor retenção dos poluentes mencionados.

Tabela 8- Técnicas propostas para remoção dos poluentes dos fornos de clínquer

	<b>MP</b>	<b>NOx</b>	<b>VOC's</b>	<b>Metais</b>
<b>Forno 1</b>	Filtro de manga	Redução Catalítica Seletiva	<b>X</b>	Lavador de gás a seco com filtro de manga
<b>Forno 2</b>	Filtro de manga	Redução Catalítica Seletiva	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Forno 8</b>	Filtro de manga	Redução Catalítica Seletiva	Adsorção com carvão ativado	<b>X</b>
<b>Forno 9</b>	<b>X</b>	Redução Catalítica Seletiva	<b>X</b>	<b>X</b>

Fonte: Carvalho (2016).

Uma discussão sobre as técnicas de remoção de Material Particulado, Óxido de Nitrogênio, Hidrocarbonetos e Metais Classe 1 que poderiam ser implantadas nesses empreendimentos, com o objetivo de melhorar o controle de emissão na chaminé dos fornos de clínquer, é apresentada nos itens 5.2.1 a 5.2.4.

#### 5.2.1. Remoção de Material Particulado

Os coletores de material particulado tradicionalmente utilizados na indústria do cimento são os filtros de mangas e os precipitadores eletrostáticos. Os precipitadores eletrostáticos têm uma grande desvantagem quando comparados aos filtros de mangas, pois quando são atingidas altas concentrações de CO (acima de 0,5%), eles são desligados a fim de evitar explosão por inflamação de CO. Esses desligamentos geram um grande impacto à comunidade local e ao meio ambiente, pois fazem com que todo material particulado seja emitido para a atmosfera, sem qualquer retenção (FEAM, 2016). Atualmente, esses equipamentos vêm sendo substituídos por filtros de manga nas novas instalações de cimento na Europa (BDJUR, 2000).

Frente ao grande impacto que o filtro eletrostático pode gerar durante o seu desligamento, em termos ambientais, o filtro de manga seria o melhor sistema de despoeiramento e deveria ser instalado em todos os empreendimentos cimenteiros de Minas Gerais. De acordo com Santini (2011), os filtros de manga são um dos equipamentos mais utilizados para a remoção de materiais particulados do ar em indústrias por serem de fácil operação, instalação e manutenção, e por terem uma vida útil relativamente longa quando devidamente operados e inspecionados.

O filtro de mangas é um tipo de filtro de tecido, cujo formato do meio filtrante é um saco alongado e tubular, enquadra-se na categoria dos de alta eficiência de coleta, chegando em alguns casos, a valores maiores que 99,9% para fumos e poeiras acima de 0,1  $\mu\text{m}$ . Ele remove o pó da corrente de gás, passando a corrente gasosa (carregada de material particulado) por um tecido poroso. O gás atravessa os poros do tecido e as partículas, na sua maioria, ficam retidas na sua superfície, que de tempos em tempos devem ser retiradas para evitar uma camada muito espessa, que dificultaria a passagem do gás (aumento da perda de carga). Em seguida, o ar (já

isento de impurezas), passa para o plenum superior, saindo do filtro por meio de bocais localizados em uma de suas laterais (LISBOA E SCHIRMER, 2007).

De acordo com Santini (2011), os mecanismos envolvidos na coleta de partículas em filtros de mangas são principalmente a impactação inercial, a difusão, a atração eletrostática e a força gravitacional e secundariamente, a intercepção. No começo do processo de filtração, a coleta se inicia com a colisão das partículas contra as fibras do meio filtrante e sua posterior aderência às mesmas. À medida que o processo continua, a camada de partículas coletadas vai aumentando tornando-se, então, o meio de coleta. Em determinado momento, torna-se necessária a remoção das partículas coletadas, a fim de impedir a redução da eficiência do processo (após um determinado tempo, as mangas ficam impregnadas com pó, necessitando que se faça uma limpeza). Após o procedimento de limpeza, o pó é então recolhido para ser reciclado ou disposto adequadamente.

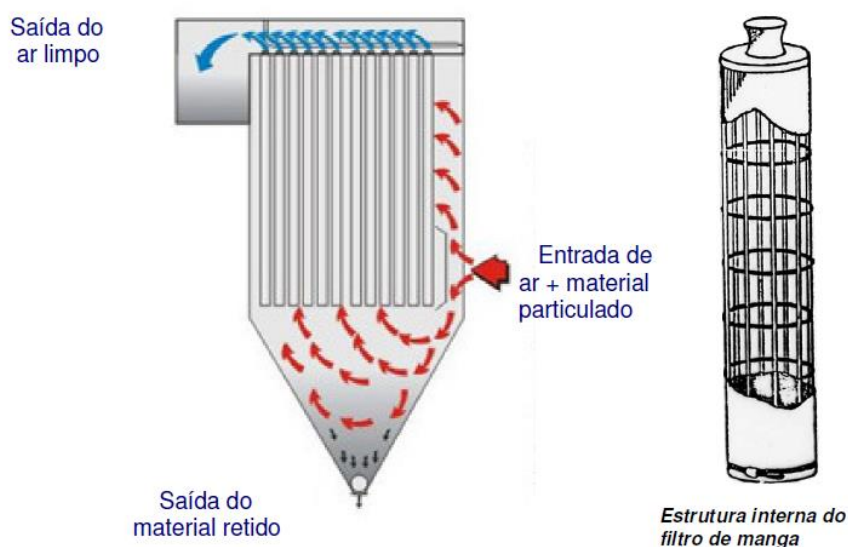
A escolha do meio filtrante a ser utilizado dependerá das características do gás transportador (temperatura, umidade, alcalinidade e acidez), das características das partículas a serem filtradas (concentração, distribuição de tamanhos, abrasividade) do tipo de limpeza a ser utilizado, do custo e da disponibilidade do mercado. Os materiais tradicionalmente usados na fabricação de pano são o algodão e a lã, desde que utilizados em temperaturas de até 82 e 90°C, respectivamente, e para correntes de ar sem umidade. Para temperaturas mais elevadas e poluentes agressivos a esses materiais, é necessário recorrer a tecidos de outros materiais, como poliamida, poliéster, polipropileno, fios metálicos, fibras de vidro, etc. Os filtros com feltro de poliéster duram cerca de 3 vezes mais do que os de algodão, e por isto são também muito usados (Lisboa e Schirmer, 2007).

O desenvolvimento tecnológico das baterias de filtros e os novos materiais utilizados, à base de teflon, como o gore-tex e o tetratex, permitem eficiências de remoção elevadas, superiores às dos precipitadores electrostáticos, principalmente para partículas da ordem dos 0,1  $\mu\text{m}$  e inferiores, suportando temperaturas máximas superiores a 200°C, com duração e manutenção aceitáveis (BDJUR, 2000).

Testes realizados em cimenteiras nos EUA mostraram valores de concentração médios de partículas nos gases filtrados inferiores a  $35 \text{ mg/Nm}^3$  em mais da metade dos filtros de manga testados, obtendo-se valores abaixo dos  $5 \text{ mg/Nm}^3$  para filtros em teflon, tipo gore-tex (USEPA, 1999). Esse resultado enfatiza a sua aplicabilidade nos fornos de clínquer das cimenteiras do Estado de Minas Gerais, considerando que o padrão de emissão estabelecido na DN COPAM 154 é de  $50 \text{ mg/Nm}^3$ .

A eficiência dos filtros de mangas (Figura 5) depende do tipo de material filtrante e da velocidade do gás através da superfície de filtração, sendo tanto maior quanto menor for essa velocidade. Gamas de velocidade de filtração comuns são 0,9-1,5 m/min, obtendo-se valores de eficiência melhorados para velocidades de 0,6 m/min. A eficiência do filtro também aumenta com a espessura do bolo de material depositado, porque este serve de leito de filtração para as partículas que chegam. Como a queda de pressão também cresce com a espessura do material depositado, deve haver um ponto de equilíbrio nos ciclos de limpeza e remoção do bolo filtrado, para que não haja a redução da eficiência do filtro e nem um aumento excessivo da queda de pressão (USEPA, 1999).

FIGURA 6- Filtro de mangas com entrada externa do ar poluído



Fonte: Adaptado de Lisboa e Schirmer (2007)

Segundo Baroncelli (2009), dentre as vantagens do filtro de mangas destacam-se a eficiência na remoção de partículas finas e grossas; a insensibilidade às variações do fluxo gasoso (vazão e concentração); o reaproveitamento do gás purificado em alguns casos; a recuperação do material a seco; a não geração de efluentes líquidos, a ausência de problemas relacionados a corrosão e a variabilidade de materiais filtrantes. Dentre as desvantagens, destacam-se a limitação de temperatura do fluxo e do poluente; o alto custo de manutenção (substituições de mangas); a limitação para materiais higroscópicos e a ocupação de uma área considerável.

#### 5.2.2. Remoção de NO<sub>x</sub>

Para a remoção de NO<sub>x</sub>, é importante destacar que existem medidas preliminares fundamentadas em ações que não são caracterizadas pela instalação de um equipamento de controle de poluição atmosférica, sendo um caminho mais econômico do que o definitivo. Baroncelli (2009) aborda algumas técnicas de controle preliminar de NO<sub>x</sub>, como:

- Uso de combustíveis com baixo teor de nitrogênio (N)
- Uso de aditivos
- Modificações no processo de combustão:
  - a) Combustão com baixo excesso de ar;
  - b) Combustão estagiada;
  - c) Recirculação interna ou externa dos gases de combustão;
  - d) Diminuição da temperatura de preaquecimento do ar;
  - e) Diminuição da temperatura da superfície envolvente;
  - f) Diminuição do índice de rotação do queimador; e
  - g) Combustão em leito fluidizado.

Experimentos em forno da indústria de cimento mostraram que reduzindo o nível do excesso de ar de 10 para 5% (por exemplo, reduzindo a concentração de oxigênio nos gases de exaustão de 2 para 1%) a redução das emissões de NO<sub>x</sub> pode

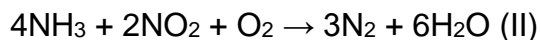
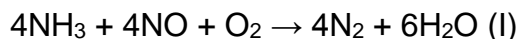
chegar a 15% (U.S. EPA, 2000 apud SIGNORETTI, 2008). A adoção dessa medida requer, entretanto, uma atenção especial a fim de não favorecer um aumento na emissão de CO.

Uma outra modificação de processo que apresenta resultados positivos na indústria de cimento é o processo CemStar, que pode reduzir até 30% as emissões de NOx em qualquer tipo de forno pela adição de pequenas quantidades de escória de alto-forno ao material cru alimentado no forno, reduzindo assim a quantidade de combustível necessário para a formação do clínquer no forno rotativo (U.S. EPA, 2000 apud SIGNORETTI, 2008).

Além das medidas primárias, a Redução Catalítica Seletiva (SCR) é o método mais eficaz para controlar as emissões de óxido de nitrogênio (NOx) provenientes dos gases de combustão. A SCR é uma tecnologia de tratamento de gases de combustão comprovada comercialmente que alcança a remoção de mais de 98% do NOx existente nos gases de exaustão dos sistemas de combustão (Hamon Group, 2016).

De acordo com Signoretti (2008), a Redução Catalítica Seletiva é uma tecnologia no qual o NOx é convertido em água e gás nitrogênio (N<sub>2</sub>), através da adição de amônia na presença de um catalisador. Os catalisadores mais utilizados são uma mistura de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) e pentóxido de vanádio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). No entanto, outros tipos de materiais como zeólitas, vêm sendo desenvolvidas com finalidade catalítica devido as suas propriedades de suportar altas temperaturas (U.S. EPA, 2000 apud SIGNORETTI, 2008).

Nesta técnica, a injeção de amônia ocorre a montante de uma secção catalítica montada no sistema de combustão, através de um distribuidor especial localizado em contra-corrente ao leito catalítico de um reator, utilizando vapor ou ar pressurizado de forma que o reagente seja distribuído uniformemente e está baseado na preferencial seletividade redutora do NH<sub>3</sub> pelo NOx. Os óxidos de nitrogênio, NH<sub>3</sub> e O<sub>2</sub> reagem em uma superfície catalítica, formando N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, através das reações I e II (SILVA, 2008):

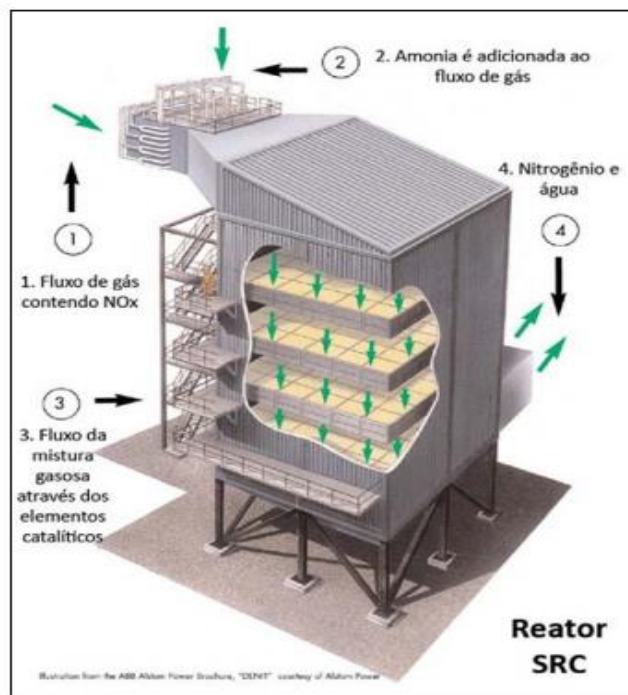


A Equação (I) é a reação principal, pois 90 a 95% das emissões de NOx estão sob a forma de NO.

A eficiência de remoção de NOx na Redução Catalítica Seletiva depende da temperatura, razão molar (NH<sub>3</sub>/NOx) e tempo de permanência do fluxo gasoso no leito catalítico. Para operação eficiente do sistema é necessário que os gases exaustos tenham um excesso mínimo de O<sub>2</sub> e a temperatura esteja na faixa típica de 230 a 450°C. Porém, a faixa de temperatura ideal é função do tipo de catalisador empregado no sistema. Assim sendo, o tipo de catalisador e a sua configuração são muito importantes na aplicação desta técnica, uma vez que as reações ocorrem em sua superfície (SILVA, 2008).

O projeto das secções catalíticas resulta em configurações típicas de placas paralelas e colméias para maximizar a superfície catalítica no menor volume possível. A secção catalítica é tipicamente extensa e densa devido à necessidade de altas velocidades para os gases de combustão (Figura 6) e elevado tempo de residência para promover as reações entre NOx, O<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub> (BAUKAL et al apud SILVA, 2008).

FIGURA 7- Coluna de Redução Catalítica Seletiva



Fonte: Adaptado (DOMINION, 2005)

É importante destacar que a técnica de RCS não pode ser utilizada em todos os tipos de processos de combustão, uma vez que ela requer um restrito controle do tempo de residência e da temperatura dos gases na qual a amônia é injetada. Além disso, mostra-se ser um método caro, pois os catalisadores têm que ser repostos, muitas vezes provocando parada de produção, além dos custos e espaço requerido para se implantar esta técnica, que exige, além de outros equipamentos, o reator de leito catalítico, o injetor de amônia e a sua unidade de armazenamento (GARG, 1992).

Nas fábricas de cimento, o sistema de redução seletiva catalítica (SCR) pode ser instalado após o sistema de controle de emissão de material particulado para diminuir o contato do catalisador com gases ácidos, metais e partículas. Nesse caso haverá um aumento no consumo de energia, pois será necessário aquecer o gás de exaustão para que se tenha uma temperatura adequada para as reações ocorrerem (RAMOS, 2015). Apesar dessas desvantagens, a técnica de RCS é a que apresenta



o maior potencial de remoção de NO<sub>x</sub>, atingindo níveis de até 90% de remoção (EPA, 1993).

### 5.2.3. Remoção de VOC's/THC

A adsorção tem sido uma tecnologia bastante empregada na área industrial tanto na separação quanto na purificação de gases contendo compostos orgânicos voláteis. Devido às propriedades do adsorvente, a técnica possibilita recuperar o adsorvato, mesmo em baixas concentrações, com um custo relativamente baixo (BANKHEDDA et al., 2000 apud SHIRMER et al., 2010).

Segundo Shirmer et al (2008), a adsorção sob o ponto de vista econômico é uma técnica conveniente no tratamento de efluentes gasosos com baixas concentrações de COV's, tanto na implantação como na operação. A grande maioria dos processos industriais opera com baixas concentrações de COV's, na grande maioria das vezes abaixo dos 200 ppm. Nesses casos, incluindo a atividade de coprocessamento, a tecnologia de adsorção se mostra bastante eficaz, obtendo uma eficiência de recuperação de 99%.

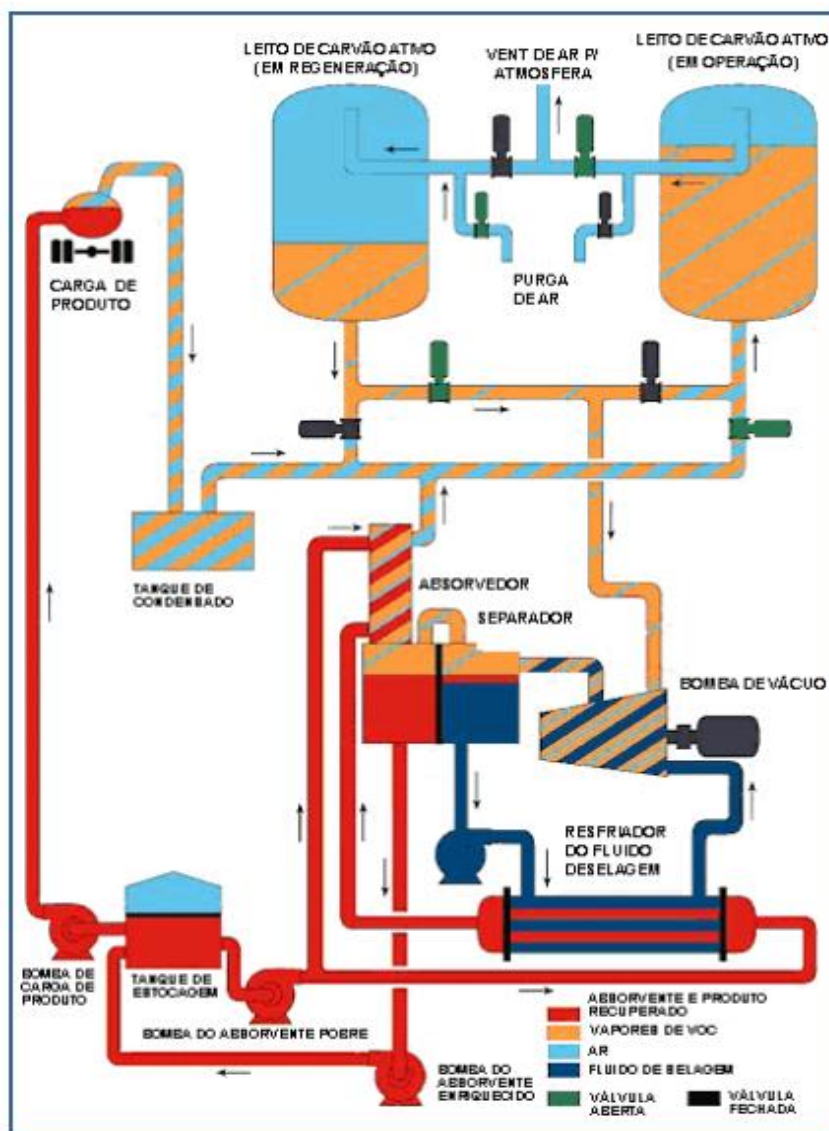
A adsorção de compostos orgânicos pode ser efetuada por diferentes adsorventes. Os adsorventes carbonados (à base de carbono) estão entre as melhores opções, principalmente pelas suas propriedades hidrofóbicas, baixo custo, disponibilidade, alta área superficial específica e elevada capacidade de remover compostos com peso molecular na faixa de 45 a 130 g mol<sup>-1</sup> (faixa que inclui a maior parte dos compostos odorantes) (LILLO-RÓDENAS et al., 2005; SCHIRMER, 2007 apud SCHIRMER, 2010). O carvão ativado é o adsorvente mais indicado para remoção de hidrocarbonetos, devido a sua grande área de superfície específica, na ordem de 500 - 1500 m<sup>2</sup> /g, dependendo do tipo e estado de ativação (ALLOWAY; AYRES, 1993 apud NAGAMATO, 2010).

Há ainda pouca experiência na aplicação de carvão ativado para limpeza de gases em cimenteiras. Até o ano de 1999, não havia nos EUA nenhuma instalação a base de carvão ativado, sendo considerado um sistema demasiado dispendioso

(USEPA 1999). Na Europa havia até o ano citado, uma unidade produtora de cimento com filtro de carvão ativado instalado na Suíça (IPPC, 1999).

O processo de adsorção é um fenômeno físico no qual as moléculas das substâncias contaminantes, fase gasosa, se aderem à superfície externa ou interna do sólido adsorvente. Como a capacidade de adsorção do carvão é limitada, é preciso que nessa técnica se instale pelo menos dois leitos de carvão ativado, permanecendo um em operação enquanto o outro regenera, de modo que o processo de recuperação de vapores seja contínuo. A regeneração é feita através da introdução no leito de carvão de uma corrente de vapor ou pela aplicação de vácuo ao sistema para remoção dos poluentes adsorvidos (Figura 7). A utilização de vácuo é mais vantajosa, pois evita a instalação de um sistema de geração de vapor e uma separação posterior de orgânicos da fase aquosa. Após o processo de dessorção, a corrente de gás é encaminhada a um condensador para a condensação dos compostos orgânicos, que então são retornados ao tanque de armazenamento (CONCAWE, 2002 apud SOUZA 2004).

FIGURA 8- Diagrama esquemático do sistema de recuperação de COV's por adsorção em carvão ativado



Fonte: Adaptado de Souza (2004)

Dentre as vantagens do uso da técnica destacam-se: a possibilidade de recuperação dos COV's e minimização dos problemas decorrentes da destinação final dos condensados; a alta eficiência de coleta; a automatização operacional e a insensibilidade a variações do processo. Como desvantagens de seu uso, destacam-se: o investimento inicial relativamente alto, os custos elevados com a recuperação

do poluente; a deterioração progressiva do adsorvente com o uso e a sua posterior substituição; a necessidade do condicionamento dos gases em relação à temperatura (no geral, menos de 50 °C) (MARTINELLI, 2012).

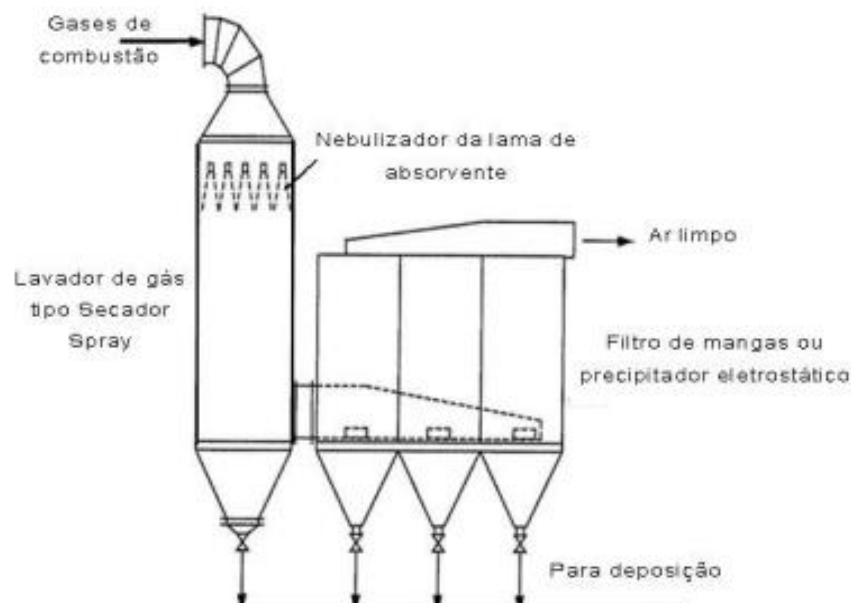
#### 5.2.4. Remoção de Metais Classe 1

De acordo com a United Nations Environment Programme (2003), um modo de se ter um controle efetivo do lançamento de metais é limitar a entrada de metais no processo, presentes tanto nas matérias-primas, como nos combustíveis. Além dessas medidas preventivas, pesquisas recentes apontam que a melhor técnica de controle de metais é feita através de um sistema de lavagem a seco com filtros de mangas, no qual ocorre a injeção de cal virgem (CaO) e carvão ativado. Nesse sistema, o carvão ativado, adicionado à lama de cal, ajuda a remover eficientemente o mercúrio do efluente gasoso (SILVA et al 2016). Além da remoção dos metais, os lavadores a seco e semiúmidos são utilizados para a remoção de gases ácidos (SO<sub>2</sub>, HCl, HF, etc) e alguns vapores de compostos orgânicos (CARNEIRO, 2015).

Segundo Masten e Davis (2016), os lavadores a seco atingem um índice de remoção de mercúrio total (particulado e compostos) de até 98%. Essa tecnologia, desenvolvida nos últimos seis anos, apresenta a tendência de não gerar efluentes líquidos e tem a habilidade de controlar e reter muitos poluentes, em diversas plantas e aplicações, tornando-a bastante atraente (CARVALHO, 2004).

De acordo com Carvalho (2004), nesta técnica o sorvente é injetado no fluxo de gás como um material particulado ou como lama (lavador spray seco). O secador spray (Figura 8), que é um lavador a seco, nebuliza uma lama ou spray contendo as substâncias sorventes (CaO e carvão ativado) sobre os produtos da combustão em alta velocidade. Os sprays na forma de solução aquosa absorvem os gases, evaporando a água que se faz presente na lama em virtude do calor do gás de escape. O produto da reação é um sólido seco, que juntamente com o sorvente não reagido, é captado nos dispositivos de controle de material particulado (filtros de manga), para posterior descarte.

FIGURA 9- Secador Spray



Fonte: Adaptado de Barbosa (2014)

O diâmetro das partículas do sorvente (cal + carvão ativado) é extremamente importante na eficiência de remoção dos gases, pois o fenômeno de adsorção ocorre na superfície das partículas. Além disso, é importante a proporção de sorvente a ser utilizada. A razão estequiométrica de sorvente a ser injetado por volume de gás depende do tipo de sorvente e da substância a ser removida (Michaelis Environmental Technology Group, 2016).

O sistema de lavagem a seco apresenta como vantagens a não geração de efluentes líquidos, a remoção de material particulado fino, a neutralização de gases ácidos, a eficiência na remoção de metais (inclusive mercúrio) e de dioxinas e furanos (quando a temperatura é baixa). Dentre as desvantagens da técnica, destaca-se a formação de cloreto de cálcio junto com as cinzas, que aumenta o volume total de resíduos para disposição adequada (SILVA et al 2016). Diante do exposto, o uso dessa técnica no sistema de controle do forno 1 pode proporcionar ao empreendimento o atendimento ao padrão de emissão de metais classe 1.

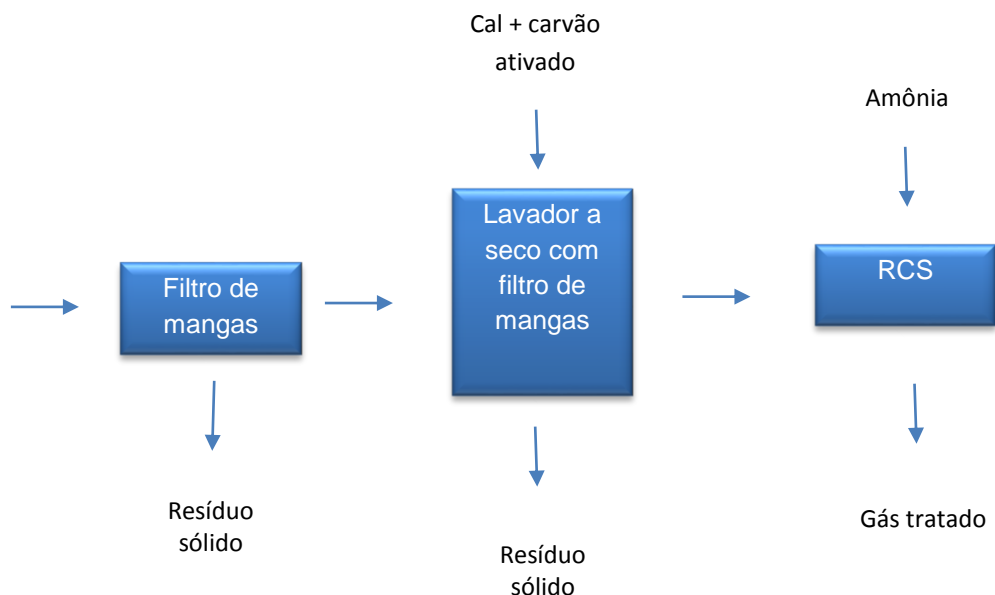
#### 5.2.5. Análise geral dos resultados

Os fornos de clínquer são considerados como uma das maiores fontes de poluentes atmosféricos perigosos já que a queima de resíduos perigosos acarreta um risco para emissões de diferentes poluentes prejudiciais à saúde da população. Os níveis e as características das emissões dos poluentes atmosféricos são afetados pelas características tecnológicas e operacionais do processo industrial, em especial, dos fornos rotativos de clínquer, da composição química e mineralógica das matérias primas e da composição química dos combustíveis (ROCHA et al., 2011).

A partir dos resultados de automonitoramento dos poluentes atmosféricos das fábricas de cimento, dos principais poluentes identificados nessas emissões e equipamentos de controle ambiental indicados para cada tipo de poluente, apresenta-se nas Figura 9 e 10 duas propostas de fluxogramas com a sequência de tratamento para o processo de controle da poluição atmosférica nos fornos 1 e 8, que apresentaram maior número de inconformidades com a legislação ambiental. Considerando que não seja limitada a entrada de metais no processo de clínquerização, para evitar a emissão de metais classe I, ou realizadas mudanças no processo de clínquerização para reduzir a emissão de NO<sub>x</sub> foram incluídas etapas para remoção desses poluentes nos fluxogramas. A inclusão do processo de adsorção ou do lavador a seco são medidas de segurança, considerando os riscos relacionados aos COV e aos metais classe I.

No caso do forno 9, que apresentou problemas apenas em relação à emissão de NO<sub>x</sub>, uma outra alternativa, seria a mudança na proporção de pneus no coprocessamento, que conforme observado em pesquisas (SANTOS NETO, 2012), pode ocasionar uma redução da emissão de NO<sub>x</sub>. Assim, antes da inclusão de RCS para controle da poluição por NO<sub>x</sub>, pode-se avaliar a possibilidade de utilização dessa alternativa de menor custo para a empresa.

FIGURA 10- Fluxograma geral para o tratamento dos poluentes do coprocessamento de resíduos utilizando lavador a seco (Proposta para o forno 1)



Obs: para o forno 2, seria excluída a etapa 2 (lavador a seco) do fluxograma e para o forno 9 seriam excluídas as etapas 1 e 2 (filtro de mangas e lavador a seco)

FIGURA 11- Fluxograma geral para o tratamento dos poluentes do coprocessamento de resíduos utilizando adsorção (Proposta para o forno 8)



## 6. CONCLUSÕES

Através do levantamento das emissões atmosféricas do setor de coprocessamento no Estado de Minas Gerais, observou-se que a maioria dos resultados de automonitoramento atendem aos padrões estabelecidos na DN COPAM nº 154/2010. Foi constatado, entretanto, que alguns empreendimentos não respeitam a frequência de automonitoramento das emissões atmosféricas estabelecida na DN COPAM nº 154/2010, devendo o órgão ambiental aplicar penalidades aos mesmos quanto ao descumprimento da periodicidade das análises. Ressalta-se a importância da Deliberação inserir o padrão de emissão para dioxinas e furanos, a fim de garantir um melhor controle das emissões no Estado.

Alguns empreendimentos não atenderam à legislação em todos os parâmetros analisados. Para esses, torna-se um desafio atenuar os impactos provocados pelas emissões dos poluentes por meio da adoção de medidas mais eficientes de controle das emissões de poluentes. Tendo em vista a diversidade de poluentes gerados durante a atividade do coprocessamento, é necessário que os empreendimentos sejam mais seletivos e criteriosos na escolha do equipamento de controle dos poluentes atmosféricos a fim de que suas concentrações de lançamento estejam de acordo com a legislação ambiental estadual.

Constatou-se que os empreendimentos que não atendem ao padrão de lançamento necessitam de mudanças significativas no controle de suas emissões tendo em vista melhorias em seus desempenhos ambientais. Tais empreendimentos realizam o controle com foco apenas no material particulado, sendo necessário possuir também um sistema de controle para os gases e metais. Dessa forma, para um melhor controle da emissão dos poluentes no sistema-forno, é necessária a instalação não somente de filtros de mangas, mas de lavadores de gás a seco e de tecnologias como a Redução Catalítica Seletiva e adsorção por carvão ativado.

Conclui-se que o coprocessamento é uma ótima alternativa para a gestão dos resíduos sólidos e deve ser incentivada pelos inúmeros benefícios proporciona, desde que realizada com um adequado controle ambiental. A prática do coprocessamento de resíduos em fornos de cimento ainda demanda muitos estudos, visando-se



esclarecer os aspectos da real contribuição do coprocessamento de resíduos e esclarecer os limites e riscos a ele associados. O rígido controle de suas condições operacionais, o monitoramento contínuo das emissões atmosféricas e a análise das características físicas e químicas dos resíduos coprocessados são essenciais para um correto gerenciamento do setor, a fim de não comprometer a qualidade do ar nos arredores dos empreendimentos e não causar danos à saúde da população e ao meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: **Cimento Portland Composto - Classificação**. Rio de Janeiro, 1991. BELATO, M.N. **Análise da geração de poluentes na produção de Cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, 2013.

ASSUNÇÃO, J., PESQUERO, C., (1999). **Dioxinas e Furanos: Origens e Riscos**. Revista de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, Brasil, 33 (5). 523-530.

BARBOSA, M. G. **Uso de filtro de mangas para tratamento de gases resultantes da combustão de bagaço de cana**. Universidade Estadual Paulista. SÃO PAULO, 2014.

BARONCELLI, F. **Poluição Atmosférica – Aspectos Gerais**. Faculdade de Engenharia de Minas Gerais. Minas Gerais, 2009.

BASE DE DADOS JURÍDICA- BDJUR (2000). **Sistema de Controle de Emissões para a Atmosfera**. Disponível em: <[http://bdjur.almedina.net/item.php?field=item\\_id&value=94336](http://bdjur.almedina.net/item.php?field=item_id&value=94336)>. Último acesso em 10 de Nov 2016.

BEN (2007). **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Energia. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 14 mai. 2016.

BEN (2008). **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Energia. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 14 mai. 2016.

BRASINTER 2014. **FISPQ – Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico Ácido Clorídrico**. Disponível em: <<http://www.grupobrasinter.com.br/fispqs/FISPQ-ACIDO-CLORIDRICO.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

BUGALHO ADONIRAM (1998). **Competitividade das Indústrias de Cimento do Brasil e da América do Norte**. Dissertação Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, 128p.

CARNEIRO, A. C. O., 2007. **Aproveitamento de finos de carvão vegetal como fonte energética**. Centro Brasileiro para a Conservação da Natureza e Desenvolvimento Sustentável. In: IV Simpósio de meio ambiente, Universidade Federal de Viçosa, UFV.

CARNEIRO, M. L. N. M. **Análise Termoeconômica e Ambiental de uma Usina de Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, PUC-RIO. Rio de Janeiro, 2015.

CARVALHO, E. F. U. **Desenvolvimento de um adsorvedor inorgânico sólido para reduzir a emissão de fluoreto na indústria cerâmica.** Tese em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais. São Paulo, 2004.

CARPIO, R. C., 2005. **Otimização no Coprocessamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental.** Tese Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 194P.

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

CEMBUREAU (1999). The European Cement Association. **Best Available Techniques For The Cement Industry.** 1999, 237p.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. 2006. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/>>. Acesso em: 14 Mai. 2016.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - **Apostila do curso de seleção de equipamentos de controle da poluição do ar.** São Paulo, 1987. 45p.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório Anual de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 1997.** São Paulo, 1997, pg. 12-13.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA [CNI] & ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND [ABCP]. *Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento* – Brasília: CNI, 2012. 58 p.

CÓNSUL, J. M.D et al. **Decomposição Catalítica de Óxidos de Nitrogênio.** Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

COSTA, J.M.B. **Coprocessamento de CDR no processo de produção de cimento.** 2014. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. 2014.

DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM nº154 de 25 ago. 2010. **Dispõe sobre o Coprocessamento de Resíduos em Fornos de Clínquer.** Publicado em 04 de Set. 2010.

DOMINION. 2005. Disponível em <<http://www.dom.com/about/stations/fossil/scr.jsp>>. Acessado em 14 Set 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Balço Energético Nacional**. [S.l.]: EPE, 2014. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em 13 de Mai. 2016.

ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY INTERNATION [ETI]. **All fired-up – Burning Hazardous Wastes in Cement Kilns**. 1992.

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

FAENQUIL – FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA DE LORENA. **Ácido Fluorídrico**. Disponível em: <<http://www.higieneocupacional.com.br/download/fluoridrico-faenquil.pdf>>. Último acesso em 20 Set. 2016.

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

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Análise Técnica e Ambiental da Utilização de Resíduos Sólidos Urbanos na Produção de Cimento (coprocessamento)**. Belo Horizonte, 2010.

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

GARG, ASHUSTOSH, **Trimming NOx**, Chemical Engineering. Pg 122-130, Novembro, 1992.

HAMON GROUP- Integrated Solutions for a clean environment. **Sistemas de remoção de NOx**. Disponível em: <[http://www.hamon.com.br/pt\\_BR/produtos/controla-da-poluicao-atmosferica/sistemas-de-remocao-de-nox](http://www.hamon.com.br/pt_BR/produtos/controla-da-poluicao-atmosferica/sistemas-de-remocao-de-nox)>. Último acesso em 15 Set. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. **Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries**. Integrated Pollution Prevention and Control. Institute for Prospective Technological Studies, European Commission, Seville, Spain. March. 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. **Contributions of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel**

**on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 881 pp. 1999.

JÚNIOR, J.A.C., LACAVAL, P.T. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

JÚNIOR, N.R.A.; GABAÍ. I. **Incineração e Dioxinas: Análise do Aporte Teórico Disponível**. Maceió, Alagoas.

JÚNIOR, S. B. (1993) **Coprocessamento de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento**. Revista Brasileira de Engenharia Química. São Paulo, v. XIII. Nº 2, pp. 22 – 25. 1993

LISBOA, HENRIQUE DE MELO; SCHIRMER, WALDIR NAGEL. **Controle da Poluição Atmosférica**: Metodologia de Controle da Poluição Atmosférica. Primeira versão: Montreal, 2007. Unidade VII. Universidade Federal de Santa Catarina.

LOPES, S. L. **Formação de poluentes em combustão de vapores amoniacaís**. Vitória, 1995. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo.

MALARD, A. A. M. **Avaliação Ambiental do Setor de Siderurgia não Integrada a Carvão Vegetal do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Sustentabilidade Sócio-Econômica e Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais. 2009.

MANTEGAZZA, E. **Aspectos ambientais do coprocessamento de resíduos em fornos de produção de clínquer no estado de São Paulo**. 2004. 297 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

MARCIANO JÚNIOR, Everaldo; ESPER, Mario William; KIHARA, Yushiro. **A questão ambiental no setor cimenteiro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4. 1996, São Paulo.

MARTINELLI, E. S. **Absorvedores e adsorvedores**. CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR. Santa Catarina, 2012.

MASTEN, S. J; DAVIS, M. L. **Princípios de Engenharia Ambiental**. 3ª edição. McGraw Hill Brasil. 2016.

MAURY, M.B.,BLUMENSCHHEIN, R.N. **Produção de cimento: impactos à saúde e ao meio ambiente**. Sustentabilidade em Debate. Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96. 2012.

MELLO, J. M. M. **Biodegradação dos Compostos BTEX em um Reator com Biofilme**. Tese para Obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Química. Florianópolis, UFSC, 2007.

MICHAELIS ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY GROUP. Tratamento de gases-**Absorção a seco**. Disponível em <<http://www.michaelis-umwelttechnik.de/br/productos/limpieza-de-gases/adsorcion-seca.php>>. Último acesso em 14 Set 2016.

MILANEZ, B., FERNANDES, L.O., PORTO, M.F. S. **A coincineração de resíduos em foos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente**. Ciência e Saúde Coletiva. v.14, n. 6, p. 2143-2152. 2009.

NAGAMATO, R. J et al. **Tratamento de Compostos Orgânicos Voláteis pela Técnica da Incineração Catalítica**. Revista Eletrônica Multidisciplinar Pindorama do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA. 2010.

NARDI, A et al. **Proposição de Limites Máximos de Emissão de Poluentes Atmosféricos de Fontes Fixas Para a Indústria de Fertilizantes em Nível Nacional**. Minas Gerais, 2004.

PAULA, L.G.; S, R.J.; BERNARDO, A. C. S. M. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland Utilizando uma Mistura de Combustíveis e o Coprocessamento de Pneus Usados**. CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Paraíba, 2010.

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

PETROBRAS. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/coque-verde-de-petroleo/>>. Acesso em 13 Mai. 2016.

RAMOS, M.D. **Estudo da formação e Emissão de Poluentes na Atmosfera Originários do Coprocessamento de Resíduos em Fábricas de Cimento**. Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. 2015.

RAMOS, M.D. (1997). **Estudo das Emissões de Poluentes Oriundos de Fábricas de Cimento Portland e sua Dispersão na Atmosfera**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, 153p.

RESOLUÇÃO CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999. **Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos**. Páginas 80-83.

RESOLUÇÃO CONAMA nº316 de 29 de outubro de 2002. **Procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**. Páginas 92 – 95.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; SANTO, B. C. E. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.16, n.1, p.1-10, 2011.

SANTI, A.M.M. **Co-incineração e coprocessamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer**: Investigação no maior pólo produtor de cimento do País, Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais, e propostas para a Segurança Química. 2003. 150 p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 2003.

SANTINI, J. **Filtro de mangas para o controle de emissões atmosféricas de particulado gerados no beneficiamento de mármore e granitos**. UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO. 2011.

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

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>>. Último acesso em 7 Dez. 2016.

SHIRMER, W. N. et al. **Avaliação da Força de Retenção de Compostos Orgânicos (COV) em Nanoestruturas de Carbono “CUP STACKED”**. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Paraná. V. 12 n. 2, p. 31-36. 2008.

SHIRMER, W.N. et al. **Modelagem da adsorção de compostos orgânicos voláteis sobre nanotubos de carbono cup-stacked usando o modelo da força motriz linear**. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Paraná. Maringá, v. 32, n. 2, p. 159-166. 2010.

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

SILVA, M. A. L. **Perspectivas para Redução das Emissões de Óxidos de Nitrogênio nos Processos de Combustão no Pólo Petroquímico de Camaçari**.

Dissertação (Mestrado) - Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo – Ênfase em Produção Limpa. Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2008.

SILVA, M. et al. **Qualidade do Ar e Emissões Atmosféricas**. Centro Estadual de Educação Profissional de Curitiba–CEEP. Curitiba, 2016.

SILVA, R. J. **Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. 242p. 1994.

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

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

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO [SNIC)]. Press Kit 2010. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/pdf/presskit\\_SNIC\\_2010.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2010.pdf)>. Acesso em 13 Mai. 2016.

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

SIQUEIRA, L.C.G. **Avaliação do impacto das emissões de metais geradas no coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento**. Dissertação de Mestrado em Saúde Pública. São Paulo, 2005.

SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL – **SIAM**. Consulta interna: Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/siam/analise/>>.

SOUSA, C. A. **Coprocessamento em fornos de clínquer: uma alternativa sustentável para o reaproveitamento do resíduo cascalho de perfuração de poços de petróleo em Mossoró/RN**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Potiguar. Rio Grande do Norte. 2013.

SOUZA, M. A. **Estudo de emissões de vapores orgânicos no carregamento de gasolina em caminhões-tanque**. 169f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Ambiental, UFBA. Salvador. 2004.

STEFFENS, J; STEFFENS, C. **A Poluição Atmosférica e a Qualidade de Vida da População**. Unoesc & Ciência – ACET. Joaçaba, v. 4, n. 1, p. 85-96. 2013.

STERN, A.C., BOUBEL, R.W., TURNER, B. (1984). **Fundamentals of Air Pollution**. Orlando: Academic Press, Inc., 530 p.



TAMAROZZI, L. R.; LACAVA, P. T.; FILHO, A. C. P. **Estudo das Emissões em Câmera de Combustão Assistida a Plasma**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2006.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME [UNEP]. **Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases**. UNEP Chemicals, Geneva, Switzerland, 2003.

UNITED STATES OF AMERICA [USA]. Code Federal Regulations – Protection of Environment – 40 CFR. Part 260. **Burning of hazardous waste in boilers and industrial furnaces**. Final rule. US Federal Register. V.56. n. 35, p:7134 -7210. Feb, 1991.

U.S. ENVIRONMENTAL Protection Agency, Alternative Control Techniques Document – Nox Emission from Process Heaters, U.S. EPA Report EPA - 453/R-93-034, September, 1993.

[USEPA] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Effects on materials. In: Air quality criteria for particulate matter. 1996. Cap.9. Disponível em: <http://www.epa.gov/nceawww1/pdfs/partmatt/vol2/0671ch09.pdf>. Acesso em 06 de Mai 2016.

[USEPA] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Highlights of Emission Measurements: Development Activities for 1998-1999, Emission Measurement Center, U. S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. 1999.

VIEIRA, F.C.S. **Toxicidade de Hidrocarbonetos Monoaromáticos do petróleo sobre metamysidopsis elongata atlântica (Crustácea: Mysidacea)**. Dissertação Submetida para Grau de Mestre em Engenharia Ambiental. Florianópolis, UFSC, 2004.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Coprocessamento de Resíduos Industriais**. 2008. Disponível em: [http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327\\_2workshopagregado\\_Francis coAlberto.pdf](http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_Francis%20Alberto.pdf). Último acesso em 20 Set.2016.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Iniciativa de sustentabilidade do cimento - contribuição da prática do coprocessamento**. In: SEMA – Workshop Avanços da tecnologia de coprocessamento de resíduos. Curitiba, 2009.

WBCSD, 2009a. **Cement technology Roadmap 2009**. Carbon Emission reductions up to 2050. World Business Council for Sustainable Development. Disponível em: [www.wbcsd.org](http://www.wbcsd.org). Acesso em 18 Mai. 2016.

WBCSD. **The Cement Sustainability Initiative**. 10 years of progress – moving on to the next decade 2012. World Business Council for Sustainable Development. Disponível em: <[www.wbcsd.org](http://www.wbcsd.org)>. Acesso em 18 Mai. 2016.

WBCSD. **The Cement Sustainability Initiative**. 10 years of progress – moving on to the next decade. World Business Council for Sustainable Development. 2014. Disponível em: <[www.wbcsd.org](http://www.wbcsd.org)>. Acesso em 18 Mai. 2016.

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