

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**BÁRBARA SOUSA GARCIA**

**ESTUDO DE TÉCNICAS PARA CONTROLE DE POLUENTES GERADOS NA**  
**PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

**FORMIGA - MG**  
**2019**

BÁRBARA SOUSA GARCIA

ESTUDO DE TÉCNICAS PARA CONTROLE DE POLUENTES GERADOS NA  
PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Química do UNIFOR-  
MG, como requisito parcial para a obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Química.  
Orientadora: Rosiene G. de Jesus Pimenta

FORMIGA

2019

Bárbara Sousa Garcia

ESTUDO DE TÉCNICAS PARA CONTROLE DE POLUENTES GERADOS NA  
PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

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

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Me. Emerson Paulino dos Reis  
UNIFOR-MG

---

Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva  
UNIFOR-MG

Formiga, 08 de novembro de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ser guia durante esta jornada.

Aos meus pais, Neusa e Geraldo, e irmão João Pedro, que sempre foram suporte e apoio em todos os momentos e sempre estiveram presentes nos momentos de dificuldade. Por sempre acreditarem em mim, não medindo esforços para que eu chegasse aonde cheguei.

Ao Wagner, pelo amor, suporte e incentivos constantes. Por sempre acreditar em meu sucesso.

À minha avó materna por todo ensinamento e companheirismo.

À Rosiene, pelo incentivo, paciência, suporte e compartilhamento de conhecimentos durante a elaboração deste trabalho.

A todos aqueles que de forma indireta ou indireta contribuíram para minha jornada.

## RESUMO

Medidas de mitigação dos impactos ambientais gerados devem ser tomadas a fim de diminuir os impactos do efeito estufa. Os fornos de clínquer são as mais importantes fontes de emissão de poluentes atmosféricos contribuindo para que a produção de cimento seja apontada como um grande gerador de impactos ambientais e sociais. Diante disto, este trabalho analisa a formação e controle dos poluentes gasosos CO, MP, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> gerados no processo produtivo de clínquer em indústrias de cimento. O NO<sub>x</sub> e o SO<sub>x</sub> são gases secundários que se formam através de reações químicas que acontecem dentro dos fornos rotativos de clínquer. O CO é gerado a partir de três fontes diferentes: decarbonatação de calcário no forno, a combustão de combustível e o uso de eletricidade. Para controle destes poluentes, órgãos ambientais têm estabelecido diretrizes de valores-padrão de emissão e as empresas vem estudando a implantação de tecnologias capazes de amenizar os impactos destes gases. Com a investigação de técnicas de controle como a captura e armazenamento de carbono, combustíveis alternativos e redução catalítica para remoção de NO<sub>x</sub>, além dos filtros para retenção de material particulado e as tratativas realizadas pelos órgãos governamentais responsáveis apresentadas neste trabalho, é possível verificar que estas contribuem de forma positiva com a redução dos poluentes atmosféricos gerados e diminuição dos efeitos na saúde humana e no meio ambiente, mostrando que as produtoras de cimento do Brasil têm a possibilidade de manter suas fábricas sustentáveis sem perder produtividade, assim como acontece na Europa e outras partes do mundo, onde medidas eficazes são realizadas e leis mais rigorosas são aplicadas.

Palavras-chave: Indústria de cimento. Impactos Ambientais. Emissão e controle de poluentes.

## ABSTRACT

Mitigation actions of the environmental impacts generated should be taken in order to reduce the impacts of the greenhouse effect. Clinker kilns are the most important sources of air pollutant emissions, contributing to cement production be a major generator of environmental and social impacts. Based on that, this work analyzes the formation and control of gaseous pollutants CO, Particulate Matter, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> generated in the clinker production process in cement industries. NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> are secondary gases that form through chemical reactions that take place inside clinker rotary kilns. CO is generated from three different sources: limestone decarbonation in the furnace, fuel combustion and the use of electricity. To control these pollutants, environmental agencies have established guidelines of emission standard values and companies have been studying the implementation of technologies capable of mitigating the impacts of these gases. With the investigation of control techniques such as carbon capture and storage, alternative fuels and catalytic reduction for NO<sub>x</sub> removal, in addition to the filters for retention of particulate matter and the negotiations carried out by the responsible government agencies presented in this paper, it is possible to verify that these contribute positively to the reduction of the air pollutants generated and the reduction of the effects on human health and the environment, showing that the cement producers in Brazil have the possibility to keep their factories sustainable without losing productivity, as in Europe and others countries where effective actions are taken and stricter laws are enforced.

Keywords: Cement Industry. Environmental impacts. Emission and control of pollutants.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de fabricação do cimento.....	18
Figura 2 - Representação das transformações na formação do clínquer Portland.....	21
Figura 3 - Utilização de combustíveis alternativos (% por poder calorífico).....	35
Figura 4 - Fluxograma convencional para captura de CO <sub>2</sub> com utilização de amina. ....	37
Figura 5 - Produção de cimento versus carbonatação do concreto. ....	38
Figura 6 - Ilustração do processo de limpeza de um filtro de mangas .....	39
Figura 7 – Ilustração do funcionamento de precipitador eletrostático. ....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maiores produtores de cimento no mundo (em milhões de toneladas) .....	17
Tabela 2 - Composição dos tipos de Cimentos Portland produzidos no Brasil.....	23
Tabela 3 - Limites de emissão estabelecidos, em mg/Nm <sup>3</sup> . .....	29
Tabela 4 - Padrões de qualidade do ar. ....	30
Tabela 5 - Condições e limites para indústrias de cimento Portland em mg/m <sup>3</sup> .....	31



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores-limite para NO <sub>2</sub> e SO <sub>2</sub> .....	29
Quadro 2 - Principais tecnologias de controle das emissões de NO <sub>x</sub> . ....	41

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Emissão de NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> e material particulado no Reino Unido .....	25
Gráfico 2 - Emissão específica na produção de cimento (Kg CO <sub>2</sub> /ton cimento).....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$	Micrometros
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEA	Agência Europeia do Ambiente
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
$\text{C}_2\text{S}$	Silicato dicálcico
$\text{C}_3\text{A}$	Aluminato cálcico
$\text{C}_3\text{S}$	Silicato tricálcico
$\text{C}_4\text{AF}$	Ferro aluminato cálcico
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de cálcio
$\text{CaO}$	Óxido de cálcio
CCS	Carbon Capture and Storage (Captura e Armazenamento de Carbono)
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CO	Monóxido de Carbono
$\text{CO}_2$	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CSI	Cement Sustainability Initiative (Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento)
ECRA	European Cement Research Academy (Academia Europeia de Investigação em Cimento)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro
FSC	Fator de Saturação da Cal
HCN	Ácido Cianídrico
IEA	Agência Internacional de Energia
IFC	Corporação Financeira Internacional
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
$\text{m}^3$	Metros cúbicos
MA	Módulo de Alumínio
$\text{MgCO}_3$	Carbonato de Magnésio
$\text{MgO}$	Óxido de Magnésio
MJ	Megajoule

MP	Material Particulado
MS	Módulo de Sílica
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trióxido de Dinitrogênio
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Tetróxido de Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
NO	Óxido Nítrico
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	Óxido de Nitrogênio
OMS	Organização Mundial da Saúde
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Poluição do Ar
SiO <sub>2</sub>	Sílica
SCR	Redução Catalítica Seletiva
SNCR	Redução Catalítica não Seletiva
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SO <sub>x</sub>	Óxido de Enxofre
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SO <sub>3</sub>	Óxido Sulfúrico
ton	Toneladas
µg	Micrograma
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development (Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>Indústria cimenteira .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>Processo produtivo do cimento.....</b>	<b>18</b>
<b>4.3</b>	<b>Cimento.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Tipos de cimento .....</b>	<b>22</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Adições .....</b>	<b>23</b>
<b>4.4</b>	<b>Principais emissões atmosféricas na produção de cimento.....</b>	<b>24</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Material particulado.....</b>	<b>25</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Óxidos de nitrogênio.....</b>	<b>26</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Óxidos de enxofre .....</b>	<b>26</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Dióxido de carbono .....</b>	<b>27</b>
<b>4.5</b>	<b>Legislação ambiental .....</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>6.1</b>	<b>Eficiência térmica e elétrica .....</b>	<b>33</b>
<b>6.2</b>	<b>Combustíveis alternativos .....</b>	<b>34</b>
<b>6.3</b>	<b>Adições ou substitutos de clínquer .....</b>	<b>35</b>
<b>6.4</b>	<b>Captura e armazenamento de carbono.....</b>	<b>36</b>
<b>6.5</b>	<b>Material particulado.....</b>	<b>39</b>
<b>6.6</b>	<b>Controles para emissão de NOx .....</b>	<b>40</b>
<b>6.7</b>	<b>Controle das emissões de SOx .....</b>	<b>43</b>
<b>6.8</b>	<b>Cimentos alternativos .....</b>	<b>43</b>
<b>6.9</b>	<b>Desenvolvimento sustentável .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mudança climática é uma das maiores e provavelmente mais desafiadoras ameaças ambientais que o mundo enfrenta neste século. Portanto, medidas de mitigação para reduzir a extensão do aquecimento global são cruciais (IPCC, 2007, tradução nossa).

A intensificação do efeito estufa está ocorrendo desde a Revolução Industrial, provocando assim um aumento na temperatura global. Segundo dados do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), tradução nossa, a potencialidade de aquecimento global aumentou aproximadamente 70% desde 1970, com o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) sendo a principal fonte com 80% das emissões. O aumento do efeito estufa está diretamente ligado à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento, que somente em 2004 representaram 56,6% e 17,3% da emissão de CO<sub>2</sub>, respectivamente (IPCC, 2007, tradução nossa).

Os fornos de clínquer são as principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos em fábricas de cimento. Os níveis dependem das características tecnológicas do processo industrial, da composição química e mineralógica das matérias-primas e dos combustíveis, da marcha operacional do forno e da eficiência dos sistemas de controle de emissões (SANTI, 2003).

Outra característica do processo de produção do cimento Portland é o alto consumo de energia. Mais de 80% está relacionada ao consumo de energia térmica, durante a queima de combustíveis na fabricação do clínquer, principal constituinte do cimento Portland. Por isso, a indústria do cimento é responsável por grandes impactos ambientais, visto que grande parte dos poluentes provém da queima dos combustíveis (BELATO, 2013).

O processo de produção do cimento vem sendo apontado como gerador de impactos tanto ambientais, como sociais. Atualmente, as indústrias cimenteiras têm buscado formas a atender legislações e assim, buscar uma maior responsabilidade socioambiental (IPCC, 2007, tradução nossa).

Diante disto, o estudo aqui apresentado possibilita analisar as tecnologias e recursos usados para controlar as emissões de poluentes gerados pelas indústrias de cimento e os padrões a serem considerados.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar as técnicas para controle de poluentes gerados pela indústria de cimento.

### **2.2 Objetivos específicos**

Têm-se como objetivos específicos:

- Estudar as emissões de gases poluentes na produção de cimento;
- Abordar as legislações pertinentes à produção de cimento Portland a respeito das emissões de gases poluentes;
- Avaliar as tecnologias utilizadas para controle de emissão de poluentes na indústria de cimento.

### 3 JUSTIFICATIVA

Qualquer indústria, mesmo de pequeno porte, produz resíduos que geram impactos ambientais. Em consequência do crescimento da indústria civil, os impactos causados pelas plantas de cimento vêm aumentando proporcionalmente.

As fábricas cimenteiras são responsáveis por grande parte da poluição atmosférica sendo uma questão preocupante para todos, por se tratar de um problema que afeta uma boa parte da população mundial, visto que emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), compostos de chumbo, são tóxicas e nocivas ao meio ambiente e as pessoas (SOUZA et al., 2015).

Nos últimos anos, houve uma crescente preocupação internacional sobre os efeitos a longo prazo das emissões antrópicas de gases do efeito estufa no clima global. O mais importante desses gases é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), não porque tenha a maior retenção de calor por unidade dos gases, mas porque a quantidade de emissões é tão grande que seus efeitos gerais são dominantes (OSS; PADOVANI, 2003).

Ao contrário das emissões de SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> da indústria de cimento (consideradas relativamente modestas), as emissões de CO<sub>2</sub> são enormes e levaram a indústria a ser uma das poucas selecionadas no cálculo dos níveis internacionais de emissões de gases do efeito estufa (OSS; PADOVANI, 2003).

De acordo com as delimitações de emissão dos poluentes determinadas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), as empresas estão buscando meios para conseguir diminuir as emissões, evitando assim os danos causados ao meio ambiente e a saúde dos seres humanos. Levando estes fatores em consideração, neste trabalho realizou-se um estudo desses impactos gerados pela produção de cimento.

Os aspectos dos impactos ambientais das indústrias trazem ao engenheiro químico preocupações no sentido de estudar e apresentar soluções que possam minimizar e prevenir as modificações negativas causadas na natureza pelos poluentes gerados. Além disso, é preciso buscar o desenvolvimento tecnológico dos processos sem deixar de lado as técnicas para conservação do meio ambiente favorecendo a sociedade (ALVES, 2019).



## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Indústria cimenteira

A palavra cimento é originada do latim *caementu*, que designava na velha Roma uma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. Apesar do cimento ter sido descoberto há cerca de 4.500 anos, o grande passo no seu desenvolvimento foi dado em 1756 por John Smeaton, que obteve um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin, após queimar pedras calcárias e argila, percebeu que havia obtido uma mistura que, depois de seca, se tornava mais dura que as pedras empregadas na construção. A mistura então ganhou o nome de cimento Portland, por ser semelhante às rochas da ilha britânica de Portland (BATTAGINI, 2006).

No Brasil, a primeira tentativa de fabricação de cimento Portland foi em 1888 em Sorocaba-SP. Entretanto, somente em 1924 foi instalada a Companhia Brasileira de Cimento Portland em Perus-SP, considerada um grande feito da indústria de cimento brasileira (BATTAGINI, 2006).

Em 2014 o Brasil encontrava-se na 4ª posição dos maiores produtores de cimento do mundo, porém, pode-se observar na TAB. 1 que em 2018 o país caiu para a 12ª posição. Segundo a Global Cement Magazine (2017), tradução nossa, este fato deve-se a estagnação da economia brasileira, ao contrário de países como Turquia e Irã que vem aumentando seu quadro de fábricas instaladas no país e investindo cada vez mais no setor cimenteiro.

Tabela 1 – Maiores produtores de cimento no mundo (em milhões de toneladas)

<b>Países</b>	<b>2014</b>	<b>2016</b>	<b>2018</b>
China	2480	2410	2370
Índia	260	290	290
Estados Unidos	83,2	85,9	88,5
Peru	75	77	84
Vietnã	60,5	70	80
Indonésia	65	63	67
Coreia do Sul	63,2	55	56
Japão	53,8	56	55,5
Rússia	68,4	56	55
Egito	50	55	55
Irã	65	53	53
<b>Brasil</b>	<b>72</b>	<b>60</b>	<b>52</b>

Fonte: Adaptado e traduzido de Statista, 2019.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) (2016), o parque industrial brasileiro é composto por 100 fábricas produtoras de cimento, as quais são controladas por 24 grupos industriais, espalhadas em 88 municípios de 24 estados do país, produzindo em 2018 cerca de 52 milhões de toneladas de cimentos.

## 4.2 Processo produtivo do cimento

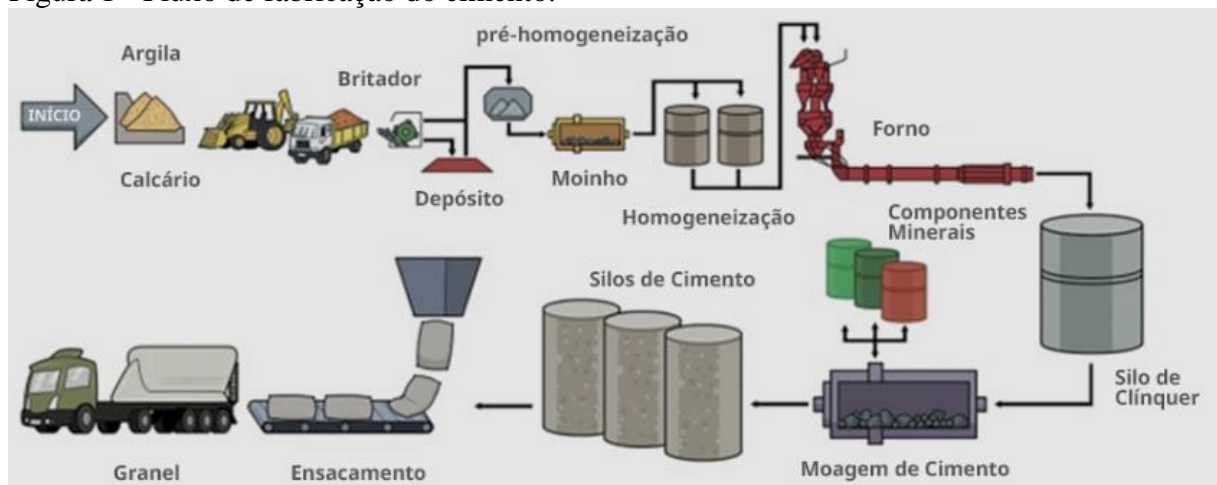
Para a norma brasileira NBR 5732 (ABNT, 1991), o cimento Portland comum é definido como o aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland com adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Segundo Farenzena (2017), na fabricação do Cimento Portland, cada fase do processo envolve uma série de controles e operações unitárias que são responsáveis pelas transformações físicas, químicas e mineralógicas das matérias-primas.

O processo produtivo pode ser realizado de duas formas diferentes, por via seca ou via úmida. Devido ao alto gasto energético, sendo mais de 6.000 MJ/ton clínquer, o processo por via úmida caiu em desuso pelas empresas (Belato, 2013). Com isso, o processo de fabricação dominante e foco deste trabalho é por via seca, onde as matérias-primas moídas alimentam os fornos rotativos em forma de pó.

No processo produtivo, como ilustrado na FIG. 1, as matérias-primas utilizadas são recebidas, previamente britadas, passam por um processo de homogeneização e então são introduzidas nos moinhos para moagem antes de entrar nos fornos rotativos, onde o clínquer é produzido e posteriormente passa para a moagem de cimento.

Figura 1 - Fluxo de fabricação do cimento.



Fonte: Blog Cimento Mauá, 2017.

As etapas que constituem a produção de cimento e as matérias-primas utilizadas, como calcário e argila, serão abordadas de forma aprofundada nos próximos parágrafos deste tópico.

O calcário que é constituído basicamente de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), é extraído da mineração que, segundo Sellitto (2002), é o processo de desmonte, extração e remoção de minerais. Após sua extração, o material é moído até que atinja a granulometria desejada para utilização no processo. Além disso, o material é armazenado em pilhas de pré-homogeneização para dosar de forma correta o material no processo, já que durante a extração são obtidos materiais com alto teor de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), calcário calcítico e alto teor de óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), calcário dolomítico.

A argila deve ser composta essencialmente de silicatos de alumínio, óxidos de ferro, alumínio e silício. Segundo Heinen (2002), a principal função da argila é completar os teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que são deficientes no calcário. Como funções secundárias têm-se a contribuição de sódio e potássio para equilibrar o enxofre durante o processo e melhoraria da plasticidade dos materiais além de auxiliar na estabilidade operacional do forno. Na ausência deste material, são utilizados aditivos como o minério de ferro, areia e bauxita.

Após a extração e britagem, as matérias-primas passam por um processo de moagem e secagem. Segundo Heinen (2002), a moagem é considerada uma das etapas mais importantes do processo produtivo do cimento, pois nela que ocorre o início da mistura das matérias-primas e, ao mesmo tempo, a secagem delas. Esse conjunto de operações transformam as matérias-primas em uma mistura fina e homogênea denominada farinha.

Segundo Pecchio (2013), a composição química da farinha deve respeitar as relações entre os quatro componentes principais,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , de maneira que os minerais que compõem o clínquer possam se formar. Essas relações estão descritas nas equações a seguir, sendo o Fator de Saturação da Cal (FSC) (EQ. 1), o Módulo de Sílica (MS) (EQ. 2) e o Módulo de Alumínio (MA) (EQ. 3).

$$\text{FSC} = \frac{\text{CaO} \times 100}{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

$$\text{MS} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

$$\text{MA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (3)$$

O FSC consiste em relacionar o CaO e os demais óxidos com os quais ele reage, seu valor na farinha normalmente está em torno de 92% a 99%. O MS relaciona a SiO<sub>2</sub> e os óxidos de alumínio e ferro, expressando assim o equilíbrio entre os elementos fundentes, ferro e alumínio e não fundentes, sílica, seu valor normalmente está em torno de 2,3 a 2,7. Já o MA relaciona os elementos fundentes, seu valor estar em torno de 1,3 a 1,6 (CIMENTO ITAÚ, [200-]).

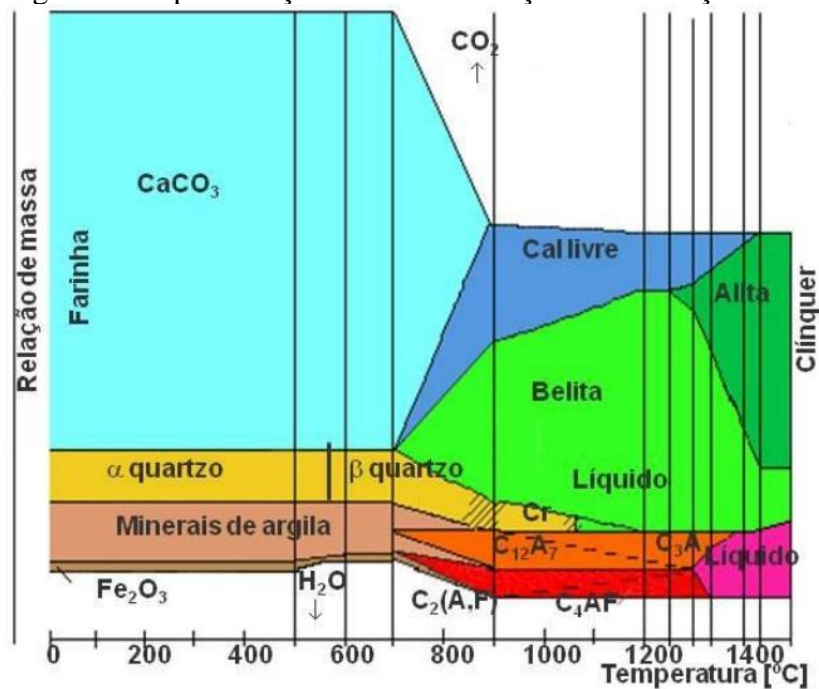
Segundo Pecchio (2013), depois de moído, o conjunto de matérias-primas é transportado para silos de armazenagem e homogeneização. Logo após este processo, a farinha é transportada ao forno onde é submetida a altas temperaturas, formando então um material conhecido como clínquer, sendo que este processo é dividido em duas partes principais: a torre de ciclones e o forno rotativo.

Segundo Lima (2009), a troca térmica entre material e gases na torre de ciclones ocorre no fluxo contracorrente ao sentido dos gases. Ou seja, a farinha é introduzida na parte inferior do duto ascendente de gás que sai do topo da torre e se interliga pela parte superior a outro ciclone instalado acima deste. O material então permanece em suspensão na corrente de gases fazendo com que aconteça a troca térmica entre eles.

Segundo de Paula (2009), nesta fase de produção são iniciadas as reações químicas, onde as partículas de farinha passam primeiro pelo pré-calcinador, onde atingem temperaturas próximas de 800 °C. Nesta fase a calcinação do carbonato de cálcio começa a acontecer atingindo até 95% de descarbonatação antes de entrar no forno rotativo.

Segundo Pecchio (2013), o forno rotativo de uma indústria cimenteira possui um maçarico proporcionando-o a chegar a temperaturas de até 2000 °C além de fornecer energia suficiente para que as transformações químicas, chamadas clinquerização, aconteçam. Com o aumento gradual da temperatura, sílica, alumina, óxido de ferro e óxido de cálcio reagem, como pode ser observado na FIG. 2.

Figura 2 - Representação das transformações na formação do clínquer Portland.



Fonte: Heinen, 2002, p. 59.

Segundo Pecchio (2013),  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , se combinam durante a clínquerização, dando origem às principais fases cristalinas do clínquer Portland:

- Alita ou silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) - principal composto do clínquer Portland presente em teores de 50% a 70% em peso e é responsável pelo desenvolvimento das resistências mecânicas dos cimentos às primeiras idades;
- Belita ou silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) - ocorre em teores que podem variar de 0,5% a 20% em peso e é responsável pelo desenvolvimento de resistências às idades mais avançadas;
- Aluminato cálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e ferro aluminato cálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) - ocorre preenchendo os espaços entre as fases silicáticas em teores médios de 10% a 18% em peso. O  $\text{C}_3\text{A}$  é um dos responsáveis pelo endurecimento inicial do cimento, chamado de pega.

Segundo de Paula (2009), no clínquer, as reações ocorrem no estado sólido em que as moléculas passam por um fenômeno de difusão iônica. Esta difusão tem sua velocidade aumentada na etapa onde a farinha se funde formando uma pasta viscosa, esta parte do processo é conhecida por fase líquida e é constituída principalmente por  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ .

O resfriamento do clínquer é umas das fases mais importantes de sua formação, pois dele depende a estabilidade do composto. Por isso, após sair do forno, o clínquer é resfriado em um processo de troca térmica, dentro de um resfriador, e em seguida é levado para silos de homogeneização.

Para o preparo do cimento, são moídas outras matérias-primas juntamente com o clínquer para compor diferentes tipos de cimento Portland. Os aditivos mais utilizados na produção dos cimentos compostos são, escórias de alto-forno, pozolanas e fíler calcário.

Na moagem destes materiais usam-se moinhos verticais ou moinhos tubulares com uma, duas ou três câmaras, funcionando em circuito aberto ou fechado. Quando há utilização de circuito fechado, usam-se separadores para rejeitar partículas mais grossas que retornam ao circuito de moagem. (MILANEZ; FERNANDES; PORTO, 2009).

Segundo de Paula (2009), após o processo de moagem ser concluído o cimento é produzido e em seguida expedido para o consumidor final. O cimento pode ser fornecido a granel, em sacos. O cimento granel é transferido para silos de armazenagem, em seguida transportado por caminhões, transporte ferroviário ou por navios. As principais embalagens dos sacos de cimento são compostas de papel Kraft de múltiplas folhas, fazendo com que o cimento fique protegido da umidade durante o manuseio e transporte.

### **4.3 Cimento**

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (2002), o cimento pode ser descrito como, “um pó fino com propriedades aglomerantes aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação de água”, sendo o material mais utilizado na construção civil. Existem vários tipos de cimento no mercado que são classificados de acordo com a dosagem das adições feitas, como escória, calcário e materiais pozolânicos.

#### **4.3.1 Tipos de cimento**

As determinações da qualidade e da quantidade de matérias-primas utilizadas na produção dos diversos tipos de cimento Portland, não podem atender à vontade unilateral de um produtor ou consumidor, para isso existe no país, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que prepara e divulga normas que são usadas no mercado como padrão de referência. Estas normas técnicas definem as características e propriedades mínimas que os cimentos Portland devem apresentar bem como os métodos empregado para verificação do atendimento às respectivas normas (ABCP, 2002).

No Brasil são fabricados vários tipos de cimento Portland, sendo diferenciados pelas quantidades dos compostos que são utilizados em sua fabricação. A TAB. 2 mostra os principais tipos de cimento produzidos no Brasil e suas respectivas composições.

Tabela 2 - Composição dos tipos de Cimentos Portland produzidos no Brasil

Tipos de Cimento	Siglas	Composição em massa %			
		Clínquer + Gesso	Escória de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Cimento Portland Comum	CP I CP I - S	95 -100 90-94	-	-	0 - 5 6-10
Cimento Portland Composto	CP II - E CP II - Z CP II - F	51-94 71-94 75-89	6-34 - -	- 6-14 -	0-15 0-15 11-25
Cimento Portland de Alto Forno	CP III	25-65	35-75	-	0-10
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	45-85	-	15-50	0-10
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	90-100	-	-	0-10
Cimento Portland Resistentes a Sulfatos	Todas as siglas acrescidas de RS	Conforme o tipo de cimento	Conforme o tipo de cimento	Conforme o tipo de cimento	Conforme o tipo de cimento

Fonte: Adaptado ABNT NBR 16697, 2018.

Como mostrado na TAB. 2, os diferentes tipos de cimento normalizados são apresentados pela sigla e pela classe de resistência. As siglas correspondem ao prefixo CP (Cimento Portland) sucedido de algarismos romanos de I a V, conforme o tipo do cimento. As classes de resistência são indicadas pelos números 25, 32 e 40 e apontam os valores mínimos de resistência à compressão garantidos pelos fabricantes, após a idade final de 28 dias.

#### 4.3.2 Adições

As adições utilizadas na produção de cimento são acrescentadas ao clínquer, a fim de produzir os diferentes tipos de cimento, como citado anteriormente. Além do gesso, que está presente em todos os tipos de cimento, têm-se três outras adições, como escórias de alto forno, pozolanas e material carbonático.

As escórias de alto-forno são um subproduto da indústria siderúrgica e se assemelham aos grãos de areia grossa. A escória de alto forno possui propriedades aglomerantes, porém estas propriedades não são ativadas pela água e sim pelo hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ )

proveniente da hidrólise do CaO presente no clínquer, ajudando assim na resistência final do cimento (LIMA, 2011).

Os materiais pozolânicos são rochas de origem vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas, podem ser naturais, artificiais, argilas calcinadas e cinzas volantes provenientes da combustão de carvão pulverizado (LIMA, 2011). Segundo Netto (2006), as pozolanas são materiais silicosos que em sua formação apresentam sílica na forma reativa. Quando apresentados em pequenas partículas e na presença de água, as pozolanas conseguem reagir com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades aglomerantes, como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratado.

Segundo Linhares (2010), o material pozolânico é utilizado como adição no cimento Portland devido à sua importância com relação às taxas de liberação de calor e o refinamento dos poros do concreto. No cimento, os materiais pozolânicos ajudam a diminuir o calor de hidratação, aumentam a resistência à compressão em idades avançadas, além de melhorar a trabalhabilidade do material (GOMES; SANTOS; NOGUEIRA, 2017, p. 8, tradução nossa).

Segundo Belato (2013), o material carbonático, também chamado de filer calcário, é composto por rochas trituradas que apresentam carbonato de cálcio em sua composição. Sua adição no cimento tem como objetivo torná-lo trabalhável. Isso ocorre porque as partículas moídas do material carbonático possuem dimensões adequadas para se alojarem entre as partículas dos demais componentes do cimento.

Além destes, todos os cimentos possuem a adição de gesso, que tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicione o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras (ABCP, 2002).

#### **4.4 Principais emissões atmosféricas na produção de cimento**

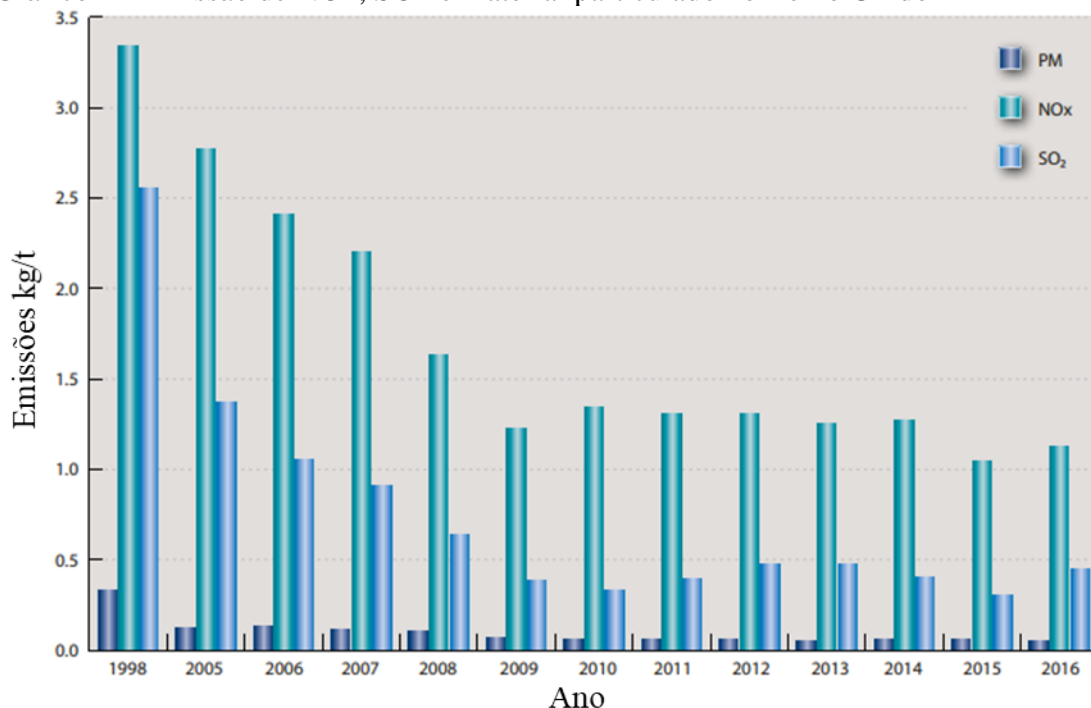
Aproximadamente 50% das emissões totais da indústria cimenteira são provenientes do processo produtivo. Destes, 40% são do processo de clínquerização e o restante é distribuído entre o transporte e a eletricidade (FERREIRA, 2010).

No Brasil, de acordo com Freire (2016) a indústria cimenteira, tem uma participação nas emissões de CO<sub>2</sub> muito significativa em relação à média mundial, representando cerca de 2,6%. Contudo, além de carbono, durante a produção de cimento são emitidos outros poluentes atmosféricos como material particulado, óxido de nitrogênio, óxido de enxofre, entre outros.



O GRAF. 1 ilustra as emissões de NOx, SOx e material particulado no Reino Unido, mostrando uma evolução na redução destes poluentes entre 2005 e 2016, tomando como ano base 1998.

Gráfico 1 - Emissão de NOx, SOx e material particulado no Reino Unido



Fonte: MPA Cement, 2017, p. 3.

#### 4.4.1 Material particulado

O material particulado (MP) é o conjunto de partículas sólidas ou líquidas presentes em suspensão na atmosfera. Seu tamanho pode variar de 0,001 a 500  $\mu\text{m}$ . As partículas menores que 10  $\mu\text{m}$  causam um grande agravo à saúde humana, pois ficam retidas no trato respiratório superior, sendo que partículas menores de 2,5  $\mu\text{m}$  tem um alto potencial de atingir os pulmões e se depositarem. Além dos riscos à saúde humana, a emissão de MP aumenta as taxas de reação na atmosfera e reduzem a visibilidade alterando os níveis de radiação solar que chegam ao solo, modificando sua temperatura e influenciando no crescimento das plantas (CARVALHO JR.; LACAVA, 2003).

A maior parte do material particulado emitido pela indústria do cimento apresenta um diâmetro entre 0,05 a 5,0  $\mu\text{m}$ . Em plantas de cimento sem controle de emissão de MP utilizando o processo de via seca, 42% da emissão de particulados apresentaram um diâmetro menor que

10  $\mu\text{m}$  e 18% apresentaram um diâmetro menor que 2,5  $\mu\text{m}$  (GUPTA et al, 2012, tradução nossa).

#### 4.4.2 Óxidos de nitrogênio

De acordo com Belato (2013), o NOx representa os óxidos óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), trióxido de Dinitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), tetróxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), entre outros. Sendo um poluente secundário, o NOx é capaz de formar substâncias que contribuem para a destruição da camada de ozônio quando reage com outros compostos químicos, proporcionando assim a formação da chuva ácida. Além disso, o NOx pode ser nocivo à saúde humana, pois ao entrar nas vias respiratórias, reage com a hemoglobina, fazendo com que a capacidade de transporte de oxigênio no organismo diminua.

Na indústria cimenteira, as altas temperaturas e a atmosfera oxidante dentro dos fornos rotativos de clínquer favorecem a formação de NOx, durante a queima dos combustíveis por três mecanismos principais, sendo eles o NO térmico, o NO do combustível e o NO imediato (BELATO, 2013).

Segundo Signoretti (2008), a principal rota de formação de NOx é o NO térmico, devido às temperaturas elevadas envolvidas na queima dentro do forno, pois o NO térmico é formado pela reação entre o oxigênio e o nitrogênio em fase gasosa.

Outro mecanismo de formação, chamado NO do combustível, é formado através da oxidação dos compostos de nitrogênio presentes no combustível. Estes compostos se volatilizam sendo que uma parte do nitrogênio é convertida em ácido cianídrico (HCN) e o restante em amoníaco (NH<sub>3</sub>). Já o NO imediato é produto da reação do nitrogênio atmosférico com os hidrocarbonetos. Esses óxidos têm essa denominação devido à sua alta velocidade de formação dentro do forno (SIGNORETTI, 2008).

#### 4.4.3 Óxidos de enxofre

O SOx engloba uma série de óxidos, porém, somente o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e o óxido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) são considerados importantes como gases poluentes. No meio ambiente o SO<sub>3</sub> reage com a água formando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), já o SO<sub>2</sub> reage com a água e forma o ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) (BELATO, 2013). A emissão de SO<sub>2</sub> na atmosfera pode causar prejuízos na fauna e na flora, para regiões vizinhas àquela em que está sendo emitido o gás, degradação do solo, entre outros problemas (MEYSTRE, 2016).

As principais fontes de enxofre na indústria cimenteira são os sulfatos e os sulfetos presentes na composição da farinha e do enxofre dos combustíveis. Durante o processo produtivo do clínquer, 50% a 90% do enxofre é absorvido e incorporado no clínquer ou emitido como material particulado. Uma parte desse enxofre fica retida no sistema na forma de incrustações ou como parte do ciclo volátil. Durante a combustão, grande parte do enxofre do combustível será oxidada em SO<sub>2</sub> (SIGNORETTI, 2008).

#### 4.4.4 Dióxido de carbono

Segundo Hasanbeigi, Price e Lin (2012), tradução nossa, na produção de uma tonelada de cimento são liberados em média de 0,73 a 0,99 toneladas de carbono. Segundo Bosoaga, Masek e Ondrej, (2009), tradução nossa, durante a fabricação de cimento, o CO<sub>2</sub> é gerado a partir de três fontes diferentes, descarbonatação de calcário no forno, combustão de combustível no forno e uso de eletricidade.

Durante o aquecimento da farinha, entre 400 °C a 500 °C, ocorre a decomposição do carbonato de magnésio (MgCO<sub>3</sub>) presente no calcário, liberando parte do CO<sub>2</sub> emitido durante a produção do clínquer. Outra reação que libera CO<sub>2</sub> é a calcinação, que consiste na decomposição do calcário em óxido de cálcio (EQ. 4). Essa reação é responsável por cerca de 50% do CO<sub>2</sub> liberado na atmosfera durante a produção do clínquer (BOSOAGA; MASEK; ONDREJ, 2009, tradução nossa).

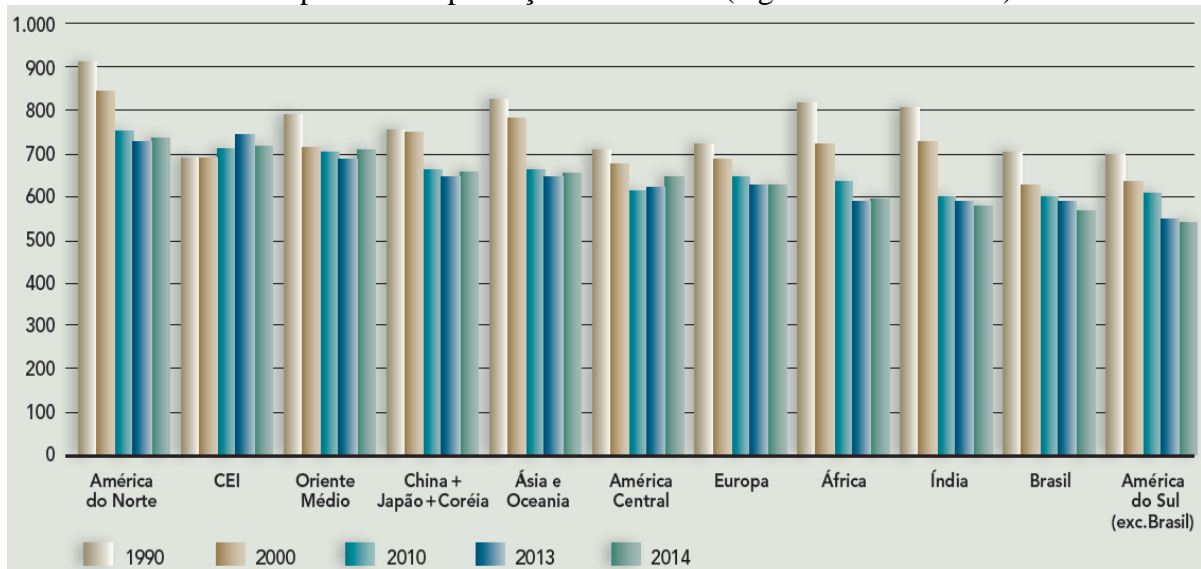


O restante do CO<sub>2</sub> emitido é resultante da queima de combustível utilizado para fornecer energia térmica durante o processo de calcinação. A queima dos combustíveis no forno de clínquer é outra fonte de liberação de CO<sub>2</sub>, que ocorre através da reação do carbono presente nos mesmos com o oxigênio presente no forno. Essa fonte é responsável por 40% das emissões de CO<sub>2</sub> durante a fabricação do cimento Portland (BOSOAGA; MASEK; ONDREJ, tradução nossa, 2009). Além disto, cerca de 5% do total de emissão provém da utilização de energia elétrica (HASANBEIGI; PRICE; LIN, 2012, tradução nossa).

O GRAF. 2 mostra que, entre os anos de 1990 e 2014, as emissões da indústria de cimento reduziram 18%, passando de 700 Kg CO<sub>2</sub>/ton cimento para 564 Kg CO<sub>2</sub>/ton cimento.

Enquanto isso, no mesmo período, a produção de cimento aumentou 277%, de 26 milhões para 72 milhões de toneladas (ABCP; SNIC, 2019).

Gráfico 2 - Emissão específica na produção de cimento (Kg CO<sub>2</sub>/ton cimento).



Fonte: ABCP & SNIC, 2019, p. 19.

#### 4.5 Legislação ambiental

Os limites de emissão de poluentes vêm se tornando cada vez mais rígidos no mundo. A legislação brasileira tem buscado seguir os padrões utilizados pelos países mais desenvolvidos.

A União Europeia tem como objetivo, a longo prazo, atingir níveis de qualidade do ar que não admitam riscos e impactos à saúde humana e ao ambiente. Suas políticas visam reduzir a exposição à poluição atmosférica mediante redução das emissões e imposições quanto aos valores-alvo e limites para a qualidade do ar (AEA, 2017).

A legislação europeia referente à emissão de poluentes, é a Diretiva 1999/30/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. O QUADRO 1, traz os valores-limite estipulados para NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> por esta Diretiva.

Quadro 1 - Valores-limite para NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

	NO <sub>2</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Período de amostragem	Valor-limite	Período de amostragem	Valor-limite
Valor-limite horário para proteção da saúde humana	1 hora	200 µg/m <sup>3</sup>	24 horas	125 µg/m <sup>3</sup>
	ano civil	40 µg/m <sup>3</sup>	ano civil	20 µg/m <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado, Diretiva 1999/30/CE, 2008, pag. 11.

Na mesma Diretiva pode-se encontrar os valores para emissão de material particulado, sendo de 50 µg/m<sup>3</sup> em 24 horas e 20 µg/m<sup>3</sup> para o ano civil.

De acordo com a Diretiva 2000/69/CE, o valor limite para CO é 10 mg/m<sup>3</sup> (0,01 ppm) média máxima diária de 8 horas.

No Brasil, a Resolução CONAMA 08/1990 aborda os limites máximos de emissão de poluentes no ar para os processos de combustão, porém, com as novas tecnologias aplicadas no país, elaborou-se a Resolução CONAMA 382/2006 que aborda todas as fontes fixas presentes na matriz energética brasileira. Na TAB. 3, têm-se os limites estabelecidos de emissão para MP e NO<sub>2</sub> provenientes de processos de produção de cimento.

Tabela 3 - Limites de emissão estabelecidos, em mg/Nm<sup>3</sup>.

Equipamentos	MP	NO <sub>2</sub>
Fornos	50 (1)	650 (3)
Resfriadores	50	N.A.
Moinhos de cimento	50	N.A.
Secadores de escória e de areia	50 (2)	N.A.
Ensacadeiras	50	N.A.

Fonte: Resolução Conama nº 382 de 2006, pag. 37.

Onde:

(1) – teor de oxigênio – 11%

(2) – teor de oxigênio – 18%

(3) – teor de oxigênio – 10%

N.A. – não aplicável.

Em 2018 entrou em vigor a Resolução CONAMA 491/2018, que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar, “considerando como referência os valores de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005”. Estes padrões são estabelecidos conforme o Anexo I da Resolução e estão ilustrados na TAB. 4.

Tabela 4 - Padrões de qualidade do ar.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	ppm
Material Particulado - MP <sub>10</sub>	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP <sub>2,5</sub>	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual <sup>1</sup>	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO <sub>2</sub>	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual <sup>1</sup>	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO <sub>2</sub>	1 hora <sup>2</sup>	260	240	220	200	-
	Anual <sup>1</sup>	60	50	45	40	-
Ozônio - O <sub>3</sub>	8 horas <sup>3</sup>	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas <sup>3</sup>	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual <sup>4</sup>	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb <sup>5</sup>	Anual <sup>1</sup>	-	-	-	0,5	-

<sup>1</sup> - média aritmética anual  
<sup>2</sup> - média horária  
<sup>3</sup> - máxima média móvel obtida no dia  
<sup>4</sup> - média geométrica anual  
<sup>5</sup> - medido nas partículas totais em suspensão

Fonte: Resolução Conama nº 491 de 2018, pag. 4.

Em que:

PI: padrões de qualidade do ar intermediários;

PF: padrão de qualidade do ar final.

Nos últimos 30 anos a legislação brasileira buscou diminuir os danos ambientais causados pelas emissões de poluentes na atmosfera, através de resoluções e leis repressivas para quem não cumprir os padrões de emissão. Nesse período, alguns estados definiram suas próprias legislações sobre poluição atmosférica (MAGALAR, 2009).

Em Minas Gerais, um dos maiores polos cimenteiros, com 17 fábricas, a legislação mais recente sobre os limites de emissão de poluentes industriais é a Deliberação Normativa COPAM 187/2013, que “estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas e dá outras providências”. O Anexo VIII, da Deliberação Normativa traz as condições e limites estipulados para poluentes provenientes das indústrias de cimento, demonstrados na TAB. 5.

Tabela 5 - Condições e limites para indústrias de cimento Portland em mg/m<sup>3</sup>

Equipamento	MP	Óxido de Nitrogênio	
Fornos com coprocessamento de resíduos	50 (11% de O <sub>2</sub> )	Fonte nova	450 (11% de O <sub>2</sub> )
		Fonte existente	730 (11% de O <sub>2</sub> )
Fornos sem coprocessamento de resíduos	50 (11% de O <sub>2</sub> )	Fonte nova	650 (10% de O <sub>2</sub> )
		Fonte existente	1000 (10% de O <sub>2</sub> )
Resfriadores de clínquer	50		
Moinho de Cimento	50		
Secador de escória e de areia	50 (18% de O <sub>2</sub> )		Não Aplicável
Ensacadeira	50		
Moinho de Combustível	50		
Outras Fontes	50		

Fonte: Adaptado, COPAM 187/2013, 2013, pag. 44.

Com os valores apresentados anteriormente, pode-se observar que o Brasil, a partir da Resolução Conama nº 491 de 2018 estabelece valores maiores permitidos, em comparação com a Europa, para emissão de material particulado, sendo 120 µg/m<sup>3</sup> no Brasil e 50 µg/m<sup>3</sup> na Europa, e NO<sub>2</sub>, sendo 260 µg/m<sup>3</sup> no Brasil e 200 µg/m<sup>3</sup> na Europa. O mesmo acontece se comparado o valor-limite para emissão de CO, analisando em ppm, na Europa esse valor seria de 0,01 e no Brasil, de 9. Porém para os valores de emissão de SO<sub>2</sub>, em 24 horas, se mostram os mesmos (125 µg/m<sup>3</sup>) havendo diferença apenas para os valores do ano civil, sendo de 40 µg/m<sup>3</sup> no Brasil e 20 µg/m<sup>3</sup> na Europa.

## 5 METODOLOGIA

A abordagem do trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica e descritiva, baseada em pensamentos e experimentos de autores diversos, analisando artigos científicos, teses, dissertações, relatórios, a legislação ambiental e sites especializados para compor as informações apresentadas no trabalho e, assim, realizar a fundamentação teórica deste trabalho. Estes meios de pesquisa foram utilizados por conter maior respaldo científico, garantindo que o trabalho tenha informações confiáveis.

O universo determinado para a pesquisa abrange trabalhos divulgados a partir do ano 2000 no Brasil e em outras partes do mundo, pesquisados em sites como Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, Scielo, Academia.edu, Science Direct, sendo possível gerar conhecimentos e analisar as técnicas utilizadas com objetivo de reduzir as emissões de poluentes gerados pelas indústrias cimenteiras distribuídas por todo o mundo.

Inicialmente, fez-se uma contextualização sobre a indústria de cimento e seu processo produtivo, posteriormente procedeu-se a uma análise sobre os gases provenientes destes processos e outros impactos ambientais gerados por tal processo. Por fim, foram estudadas as principais tecnologias empregadas para controle destas emissões.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com às tendências de sustentabilidade ambiental as indústrias de cimento, vêm buscando realizar ações para reduzir ou prevenir os efeitos da degradação da qualidade do ar. A gestão destas ações envolve a estruturação de controles para poluição e apoio na implementação de tecnologias menos poluentes, de forma a ser compatível com o desenvolvimento social e industrial (SIGNORETTI, 2008). Vendo esta necessidade das empresas produtoras de cimento, a organização World Business Council for Sustainable Development (Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável – WBCSD) criou o projeto Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (Cement Sustainability Initiative – CSI) que reuniu os 18 maiores produtores mundiais de cimento a fim de desenvolver novas estratégias para minimização dos impactos causados pela produção de cimento (ABCP, SNIC, 2019).

A partir da CSI, a ABCP em conjunto com a SNIC lançou em 2019 um roteiro tecnológico chamado Mapeamento Tecnológico do Cimento (Cement Technology Roadmap) mostrando medidas que podem ser aplicadas para a redução de carbono nas plantas de cimento, como por exemplo a captura e armazenamento de carbono e a utilização de combustíveis alternativos (ABCP, SNIC, 2019).

Porém, além de carbono, as cimenteiras devem se preocupar também com as emissões de material particulado, NOx e SOx e algumas técnicas também podem ser introduzidas com intuito de minimizar o impacto destes poluentes, como filtros de processo para retenção de material particulado e retenção de enxofre por absorção química.

Algumas técnicas em desenvolvimento e algumas já utilizadas serão abordadas nos próximos tópicos deste capítulo.

### 6.1 Eficiência térmica e elétrica

Entre os anos 70 e 80 a indústria de cimento do Brasil conseguiu a substituição quase total dos fornos via úmida por via seca, o que significa o aumento da capacidade produtiva, com instalações cada vez mais modernas e, assim, proporcionando o menor consumo energético comparado com os outros países (ABCP, SNIC, 2019). Segundo o Mapeamento Tecnológico do Cimento o setor obteve redução de 17% na intensidade térmica devido esta mudança.

Para Campos (2007), uma opção seria a cogeração de energia, onde os gases de combustão do forno rejeitados na etapa de clínquerização são usados para a produção de energia

elétrica através da troca de calor entre os gases e a água dentro de uma caldeira. Na caldeira, a água é transformada em vapor que passaria por uma turbina conectada a um gerador elétrico. Após isso, o vapor seria condensado e bombeado novamente para a caldeira, fechando um ciclo chamado de Ciclo de Rankine.

Li & Kong<sup>1</sup> ([200-] *apud* CAMPOS, 2007, p. 24) sugerem substituir a torre de ciclones por um reator de leito fluidizado, instalado na entrada do forno. Para isso, os gases que saem do forno seriam usados no processo de calcinação dentro do reator. Posteriormente, os gases seriam conduzidos a uma caldeira de recuperação para transformação de vapor e, em seguida, em energia elétrica. De acordo com Li & Kong, uma planta na China utiliza este processo em sua linha produtiva, o forno rotativo da empresa produz apenas 550 toneladas por dia de clínquer, porém a energia elétrica gerada consegue suprir as demandas da fábrica.

A utilização do Ciclo de Rankine nas plantas de cimento se mostra promissora graças à grande quantidade de gases que saem do forno. A utilização deste modelo vem sendo feita em fábricas da Flórida e na Califórnia. Já a sugestão de Li & Kong não se tornaria viável em fábricas já existentes, pois necessita de mudanças estruturais para sua implementação.

No Brasil há um exemplo de aplicação em Quixeré-CE, na fábrica de cimento Apodi, sendo a primeira do Brasil a utilizar este tipo de tecnologia. A planta gera de 4,5 a 6 megawatts de energia, representando de 25% a 30% da energia consumida pela própria planta (CIMENTO APODI, [200-]).

## 6.2 Combustíveis alternativos

Atualmente, os combustíveis mais utilizados nos fornos de clínquer são o coque de petróleo e carvão, que possuem altos teores de carbono, que conseqüentemente geram grandes quantidades de CO<sub>2</sub>. (FERREIRA, 2010). Segundo Belato (2013), com a intenção de diminuir o consumo destes combustíveis fósseis durante o processo produtivo, a indústria de cimento passou a adotar a prática do coprocessamento, que consiste na queima, dentro dos fornos rotativos de clínquer, de resíduos industriais, pneus descartados, biomassa, entre outros que, por ter um alto poder calorífico, são utilizados como combustíveis alternativos.

Com os crescentes investimentos do coprocessamento, a indústria de cimento vem alcançando a substituição dos combustíveis fósseis por resíduos e biomassas. No período de

---

<sup>1</sup> LI, J., KONG, J. A Co-Generation Process for Clinker and Electricity in Portland Cement Plants, Institute of Cement – China Building Materials Academy, Beijing.

2000 a 2014, as cimenteiras conseguiram aumentar a participação destes combustíveis alternativos de 9% para 15%, diminuindo as emissões de CO<sub>2</sub> (ABCP, SNIC, 2019).

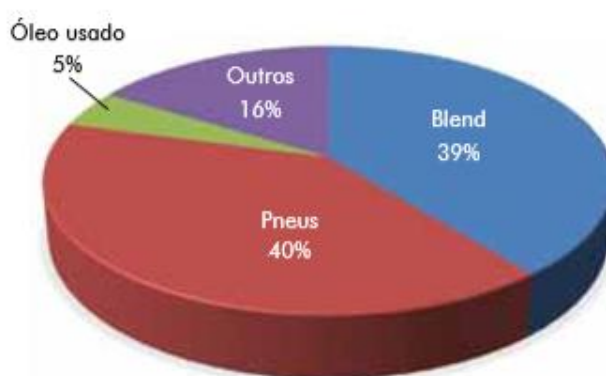
Nos casos de utilização de resíduos com poderes caloríficos elevados, consegue-se a valorização energética deles, permitindo assim, a redução dos custos com combustíveis, além da redução da emissão de CO<sub>2</sub> e presta à sociedade um serviço seguro, visto que a indústria se desfaz dos resíduos, diminuindo os descartes em aterros (FERREIRA, 2010).

Ao mesmo tempo, o coprocessamento evita a emissão de gases do efeito estufa que esses resíduos gerariam caso fossem destinados aos aterros ou incineradores (ABCP, 2017). Alguns tipos de combustíveis alternativos que podem ser utilizados são: combustíveis gasosos (gases de refinaria, gás de pirólise, gás de aterro), combustíveis líquidos (isentos de halogéneos, solventes, óleos minerais, óleos hidráulicos) e combustíveis sólidos (resíduos de madeira, plásticos, resíduos agrícolas) (HENDRIKS et al, 2003, tradução nossa).

De acordo com dados divulgados pela ABCP, em 2016, no Brasil, havia 36 plantas licenciadas. Com isso, houve um aumento na ordem de 500%, entre 2000 e 2016, na utilização de resíduos nos fornos de clínquer (ABCP, 2017).

A FIG. 3, mostra o perfil de utilização dos combustíveis alternativos utilizados para substituição dos combustíveis fósseis. Dos substitutos utilizados, destacam-se os pneus reversíveis e o blend, que é a mistura entre vários tipos de resíduos.

Figura 3 - Utilização de combustíveis alternativos (% por poder calorífico)



Fonte: ABCP, 2017, p. 17.

### 6.3 Adições ou substitutos de clínquer

Uma das medidas tomadas tem sido promover a utilização do cimento de tipo II, em substituição dos cimentos de tipo I, pois estes utilizam cerca de 95% de clínquer em sua

composição, enquanto no cimento de tipo II são adicionados outros materiais. A utilização do cimento de tipo II possibilita a redução de CO<sub>2</sub> e um menor consumo de energia elétrica na moagem (FERREIRA, 2010).

A produção de cimento com adições ao clínquer, além de diversificar as aplicações e características do cimento, vem como uma solução socioambiental para subprodutos de outros processos produtivos, como a escória de alto-forno e para a preservação de recursos naturais não renováveis (ABCP, SNIC, 2019).

Dentre os vários substitutos já utilizados destacam-se a escória de alto forno, as pozolanas e o calcário. Estes aditivos são usados de acordo com o tipo de cimento que será produzido, porém, a utilização destes depende da região onde se encontra a planta para que se torne viável, visando explorar produtos fáceis de encontrar e com baixo custo para a produção. Sendo assim, o foco principal da indústria não seria o impacto ambiental através da redução de CO<sub>2</sub> emitido, mas sim a redução de custos que esta manobra traz.

A fábrica da Votorantim Cimentos de Porto Velho, por exemplo, passou a produzir cimentos com adição de pozolanas de argilas calcinadas a fim de reduzir custos de operação já que o a região onde a planta se encontra é deficiente de depósitos de calcário além de possuir um alto custo de transporte de outras minas (CIMENTO.ORG, 2015).

Para que seja possível aumentar a proporção de aditivos na produção de cimento, a ABCP, estuda quais os teores máximos de substitutos que podem ser adicionados juntos ao clínquer sem que estes interfiram na qualidade final do cimento. Em 2018, por exemplo, os teores de adição de calcário foram alterados, passando de 10% para 25% no cimento composto com adição de fíler e a adição de escória passou de 70% para 75% no cimento Portland de alto forno. Na Europa, o teor máximo de calcário atinge 35% (ABCP, 2012).

#### **6.4 Captura e armazenamento de carbono**

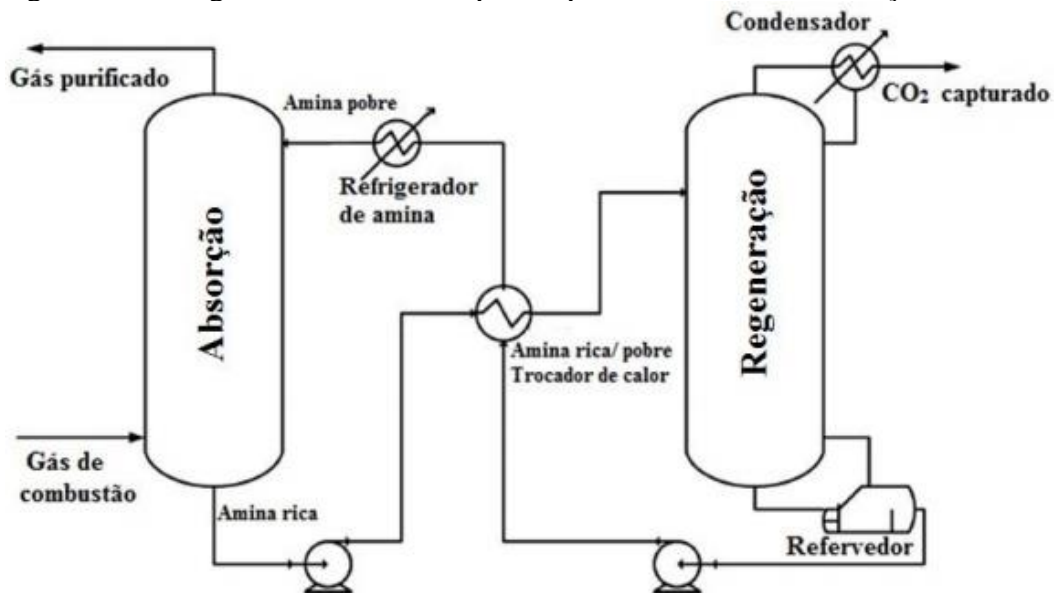
A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) é um conjunto de técnicas de separação, transporte e armazenamento de dióxido de carbono emitido nas mais variadas atividades humanas. De acordo com o Centro de Excelência e Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono (CEPAC) (2009), este processo é uma importante opção na redução das emissões atmosféricas dos gases do efeito estufa.

Nas plantas de cimento existem aplicações somente para a captura de carbono, porém, as técnicas aplicadas estão voltadas para aquelas não necessitam de uma mudança significativa

processo produtivo do cimento (ABCP, SNIC, 2019). Um exemplo é o método de absorção química, que consiste na separação de CO<sub>2</sub> dos demais gases por meio de solução química.

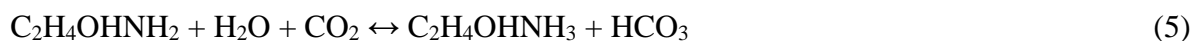
A FIG. 4 mostra o fluxograma simplificado da captura de CO<sub>2</sub> com uso de aminas. De acordo com Herzog e Golomb, (2004), tradução nossa, quando esta tecnologia é utilizada em sistemas de pós-combustão de CO<sub>2</sub>, o gás é borbulhado com um solvente em uma coluna absorvente. Em seguida, o solvente passa em um regenerador onde é separado o CO<sub>2</sub>, utilizando vapor em contracorrente. O vapor é condensado, originando um fluxo de CO<sub>2</sub> de alta concentração, que pode ser comprimido para estocagem ou para utilização comercial.

Figura 4 - Fluxograma convencional para captura de CO<sub>2</sub> com utilização de amina.



Fonte: Miranda, et al, 2018, p. 13

O principal solvente utilizado para absorção de CO<sub>2</sub> é o monoetanolamina, conhecido como MEA (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>OHNH<sub>2</sub>), uma amina primária, comumente utilizada para absorver gases à baixa pressão devido sua baixa massa molar (MELLO, 2013). A reação de absorção entre solvente e CO<sub>2</sub> é ilustrada pela EQ. 5.



Para Oliveira (2015), no setor de cimento, o processo disponível economicamente seria o de pós-combustão com absorção química. Nos estudos feitos por Oliveira, este tipo de processo apresenta um potencial de captura de 5917 tCO<sub>2</sub>/h. Os dados apresentados foram obtidos por simulação utilizando ferramentas de controle e contou com dados de eletricidade necessários em plantas que utilizam coque de petróleo e gás natural.

Atualmente, há vários estudos sobre de absorção de CO<sub>2</sub> pelo concreto, porém não se pode dizer que esta é uma inovação do meio industrial, tampouco um benefício ambiental gerado pelas indústrias, já que o processo ocorre de forma natural em todas as estruturas construídas a partir deste material. Porém, é importante compreender o funcionamento do processo de absorção de carbono pelas construções de concretos, já que o concreto está presente nas mais diversas estruturas.

Segundo Possan, Fogaça e Pazuch (2012), o concreto tem a capacidade de capturar CO<sub>2</sub> da atmosfera através de um processo chamado carbonatação, fenômeno físico-químico proveniente de reações dos gases ácidos com os produtos alcalinos do concreto. A captura acontece através do aprisionamento do CO<sub>2</sub> pelo hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), gerando carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), em um processo inverso ao da produção do cimento, como ilustrado na FIG. 5.

Figura 5 - Produção de cimento versus carbonatação do concreto.



Fonte: FELIX, POSSAN, 2018, pag. 2.

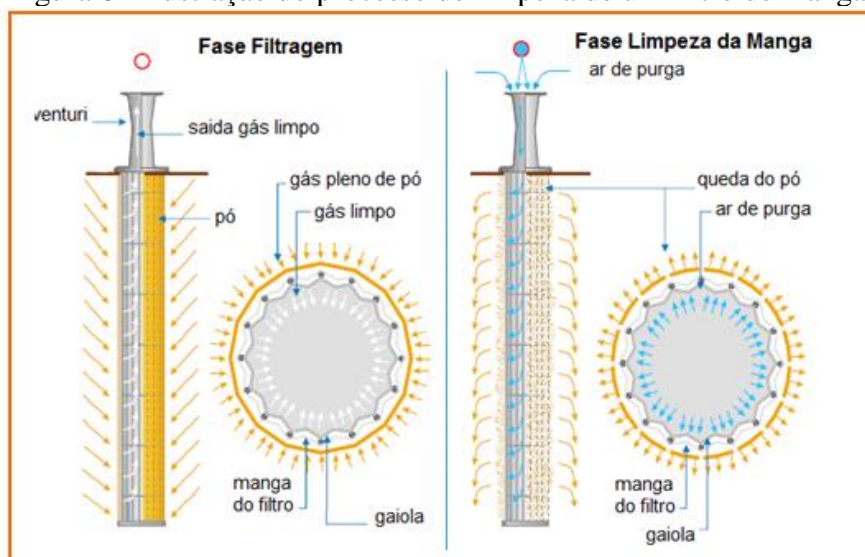
Para Felix e Possan (2018), a carbonatação do concreto é dependente das condições de exposição e das dimensões do material. Existem divergências na literatura em relação ao potencial de captura de CO<sub>2</sub> pela carbonatação do concreto, com valores que variam de 7,6% a 57%. Isso acontece devido aos diversos fatores que influenciam o fenômeno de carbonatação como, resistência do material, ambiente de exposição da estrutura, quantidade de cimento utilizada para produção do concreto, idade da estrutura, entre outros (POSSAN; FOGAÇA; PAZUCH, 2012).

## 6.5 Material particulado

Segundo Belato (2013), os principais equipamentos usados para coletar os MP em fábricas de cimento são os filtros de mangas e os precipitadores eletrostáticos. De acordo com Sutherland (2008), tradução nossa, nos filtros de manga os gases carregados de MP passam através dos poros do tecido filtrante, onde as partículas maiores que esses poros ficam retidas e depositadas na superfície dos tecidos.

Durante a fase de limpeza, o fluxo de gases, por um instante, é convertido em pulsos de ar comprimido, graças a isso, a manga é inflada até formar um círculo, conforme ilustra a FIG. 6. Desta forma, a poeira aderida à superfície externa, cai até uma moega de coleta de pó, posicionado no fundo do filtro.

Figura 6 - Ilustração do processo de limpeza de um filtro de mangas

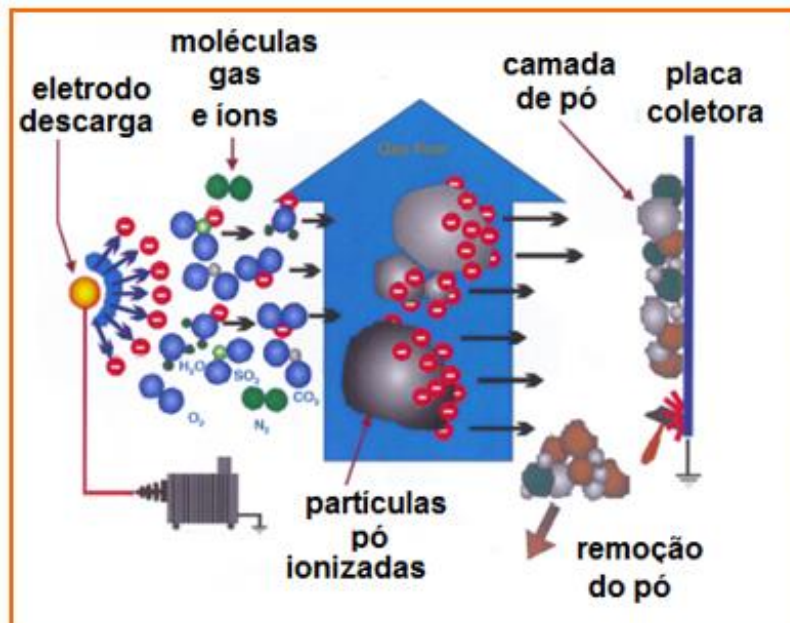


Fonte: Votorantim, [200-], p. 10.

A eficiência desses filtros irá depender da qualidade e manutenção do equipamento e dos tecidos que estão sendo utilizados, sendo possível alcançar 99% de eficiência, quando respeitadas as condições do equipamento.

Os precipitadores eletrostáticos têm como princípio de funcionamento o uso de forças eletrostáticas para a coleta do material particulado presente nos gases de exaustão. As partículas de poeira são carregadas negativamente por um eletrodo de descarga e são atraídas por eletrodos de coleta carregados positivamente. Após coletadas por esses eletrodos, as partículas são descarregadas através de batidas no coletor e recolhidas (KARSTENSEN, 2010, tradução nossa), a FIG. 7 ilustra a interação das partículas de material com os eletrodos de coleta.

Figura 7 – Ilustração do funcionamento de precipitador eletrostático.



Fonte: Votorantim, [200-], p. 10.

Uma desvantagem na utilização dos precipitadores eletrostáticos nas fábricas de cimento é o fato de serem suscetíveis a alterações do processo com os picos de emissão de CO, o que não ocorre com os filtros de manga (KARSTENSEN, 2010, tradução nossa). Pelo fato de o CO ser um gás inflamável, suas altas concentrações dentro do precipitador eletrostático ativam um dispositivo de segurança que desliga o equipamento para que não ocorram explosões. Por consequência, este processo faz com que o material retido seja liberado de uma só vez na atmosfera, provocando uma nuvem de poeira em todo o entorno da planta de cimento (BELATO, 2013).

Segundo Oliveira (2015), embora o filtro de mangas, em comparação aos filtros eletrostáticos, apresente um consumo de energia 15% maior, sua eficiência no controle de emissão de particulados nos fornos de clínquer é melhor, já que o filtro de mangas não desliga independente das modificações que ocorrem no processo.

## 6.6 Controles para emissão de NOx

Segundo Signoretti (2008), é possível diminuir as emissões de NOx, atuando sobre a temperatura e a concentração de oxigênio nos fornos de combustão. Esses métodos são divididos em pré-combustão (preventivos) e pós-queima (corretivos), conforme apresentado no QUADRO 2, e dividido em três categorias: modificação do processo (visa a produtividade e



eficiência do processo), controle da combustão (buscar reduzir a formação de NO<sub>x</sub>) e o controle através da remoção de NO<sub>x</sub> formado no processo de combustão.

Quadro 2 - Principais tecnologias de controle das emissões de NO<sub>x</sub>.

Tipo de método	Nome do método	Característica
Métodos pré-combustão (preventivos)	Recirculação dos produtos da combustão	Diminuição da temperatura e da concentração de oxigênio no núcleo da chama
	Combustão por etapas ou estagiada	Diminuição da temperatura e da concentração de oxigênio no núcleo da chama
	Queimadores com baixa emissão de NO <sub>x</sub>	Diminuição da temperatura e da concentração de oxigênio no núcleo da chama
	Injeção de água e vapor	Diminuição da temperatura e da concentração de oxigênio no núcleo da chama
	Combustão em leito fluidizado	Temperaturas de combustão menores que em sistemas convencionais para combustíveis sólidos pulverizados
Métodos pós-combustão (corretivos)	Redução catalítica seletiva (SCR)	Redução do NO <sub>x</sub> até N <sub>2</sub> por injeção de amônia com o uso de catalisadores
	Redução não catalítica seletiva (SNCR)	Redução do NO <sub>x</sub> até N <sub>2</sub> por injeção de amônia sem o uso de catalisadores

Fonte: Signoretti, 2008, pag.57.

A modificação do controle de processos na maioria das vezes reduz o consumo de energia, torna os equipamentos mais duráveis e melhora a eficiência do combustível, entre outros (SIGNORETTI, 2008).

Dentre os muitos elementos que podem ser modificados ao longo do processo, pode-se citar a adição de pequenas quantidades de escória de alto-forno ao material alimentado no forno, isto faz com que a utilização de combustível necessário para a formação do clínquer no forno seja reduzida, pois as reações necessárias para converter a escória de alto forno em clínquer já acontecem nos fornos das siderúrgicas (SIGNORETTI, 2008).

Segundo Signoretti (2008), o controle da combustão é feito através de sua modificação, onde o nível de concentração de oxigênio na chama é modificado, fazendo com que o NO<sub>x</sub> seja reduzido. De acordo com Mantegazza (2004), este controle pode acontecer através da combustão estagiada do ar e com o uso de queimadores de baixo NO<sub>x</sub> e queima no meio do forno.

A combustão estagiada consiste na divisão do processo em duas partes. Uma parte com a zona de combustão primária rica em combustível, ou seja, com pouca disponibilidade de O<sub>2</sub>, e a segunda parte, com baixa temperatura de pico seguida pela injeção de ar secundário para auxiliar na queima do combustível (DIP, 2004).

Os queimadores com emissão baixa de NO<sub>x</sub> tem como princípio de operação o atraso da combustão através da entrada de ar e combustível em diferentes estágios. O queimador diminui a concentração de oxigênio na seção inicial da chama através do processo aerodinâmico, levando uma diminuição de até 30% das emissões de NO<sub>x</sub> (RAMOS, 2015)

O controle de remoção baseado na tecnologia pós-combustão consiste na eliminação do NO<sub>x</sub> após sua formação no processo de combustão. Essa remoção pode ser feita através de remoção catalítica seletiva (Selective Catalytic Removal – SCR) e pela redução catalítica não seletiva (Non-Selective Catalytic Reduction – SNCR) (SIGNORETTI, 2008).

Na SCR, o NO<sub>x</sub> é reduzido pela presença de NH<sub>3</sub> em catalisadores, resultando na formação seletiva de nitrogênio (BRITO, 2015). Na SNCR, segundo Signoretti (2008), a redução do NO<sub>x</sub> também acontece através de injeção de amônia ou ureia, porém ocorre sem a utilização de catalisadores com isso, estas são adicionadas na saída do forno.

De acordo com Tanabe (2006), tradução nossa, as principais reações que acontecem durante o processo, sem utilização de catalisador, são as seguintes (EQ. 6 e EQ. 7):



O catalizador utilizado no processo SCR é o pentóxido de vanádio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) suportado em dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) estabilizado por óxido de tungstênio (TANABE, 2006). Na indústria cimenteira devido à alta concentração de partículas, é recomendado que o sistema de redução catalítica seja instalado após um dispositivo coletor de particulado, para que não ocorra a inibição do catalisador por meio dessas partículas (SIGNORETTI, 2008).

De acordo com Brito (2015), a reação sem catalisador tem bons rendimento somente em temperaturas acima de 800 °C, por isso a utilização do catalizador se torna mais conveniente pois as reações acontecem entre 160 °C e 450°C.

A diminuição da emissão de NO<sub>x</sub> pela indústria cimenteira não depende especialmente da instalação de equipamentos, mas sim de alguns fatores como o estabelecimento de parâmetros do processo e de condições do forno. Com esses dados de controle é possível estabilizar as reações do forno e aperfeiçoar o processo de queima. Consequentemente,

consegue-se melhorar a qualidade do clínquer, aumentar a vida útil da fábrica e, principalmente, reduzir a emissão de NOx devido à melhor eficiência na queima de combustível (US EPA, 2007, tradução nossa).

## 6.7 Controle das emissões de SOx

Segundo Signoretti (2008), umas das formas de diminuir a emissão de SOx seria através da retenção do óxido de enxofre na moagem de matéria-prima por meio da reação do calcário pulverizado presentes nos gases quentes saídos do forno, usados durante a moagem de farinha que, juntamente com altas concentrações de umidade, criam condições favoráveis para a absorção de SO<sub>2</sub> pelo carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) vindo da moagem do calcário, conforme a reação mostrada na EQ. 8.



De acordo com Seebach, Young e Miller (2001), tradução nossa, o excesso de SO<sub>2</sub> dos gases pode ser reduzido para menos de 160 mg/Nm<sup>3</sup> na passagem do exaustor do moinho.

Outra forma de redução estudada para remoção é a injeção de cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>) na torre de ciclones, acontecendo preferencialmente onde o enxofre está sendo convertido em SO<sub>2</sub>. O princípio de funcionamento é parecido com a absorção feita na técnica anterior, onde o SO<sub>2</sub> é parcialmente absorvido pela cal. A eficiência de remoção é de 45% a 70% e a quantidade de cal injetada varia de 3 a 5 mols de cal por mol de SO<sub>2</sub> (SIGNORETTI, 2008).

Uma das técnicas mais simples de implantação é a utilização de combustíveis com teores baixos de enxofre em sua composição, como o coque de petróleo de baixo teor de enxofre, finos de coque, moinha, carvão mineral, dentre outros. Porém, a presença de enxofre no forno de clínquer tem consequências benéficas, como a melhora da queimabilidade da farinha e influência na resistência do cimento produzido (LIMA, 2013). Por isso, os níveis de enxofre devem ser controlados de acordo com a necessidade da operação.

## 6.8 Cimentos alternativos

Além das técnicas apresentadas a fim de diminuir os impactos causados durante a produção de cimento, alguns estudos e teorias propõem alterações na composição do cimento a fim de tornar o produto mais ecológico e reduzir seus impactos ambientais.

O australiano Harrison estudou a substituição do carbonato de cálcio por carbonato de magnésio, segundo ele, a troca, primeiramente, diminuiria a temperatura do forno industrial, de 1450 °C para 650 °C. Assim, apenas metade da energia utilizada no processo convencional seria utilizada (FÓRUM DA CONSTRUÇÃO, 2013).

Segundo Fernandes e Martendal ([200-]), o ecocimento apresenta maior durabilidade se comparado com o cimento Portland, porém a mineração para obtenção do carbonato de magnésio possui alto custo inviabilizando a sua implantação.

Outra proposta, feita por engenheiros europeus, é a fabricação de cimento através de uma bactéria chamada *Sporosarcina pasteurii*, que vive no solo e é cultivada em uma mistura de ureia e nutrientes. Dentro desta mistura a bactéria começa a se desenvolver e depois de três horas de fermentação, está pronta. Para que seja usada, a mistura deve ter a adição de areia, cinzas de casca de arroz e resíduos de cimento convencional (TIANO et al, 2015, tradução nossa).

Testes realizados mostram que este tipo de cimento pode ser utilizado em paredes, mas não é resistente suficiente para substituir o concreto tradicional. Para que o biocimento seja produzido em larga escala, a equipe de engenheiros busca formas de tornar a bactéria mais eficiente e produtiva (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2015).

As propostas apresentadas não estão implantadas na indústria, pois o mercado da construção civil é conservador e consistente em todo o mundo. Porém, estas propostas podem ser aprofundadas e testadas de forma a ser implantadas no futuro como substitutos do cimento como se é conhecido atualmente.

## **6.9 Desenvolvimento sustentável**

Na Europa, muitas mudanças aconteceram devido a leis mais rigorosas, melhoria na eficiência energética além de uma forte tendência da indústria em abandonar certos tipos de produção fortemente poluente. Com isso, muitas empresas passaram a participar de programas voluntários destinados a reduzir seus impactos ambientais (EEA, 2019).

Com o intuito de redução do impacto ambiental das indústrias na União Europeia, foram introduzidos critérios de sustentabilidade para adoção generalizada de práticas gerenciais voltadas ao meio ambiente, como o Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria e a ISO 14001. Iniciativas voluntárias como Responsible Care da indústria química, Global e-Sustainability e a política do Conselho de Administração do Conselho Internacional de Mineração e Metais também foram implementadas (EEA, 2019).

Pode-se dizer que as empresas europeias mantêm seus controles rígidos em relação a emissão de poluentes devido ao rigor empregado pelos órgãos governamentais. De acordo com a Agência Europeia do Ambiente (EEA) (2013), o estado membro da União Europeia, que exceder os valores limites estipulados, deve comunicar o fato à Comissão Europeia e esclarecer as razões. Além disso, os estados são obrigados a organizar planos que descrevam o modo como melhoraram a qualidade do ar em sua região.

Na Noruega, por exemplo, a fábrica de cimento da Norcem trabalha desde 2013 para ser a primeira no mundo totalmente livre de carbono através de técnicas de captura e armazenamento de carbono. Além disso, a fábrica substituiu cerca de 70% de seu combustível por alternativas baseadas em resíduos (NEO MUNDO, 2018). A Norcem está envolvida para que a emissão zero aconteça até 2030, buscando implementar as técnicas de CCS juntamente com o desenvolvimento de outros tipos de cimento, aumento da porcentagem de combustíveis alternativos durante a produção de clínquer e novas formas de armazenamento de carbono (NORCEM, ([201-]).

Mudanças como as ocorridas na Europa podem ocorrer também no mercado nacional brasileiro, à medida que o país se desenvolver e implementar novas tecnologias de equipamentos para implementação das diversas técnicas apresentadas, além do coprocessamento, que vem crescendo fortemente no país.

A elaboração do Mapeamento Tecnológico traz a projeção de cenários a longo prazo, com isso permite que o país consiga adquirir novos conhecimentos de técnicas desenvolvidas que na Europa e Índia já são utilizadas e com isso apresentar avanços tecnológicos baseados em experiências internacionais (SANTOS, 2014).

Porém, a indústria brasileira já vem se esforçando e apresentando grandes resultados em eficiência energética e processamento de resíduos. Por exemplo na fábrica da Lafarge instalada em Cantagalo-RJ, que inovou e criou uma parceria com a prefeitura local, utilizando todo o lixo urbano reciclável da cidade como combustível durante a produção.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo dos conceitos apresentados pelos trabalhos estudados, foi possível descrever as etapas de fabricação do cimento, os impactos que são gerados pela mesma e as leis ambientais que as regem. Ainda foi possível abordar e conhecer os recursos e inovações utilizados para minimizar as consequências da emissão de material particulado, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> na produção de cimento.

As principais técnicas de controle em utilização pela indústria cimenteira são: a utilização dos combustíveis alternativos através do coprocessamento, o uso de combustíveis com baixo teor de enxofre para controle de formação de SO<sub>x</sub> dentro do forno e a substituição de clínquer por aditivos, reduzindo assim as emissões de CO<sub>2</sub> durante sua produção, além da utilização de filtros de processo para captura de MP.

Neste trabalho também foram apresentadas as técnicas que mostram diversos recursos que podem ser utilizados pelas fábricas de cimento, com objetivo de controlar e diminuir a geração e emissão de seus poluentes.

As empresas evoluíram muito no quesito ambiental. Alguns anos atrás, por exemplo, os filtros para retenção de material particulado não eram utilizados, porém muito ainda deve ser feito, visto que em muitas plantas brasileiras não são aplicadas nenhuma das técnicas apresentadas. Por isso, é fundamental o estudo do que pode ser feito para mitigação dos gases poluentes. Além disso, é de suma importância continuar criando soluções que visam a produção eficiente de forma a diminuir os impactos causados.

A preocupação com este assunto deve ser geral, partindo dos órgãos regulamentadores e da população local, que é afetada pela poluição gerada. Aos acionistas e sócios das indústrias, cabe buscar a conscientização para entender os danos que podem ser causados no futuro, visto que o crescimento do setor tende a ser cada vez maior ao longo dos anos e, conseqüentemente, suas emissões também.

A investigação das técnicas apresentadas neste trabalho proporciona um melhor conhecimento não somente sobre elas, mas dos poluentes atmosféricos gerados e seus efeitos na saúde e no meio ambiente, além de conhecer as tratativas realizadas pelos órgãos governamentais responsáveis.

A presente pesquisa comprova que recursos podem ser implantados a fim de reduzir os impactos causados pelas indústrias de cimento. Para trabalhos futuros existe a possibilidade do estudo aprofundando em alguma das técnicas com o objetivo de mostrar a viabilidade e os impactos causados pela implementação delas.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA EUROPEIA DO AMBIENTE. **Poluição atmosférica**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/air/intro>. Acesso em: 11 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. **Indústria**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/industry/intro>. Acesso em: 30 set. 2019.

\_\_\_\_\_. **Indústria**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/sinais-da-aea/sinais-2013/artigos/legislacao-relativa-a-qualidade-do>. Acesso em: 30 set. 2019.

ALVES, Paula Schneid. **Sustentabilidade na engenharia química**. Disponível em: <https://betaeq.com.br/index.php/2019/04/17/sustentabilidade-na-engenharia-quimica/>. Acesso em: 09 jun. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre cimento**. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/basico/basico-sobre-cimento/>. Acesso em: 23 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

\_\_\_\_\_. **Indústria Brasileira de Cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Brasília, 2017. 66p.

\_\_\_\_\_. **Perguntas Frequentes**. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimento-portland/>. Acesso em: 24 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. **Panorama do coprocessamento Brasil 2017**. Brasília, 2017. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, 2019. 64p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland Comum**. Rio de Janeiro, RJ, 1991. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, RJ, 2018. 12p.

BATTAGINI, Arnaldo. Forti. **Básico sobre cimento. Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>. Acesso em: 05 jan. 2019.

BELATO, Mariana Natale. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá – Itajubá, 2013.

BRITO, Marina Menezes de. **Redução catalítica seletiva de óxido nítrico por amônia sobre catalisadores de ferro e titânio**. 2015. Dissertação (Pós-Graduação em Química) – Universidade Federal da Bahia – Salvador, 2015.

BOSOAGA, Adina; MASEK, Ondrej; OAKEY, John E. **CO<sub>2</sub> capture Technologies for cement industry**. Reino Unido, 8 p, 2009.

CARVALHO Jr., João Andrade., LACAVA, Pedro Teixeira. **Emissões em Processos de Combustão**, São Paulo: ed. UNESP, 135 p., 2003.

CAMPOS, Daniel Vigarinho de. **Cogeração em uma fábrica de cimento**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo Escola Politécnica – São Paulo, 2007.

CEPAC. **Centro de Excelência e Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono**. Disponível em: [http://www.pucrs.br/cepac/download/CEPAC\\_/](http://www.pucrs.br/cepac/download/CEPAC_/). Acesso em: 30 set. 2019.

CIMENTO APODI. **Nossa história**. Disponível em: <https://cimentoapodi.com.br/nossa-historia/>. Acesso em: 04 set. 2019.

CIMENTO ITAÚ. **Manual Técnico**. [200-].

CIMENTO MAUÁ. **Como é feito o cimento**. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/cimento-como-feito-composicao-e-nomenclatura/>. Acesso em: 24 fev. 2019.

CIMENTO.ORG. **Indústria brasileira de cimento é a mais sustentável do mundo**. Disponível em: <https://cimento.org/industria-brasileira-de-cimento-e-a-mais-sustentavel-do-mundo/>. Acesso em: 01 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Mais de 90% de cimento brasileiro tem aditivos sustentáveis**. Disponível em: <https://cimento.org/mais-de-90-de-cimento-brasileiro-tem-aditivos-sustentaveis/>. Acesso em: 04 set. 2019.

CONAMA. **Resolução Conama n°8/1990**. Estabelece limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição. 28 de dez. de 1990. p. 25539.

\_\_\_\_\_. **Resolução Conama n°382/2006**. Estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. 2 jan. 2007. p. 131-137.

\_\_\_\_\_. **Resolução Conama n°491/2018**. Padrões de qualidade do ar. 19 nov. 2018. p. 155-156.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Brasília, DF. 2012. 61 p.



CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 1999/30/CE**. Relativa a valores-limite para o dióxido de enxofre, dióxido de azoto e óxidos de azoto, partículas em suspensão e chumbo no ar ambiente. 22 de abr. de 1999.

\_\_\_\_\_. **Diretiva 2000/69/CE**. Relativa a valores-limite para o benzeno e o monóxido de carbono no ar ambiente. 16 de nov. de 2000.

COPAM. **Deliberação Normativa nº187/2013**. Estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas e dá outras providências. 19 de set. de 2013.

DE PAULA, Luiz Gonzaga. **Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland com Co-processamento de misturas de resíduos**. 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá – Itajubá, 2009.

DIP, Tatiana Maciulis. **Otimização de condições operacionais de processo visando a minimização da emissão de material particulado na incineração industrial de resíduos perigosos**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY. Development of state of the art-techniques in cement manufacturing: trying to look. Dusseldorf, Geneva, 2017.

FARENZENA, Hélio. **Fabricação de cimento Portland – aspectos gerais**. Disponível em: <http://blogdocumento.blogspot.com/2017/11/a-volta-do-mestre-farenzena.html>. Acesso em: 23 mar. 2019.

FERNANDES, Viviane Kettermann, MARTENDAL, Caroline Pereira. **Engenheiro de materiais - Ecocimentos**. Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/2015/09/16/ecocimentos/>. Acesso em: 10 set. 2019.

FERREIRA, Carlos José Fernandes. **Os gases de efeito estufa e a problemática da responsabilidade social e ambiental das empresas portuguesas: o caso das cimenteiras**. 2010. Dissertação (Mestre em Contabilidade) – Instituto Superior de Contabilidade – Lisboa, 2010.

FELIX, Emerson Felipe.; POSSAN, Edna. Balanço das emissões e da captura de CO<sub>2</sub> em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 135 – 162, fev. 2018.

FÓRUM DA CONSTRUÇÃO. **Cimento ecológico, uma alternativa ecológica na construção civil**. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=31&Cod=866><http://www.tececo.com/simple.eco-cement.php><http://theconversation.com/eco-cement-the-cheapest-carbon-sequestration-on-the-planet-10978/>. Acesso em: 10 set. 2019.

FREIRE, Diego. **Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO<sub>2</sub>**. Disponível em: [http://agencia.fapesp.br/especialistas\\_discutem\\_papel\\_da\\_industria\\_do\\_cimento\\_nas\\_emissoes\\_de\\_co2/23449/](http://agencia.fapesp.br/especialistas_discutem_papel_da_industria_do_cimento_nas_emissoes_de_co2/23449/). Acesso em: 28 abr. 2019.

GLOBAL CEMENT MAGAZINE. **Brazil's cement industry - Challenging times.** Disponível em: <http://www.globalcement.com/magazine/articles/965-brazil-s-cement-industry-challenging-times/>. Acesso em: 23 mar. 2019.

GOMES, Marco de Moura; SANTOS, Maria Luiza Queiroz; NOGUEIRA, Jacqueline Andrade. **Analysis of Portland Cement Production.** Disponível em: [http://revistapensar.com.br/direito/pasta\\_upload/artigos/a263.pdf](http://revistapensar.com.br/direito/pasta_upload/artigos/a263.pdf). Acesso em: 23 mar. 2019.

GUPTA, Rakhi. K.; MAJUNDAR, Deepanjan.; TRIVEDI, Jitendra V.; BHANARKAR, Anil. D. **Particulate matter and elemental emissions from a cement kiln.** Fuel Processing Technology, Reino Unido, v. 104, p. 343-351, julho de 2012.

HASANBEIGI, Ali; PRICE, Lynn; LIN, Elina. **Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production.** 2012. Energy Analysis and Environmental Impacts Department. Environmental Energy Technologies Division, China, 2012.

HEINEN, Evandro. **Relatório de Estágio: Processo de produção de cimento Portland.** 2002. Relatório de Estágio (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2002.

HERZOG Howard.; GOLOMB Dan. Carbon capture and storage from fossil fuel use, **Encyclopedia of Energy**, Massachusetts, 2004.

HENDRIKS, C. A.; WORRELL, Ernst; JAGER, D de; BLOK, K.; RIEMER, P. **Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry.** Disponível em: <http://www.ieagreen.org.uk/prghgt42>. Acesso em: 18 ago. 2019.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Ecocimento promete casas construídas por bactérias.** Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=ecocimento-casas-construidas-bacterias#.XXgR2yhKjIX>. Acesso em: 10 set. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: Mitigation.** Disponível em: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg3\\_report\\_mitigation\\_of\\_climate\\_change.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg3_report_mitigation_of_climate_change.htm). Acesso em: 30 abr. 2019.

KARSTENSEN, Kare Helge. “**Formação e Emissão de POPs pela Indústria de Cimento**”. 3. ed. São Paulo: RiMa Editora, 2010. 188 p.

LIMA, André Barbosa. **O processo produtivo do cimento Portland.** 2011. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LIMA, Gerônimo Cavalcante. **Relatório de Estágio: Processo de produção de cimento Portland do grupo CIMPOR.** 2009. Relatório de Estágio (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

LIMA, Rindinelli Nepomuceno. **Avaliação da incorporação de enxofre no clínquer em um forno de cimento.** 2013. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

LINHARES, Bruno Tasca de. **Avaliação de desempenho de cimentos CII E CII F com diferentes teores de pozolanas frente ao ataque de íons sulfato**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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

MAGALAR, Letícia. **Estudo poluição atmosférica de cimenteiras**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MAP Cement. **Sustainable Development Report 2017**. Disponível em: [https://cement.mineralproducts.org/documents/MPA\\_Cement\\_SD\\_Report\\_2017\\_singles.pdf/](https://cement.mineralproducts.org/documents/MPA_Cement_SD_Report_2017_singles.pdf/). Acesso em: 12 out. 2019.

MELLO, Lilian Cardoso de. **Estudo do processo de absorção de CO<sub>2</sub> em soluções de aminas empregando-se coluna recheada**. 2013. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

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

MILANEZ, Bruno; FERNANDES, Lúcia de Oliveira; PORTO, Marcelo Firpo de Souza. A coincineração de resíduos em fornos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente. **Ciência e saúde coletiva**, Rio de Janeiro, v.14. n.6, p-2143-2152, dez. 2009.

MIRANDA, Jussara Lopes de; MOURA, Luiza de; FERREIRA, Heitor Breno; ABREU, Tatiana. O antropoceno e o CO<sub>2</sub>: Processos de Captura e Conversão. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v.10, n.6, ISSN 1984-6835, nov-dez. 2018.

NEO MUNDO. **A primeira fábrica de cimento de zero emissão do mundo toma forma na Noruega**. Disponível em: <http://www.neomundo.org.br/2018/12/14/a-primeira-fabrica-de-cimento-de-zero-emissao-do-mundo-toma-forma-na-noruega/>. Acesso em: 01 out. 2019.

NETTO, Rafael Mantuano. **Materiais Pozolânicos**. 2006. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NORCEM. **Captura e armazenamento de carbono (CCS)**. Disponível em: <https://www.norcem.no/en/CCS/>. Acesso em: 01 out. 2019.

OLIVEIRA, Camila Chaves Nunes de. **Potencial técnico e econômico da aplicação de rotas de captura de carbono em processos industriais brasileiros**. 2015. Dissertação (Pós-Graduação em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA, Flávia Matias. **Estudo do efeito eletrostático na filtração de partículas de cimento em filtros de mangas**. 2015. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos – São Carlos, 2015.

PADE, Claus.; GUIMARÃES, Maria. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100-year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 47, n. 9, p. 1384-1356, set. 2007.

PECCHIO, Marcelo. **A influência de fósforo, enxofre e estrôncio na mineralogia do clínquer Portland**. 2013. Dissertação (Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia) – Universidade de São Paulo – São Paulo, 2013.

POSSAN, Edna.; FOGAÇA, Josias Cristiano.; PAZUCH, Catiussa Maiara. Sequestro de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação do concreto: potencialidades da barragem de Itaipu. **Revista de estudos ambientais**, v. 14, n. 2, p. 28-38, 2012.

RAMOS, Márcio Dimas. **Estudo da formação e emissão de poluentes na atmosfera originários do coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento**. 2015. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2015.

SANTI, Auxiliadora Maria Moura. **Co-incineração e co-processamento 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. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade de Campinas, Campinas, 2003.

SEEBACH, Max von, YOUNG, Gail. L., MILLER, Felicia. M., Formation and techniques for control of sulfur dioxide and other sulfur compounds in portland cement kiln systems, **Research Development Information**, n. 2460.

SELLITTO, Miguel Afonso. Inteligência artificial: Uma aplicação em uma indústria de processo contínuo. **Gestão & Produção**, São Leopoldo, v.9, n.3, p.363-376, dez. 2002.

SIGNORETTI, Valdir Tesche. **Controle das emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e metais pesados quando se utilizam combustíveis alternativos e de alto teor de enxofre na indústria de cimento**. 2008. Tese (Doutorado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números da Indústria**. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1537281236.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. **Dados do setor**. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 23 mar. 2019.

SOUZA, Gabriel Agenor de Araújo; JUNIOR, Juarez Caetano Moreira; SANTOS Mayra Lise Vitor; MENDONÇA, Rafael Silva. **Arquitetura de terra: alternativa sustentável para os impactos ambientais causados pela construção civil**. Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p 1-13, maio 2015.

STATISTA. **Major countries in worldwide cement production from 2014 to 2018.**

Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>. Acesso em: 23 mar. 2019.

SUTHERLAND, Kenneth. “**Filters and Filtration Handbook**”. 5 ed. Oxford: Elsevier, 2008.

TANABE, Eurico Yuji. **Óxidos do tipo Perovskitas para reações de decomposição direta de NO e redução de NO com CO.** 2006. Dissertação (Mestre em Ciências Físico-Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TIANO, Piero, CUZMAN, Oana Adriana, RICHTER, Katharina, WITTIG, Linda. Alternative nitrogen sources for biotechnological use of *Sporosarcina pasteurii*. **World J Microbiol Biotechnol**, DOI [10.1007/s11274-015-1844-z](https://doi.org/10.1007/s11274-015-1844-z). Acesso em: 10 set. 2019.

US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Alternative Control Techniques Document Update – NO<sub>x</sub> Emissions from New Cement Kilns.** US EPA, 2007. 116 p. Disponível em: [http://www.epa.gov/ttnecat1/dir1/cement\\_updt\\_1107.pdf](http://www.epa.gov/ttnecat1/dir1/cement_updt_1107.pdf). Acesso em: 28 abr. de 2019.

VOTORANTIM. **Manual Técnico.** [200-].