

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**GUSTAVO PEREIRA TAVARES**

N. CLASS. M620.1350287  
CUTTER T231c  
ANO/EDIÇÃO 2014

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS CLÍNQUER**  
**EM PLANTAS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Varginha  
2014

**FEPESMIG**

**GUSTAVO PEREIRA TAVARES**

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS CLÍNQUER  
EM PLANTAS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Alexandre de Oliveira Lopes.

**Varginha  
2014**

**Grupo Educacional UNIS**

**GUSTAVO PEREIRA TAVARES**

**COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS CLÍNQUER  
EM PLANTAS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia  
Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas,  
como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel  
pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

---

Prof. Me. Thairone Conti Serafini Aguiar

---

Prof. Esp. Gilson Gomes da Silva

---

Prof. José Roberto Vicente

OBS.:

Dedico este trabalho a todos aqueles que  
contribuíram para a sua realização.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas, professores e a minha família por terem ajudado na construção deste trabalho.

## RESUMO

A indústria do cimento tem como característica um alto gasto de energia térmica em seu processo produtivo. Com o objetivo de redução deste consumo tem sido adotado aspectos de gestão energética e a aplicação de novas tecnologias. A utilização de pré-calcinadores tem sido amplamente difundida, onde a energia térmica que seria descartada é reutilizada através da recirculação, assim aumentando a temperatura da matéria prima antes de entrarem no forno. O uso de combustíveis alternativos, oriundos de processos industriais, também tem sido uma alternativa para redução do consumo de combustíveis fósseis e de redução de custos diretos. Esta técnica, denominada coprocessamento, representa um grande avanço na produção de cimento, pois consegue se obter uma destinação final para estes resíduos. O objetivo deste trabalho é apresentar as principais técnicas de gestão energética e os principais condicionantes para ao coprocessamento. Avaliando as principais dificuldades de uma destinação final para resíduos industriais, apresentamos algumas propostas de destinação e a metodológica para esta combustão. Para isso é necessário ter um amplo conhecimento sobre os tipos de combustíveis, matérias primas, tipos de fornos, controle de emissões de poluentes, legislação ambiental e normas de segurança procurando atingir um melhor parâmetro de aplicação da técnica para se atingir um desenvolvimento sustentável.

**Palavras-Chaves:** Cimento. Coprocessamento. Energia. Combustíveis. Emissões.

## ABSTRACT

*The cement industry is characterized by a high expenditure of thermal energy in its production process. In order to reduce this consumption, aspects of energy management and the application of new technology has been adopted. The use of pre-calciner has been widely disseminated, where the thermal energy which would be discarded, it is reused by recycling, thereby increasing the temperature of the raw material before entering the furnace. The use of alternative fuels derived from industrial processes, has also been an alternative to reducing the consumption of fossil fuels and the reduction of direct costs. This technique, called coprocessing, represents a great advance in the production of cement, because it can give a final destination for these wastes. The objective of this work is to present the main techniques of energy management and the main conditioning factors to the coprocessing. Evaluating the main difficulties of a final destination for industrial waste, we present some proposals for allocation and methodology for this combustion. This requires having extensive knowledge about the types of fuels, raw materials, furnaces, control emissions, environmental legislation and safety standards striving to achieve a better technique application parameter to achieve sustainable development*

**Keywords:** *Cement, Coprocessing, Energy, Fuel, Emission.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da evolução da produção do cimento portland.....	17
Figura 2 - Maiores produtores mundiais de cimento (milhões de toneladas). ....	18
Figura 3 - Maiores consumidores mundiais de cimento (milhões de toneladas). ....	19
Figura 4 - Localização geográfica das empresas de cimento. ....	20
Figura 5 - Composição dos cimentos portland comuns.....	21
Figura 6 - Composição dos cimentos portland compostos.....	22
Figura 7 - Composição do cimento portland de alto-forno .....	22
Figura 8 - Composição do cimento portland pozolânico.....	23
Figura 9 - Composição do cimento portland de alta resistência inicial.....	23
Figura 10 - Moinhos de bolas.....	28
Figura 11 - Moinho de rolos vertical.....	28
Figura 12 - Rolos de moagem de alta pressão.....	28
Figura 13 - Pré-aquecedor. ....	29
Figura 14 - Conjunto do pré-aquecedor, pré-calcinador e forno rotativo de clínquer. ....	30
Figura 15 - Forno rotativo de clínquer. ....	31
Figura 16 - Fluxograma do processo de produção do cimento. ....	32
Figura 17 - Efeitos do módulo sílica na clínquerização. ....	33
Figura 18 - Efeitos do modo alumina durante a clínquerização. ....	34
Figura 19 - Efeitos do fator de saturação de cal durante a clínquerização. ....	34
Figura 20 - Composição química mineralógica do cimento.....	35
Figura 21 - Relação de combustíveis primários.....	36
Figura 22 - Relação de combustíveis alternativos.....	37
Figura 23 - Relação de resíduos proibidos de serem coprocessados. ....	37
Figura 24 - Análise de composição química de coques de petróleo verde.....	38
Figura 25 - Composições típicas do gás natural, em % volumétrico.....	39
Figura 26 - Características típicas do óleo combustível do tipo A e B. ....	40
Figura 27 - Classificações do carvão mineral e o total de reservas no mundo .....	41
Figura 28 - Componentes químicos das cinzas do carvão mineral. ....	41
Figura 29 - Gráfico da produção de pneus no Brasil. ....	42
Figura 30 - Composição química e PCI em kJ/kg de amostras de raspas de pneu.....	43
Figura 31 - Hot disc equipamento de inserção de pneu.....	44

Figura 32 - Teor de cinzas, poder calorífico e teor de umidade de alguns resíduos agrícolas	45
Figura 33 – Análise da composição das cinzas de casca de arroz.	45
Figura 34 – Composição química elementar do RDF (% em peso).	47
Figura 35 - Análise química das cinzas do RDF (% em peso).	47
Figura 36 – Poder calorífico inferior e superior do RDF (kJ/kg).	47
Figura 37 - Limites máximos de emissão de poluentes.	50
Figura 38 – Limites máximos para a entrada metais no forno.	52
Figura 39 - Os limites máximos de emissões de poluentes, estabelecidos pela DN COPAM nº 154/2010 e a DN COPAM nº 026/1998.	53
Figura 40 - Limites da emissão total de poluentes no coprocessamento, em mg/m <sup>3</sup> .	54
Figura 41 - Emissão média de dióxido de carbono por tonelada de cimento.	55
Figura 42 - Consumo térmico por tecnologia.	58
Figura 43 – Gráfico com o consumo médio de energia elétrica de uma fábrica de cimento.	59
Figura 44 – Equipamentos de menor consumo energético térmico e elétrico.	59
Figura 45 – Matriz energética da indústria cimenteira no período de 1975 a 2013.	60
Figura 46 – Consumo de energia térmica anual.	61
Figura 47 – Consumo de energia elétrica anual.	61
Figura 48 - Distribuição de plantas de cimento licenciadas pelo coprocessamento no Brasil.	63
Figura 49 - Total de resíduos coprocessados no Brasil (milhões de toneladas).	64
Figura 50 - Perfil dos resíduos coprocessados em 2012.	64
Figura 51 – Índice de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos.	65
Figura 52 – Estimativa do uso de combustíveis alternativos no mundo no período de 2006-2050.	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCP - Associação Brasileira do Cimento Portland  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
Al - Alumínio  
 $Al_2O_3$  - Óxido de alumínio  
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos  
As - Arsênio  
Ba - Bário  
Be - Berílio  
°C - Celsius  
C - Carbono  
CaO - Óxido de cálcio  
 $C_3A$  - Aluminato tricálcio  
 $C_4AF$  - Ferro-aluminato tetracálcio  
Cd - Cádmiio  
Cl - Cloro  
 $Cl_2$  - Gás Cloro  
Co - Cobalto  
CO - Monóxido de carbono  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental  
Cr - Crômio  
 $C_2S$  - Silicato dicálcio  
 $C_3S$  - Silicato tricálcio  
Cu - Cobre  
DN - Deliberação Normativa  
EAR - Estudo de Análise de Risco  
EVQ - Estudo de Viabilidade de Queima  
F - Flúor  
Fe - Ferro  
 $Fe_2O_3$  - Óxido férrico  
FSC - Fator de saturação de cal

GJ – Gigajoule  
H – Hidrogénio  
h - Hora  
HCl - ácido clorídrico  
HF - Ácido fluorídrico  
Hg - Mercúrio  
HPAs - Hidrocarbonetos polinucleares aromáticos  
INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade  
K - Kelvin  
K – Potássio  
Kcal - Quilocaria  
KG – Quilograma  
KJ – Quilojoule  
K<sub>2</sub>O – Óxido de potássio  
kPa – Quilopascal  
Li – Lítio  
m<sup>3</sup> - Metros cúbicos  
MA - Módulo de alumina  
mg - Miligrama  
MgO – Óxido de magnésio  
MH – Módulo hidráulico  
MJ - Megajoule  
Mn – Manganês  
Mo – molibdênio  
MP – Material particulado  
MS - Módulo de sílica  
N – Nitrogênio  
N<sub>2</sub> – Gás nitrogênio  
n<sup>o</sup> - Número  
Na – Sódio  
Na<sub>2</sub>O – Óxido de sódio  
Nb – nióbio  
NBR - Normas Brasileiras Regulamentadoras  
Ni – Níquel

Nm<sup>3</sup> – Newton por metro cúbico  
NO<sub>x</sub> – Óxido de Nitrogênio  
O<sub>2</sub> – Oxigênio  
Olucs - Óleos lubrificantes usados ou contaminados  
Pb - Chumbo  
PCI – Poder calorífico inferior  
PCOPs – Principais compostos orgânicos perigosos  
PCS – Poder calorífico superior  
PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Pentóxido de fósforo  
ppmv - Partes por milhão por volume  
PTQ - Plano de teste de queima  
RDF - Refused derived fuel  
RSU - Resíduos sólidos urbanos  
S - Enxofre  
Sb – Antimônio  
Se - Selênio  
SiO<sub>2</sub> – Dióxido de silício  
Sn – Estanho  
SO<sub>x</sub> - Óxido de enxofre  
SO<sub>3</sub> – Óxido sulfúrico  
Te - Telúrio  
THC - Hidrocarbonetos totais  
TI - Tálcio  
TiO<sub>2</sub> – Dióxido de titânio  
UPGN - Unidade de processamento de gás natural  
V- Vanádio  
Zn – Zinco  
Zr - Zircônio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 HISTÓRIA E CENÁRIO MUNDIAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 História do cimento portland</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 Cenário mundial da indústria do cimento portland</b> .....	<b>16</b>
2.2.1 Cenário brasileiro da indústria do cimento portland.....	19
<b>3 TECNOLOGIA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1 Tipos de cimento</b> .....	<b>21</b>
3.1.1 Cimento portland comum.....	21
3.1.2 Cimento portland composto .....	21
3.1.3 Cimento portland de alto-forno .....	22
3.1.4 Cimento portland pozolânico .....	22
3.1.5 Cimento portland de alta resistência inicial .....	23
3.1.6 Cimento portland resistente aos sulfatos.....	23
<b>3.2 ADIÇÕES</b> .....	<b>24</b>
3.2.1 Gesso.....	24
3.2.2 Material pozolânico.....	24
3.2.3 Escória de alto-forno .....	25
3.2.4 Material carbonático.....	25
<b>3.3 TIPOS DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO CIMENTO</b> .....	<b>25</b>
3.3.1 Processo via úmida.....	26
3.3.2 Processo via semi-úmida.....	26
3.3.3 Processo via seca.....	26
3.3.4 Processo via semi-seca.....	26
<b>3.4 FABRICAÇÃO DO CIMENTO E SUAS CARACTERÍSTICAS</b> .....	<b>27</b>
3.4.1 Extração da matéria-prima .....	27
3.4.2 Britagem.....	27
3.4.3 Pré-homogeneização primária e secundária.....	27
3.4.4 Moagem e homogeneização .....	27
3.4.5 Pré-aquecimento.....	29
3.4.6 Pré-calcinação .....	29
3.4.7 Clinquerização.....	30
3.4.8 Adição e moagem do clínquer.....	31
3.4.9 Expedição.....	31
<b>3.5 MÓDULOS DE CONTROLE DA MISTURA</b> .....	<b>32</b>
3.5.1 Módulo de sílica.....	33
3.5.2 Módulo de alumina .....	33
3.5.3 Fator de saturação de cal .....	34
3.5.4 Módulo hidráulico.....	35
<b>3.6 COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS CIMENTOS</b> .....	<b>35</b>
<b>4 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND</b> .....	<b>36</b>
<b>4.1 Combustíveis primários da indústria do cimento portland</b> .....	<b>38</b>
4.1.1 Coque de petróleo .....	38
4.1.2 Gás natural .....	39
4.1.3 Óleo combustível .....	40
4.1.4 Carvão mineral.....	40

<b>4.2 Combustíveis alternativos da indústria do cimento portland</b> .....	42
4.2.1 Pneus inservíveis .....	42
4.2.2 Resíduos agrícolas .....	44
4.2.3 Óleos lubrificantes usados ou contaminados (Olucs) .....	46
4.2.4 Resíduos sólidos urbanos .....	46
<b>5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL</b> .....	48
<b>5.1 Legislação federal</b> .....	48
<b>5.2 Legislação estadual</b> .....	51
5.2.1 Legislação de Minas Gerais .....	51
<b>5.3 Legislação europeia</b> .....	54
<b>6 EMISSÕES DE POLUENTES DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA</b> .....	55
<b>6.1 Tecnologias de controle de NO<sub>x</sub></b> .....	55
<b>6.2 Tecnologias de controle de SO<sub>2</sub></b> .....	56
<b>6.3 Tecnologias de controle de CO</b> .....	56
<b>6.4 Tecnologias de controle de CO<sub>2</sub></b> .....	57
<b>6.5 Tecnologias de controle de MP</b> .....	57
<b>7 ANÁLISE ENERGÉTICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO</b> .....	58
<b>7.1 Eficiência energética da indústria cimenteira brasileira</b> .....	60
7.1.1 Análise da energia térmica da indústria cimenteira brasileira .....	60
7.1.2 Análise da energia elétrica da indústria cimenteira brasileira .....	61
<b>8 COPROCESSAMENTO NO BRASIL</b> .....	63
<b>9 COPROCESSAMENTO NO MUNDO</b> .....	65
<b>10 CONCLUSÃO</b> .....	67
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	68

## I INTRODUÇÃO

Desde a criação do mundo, o homem tem como necessidade de sentir protegido para a sua sobrevivência. Devido a esta necessidade e com a Revolução Industrial, permitiu a descoberta de um item para suprir: o cimento Portland. O cimento é composto de clínquer e aditivos.

Com o crescimento do mercado imobiliário, aumenta cada vez mais a demanda do cimento Portland. É um resultado diretamente ligado ao rápido crescimento econômico no mundo e da grande necessidade de melhoria na infraestrutura mundial.

Para a indústria cimenteira, um dos seus principais objetivos é conseguir desenvolver suas atividades de maneira economicamente e ambientalmente viável. A fabricação do cimento Portland tem como característica um alto gasto de energia térmica em seu processo produtivo. Como alternativa para redução deste consumo de energia térmica o uso de resíduos como combustíveis alternativos, para a queima em fornos clínquer oriundos de processos industriais esta técnica é chamada de coprocessamento.

Neste trabalho pretende-se apresentar o processo produtivo do cimento e uma aplicação geral da técnica do coprocessamento, para procurar estabelecer um melhor parâmetro de aplicação da técnica visando o desenvolvimento sustentável.

O objetivo geral é identificar as principais técnicas de gestão energética e os principais condicionantes para o coprocessamento.

Os objetivos específicos são:

- a) Estudar os tipos de cimentos existentes e o processo de produção;
- b) Estudar a técnica a fim de determinar para atingir um melhor parâmetro de aplicação;
- c) Identificar os assuntos já estudados e os que demandam mais pesquisa;
- d) Demonstrar uma revisão geral do coprocessamento em fornos clínquer no Brasil e no mundo.

Este tema foi escolhido buscando a melhoria na aplicação da técnica do coprocessamento, auxiliando e estimulando as indústrias cimenteiras a buscarem de uma forma mais dinâmica melhor parâmetro de aplicação do mesmo reduzindo as emissões de poluentes buscando promover o desenvolvimento sustentável da atividade industrial.

O trabalho será desenvolvido através de pesquisa bibliográfica e uma visita técnica em uma indústria cimenteira para conhecimento na prática da técnica do coprocessamento.

## **2 HISTÓRIA E CENÁRIO MUNDIAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND**

Este capítulo será apresentado evolução da história e o cenário mundial da indústria do cimento Portland e demonstrar a sua importância para o cotidiano na vida das pessoas.

### **2.1 História do cimento portland**

A origem da palavra CIMENTO vem do latim da palavra CAEMENTU, que era uma espécie de uma pedra natural de rochedos não esquadrejada que existia na velha Roma. Sendo que a origem do cimento aponta cerca de 4500 anos atrás. As construções no Antigo Egito utilizam uma liga que era mistura de gesso calcinado (RENO, 2007).

Em meados de 1756, o inglês John Smeaton através de muita pesquisa científica conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários com argila. Em 1818, o francês Vicat comprova os resultados de John Smeaton que obteve a indicação detalhada as proporções necessárias de calcário e sílica para se obter a mistura artificial que formaria um aglomerante hidráulico (RENO, 2007).

Em meados de 1824 o inglês Joseph Aspdin, conseguiu através de uma mistura calcinada em proporções definidas de calcário e argila obtendo um ligante no formato de pó. O mesmo apresenta cor e características semelhantes a uma pedra abundante na ilha britânica de Portland. A partir daí começa a sua utilização e comercialização, crescendo gradativamente pelo mundo.

Em 1844, o inglês Isaac Johnson descobriu que além da calcinação, a mistura de calcário e argila deveria passar pelo processo de queima e a partir daí se obtém o clínquer, que é considerado hoje o principal constituinte do cimento Portland.

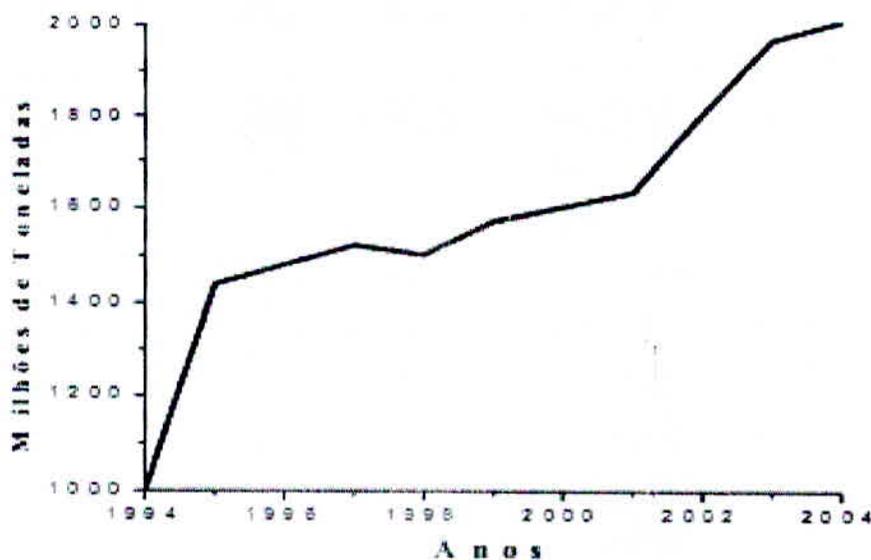
No Brasil o primeiro a produzir o cimento foi o engenheiro Louis Nóbrega no ano de 1892. A marca de cimento Santo Antonio, que era produzido na Usina Rodovalho funcionou até 1904, teve seu retorno no ano de 1907 lançando outras marcas de cimento.

De acordo com Sindicato Nacional da Indústria de Cimento o cimento é o segundo material mais consumido no mundo perdendo apenas para a água. Tendo a sua origem da extração mineral, tem uma importância indiscutível para o progresso de um país (SNIC, 2011).

### **2.2 Cenário mundial da indústria do cimento portland**

A população mundial vem se aumentando significativamente em vários países do mundo. Observa-se que no período entre 1994 a 2004 foram produzidos mais de 600 milhões de toneladas de cimento Portland. Tem se estimativa que no ano de 2050 a população mundial chegará a 9 bilhões de habitantes, devido a este aumento na demanda a produção de cimento terá que se aumentar cada vez mais para atender a necessidade dos habitantes. A figura 1 abaixo demonstra a evolução da produção do cimento Portland no período de 1994 a 2004.

Figura 1 - Gráfico da evolução da produção do cimento portland.



Fonte: (TOSTA, SOUZA, SILVA, 2007).

A indústria cimenteira esta presente em vários países do mundo. De acordo com os dados apresentados na figura 2, a produção mundial já ultrapassa os 3 bilhões de toneladas entre os anos de 2009 a 2011.

Figura 2 - Maiores produtores mundiais de cimento (milhões de toneladas).

<b>Maiores Produtores de Cimento (milhões de toneladas)</b>							
<b>Países</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
1. China	1.079,60	1.253,50	1.379,00	1.401,20	1.657,10	1.868,00	2.080,00
2. Índia	146,8	162	172,9	186,1	190	215,5	240,5
3. Estados Unidos	99,4	98,2	95,5	86,5	64	64,9	67,9
4. Turquia	45,6	49	50,8	53,4	57,6	62	67,8
5. Irã	32,7	35,3	40	44,4	48,8	61,3	66,4
6. Brasil	39,2	42,4	47,2	52,3	52,1	59,2	64,1
7. Japão	72,7	73,2	71,4	67,6	59,6	54	56,4
8. Rússia	49,5	55,2	60,1	53,5	45,7	50,4	56,1
9. Vietnã	30,8	32,7	35,8	36,3	47,7	55	52
10. Arábia Saudita	26,1	27,1	30,4	37,4	37,8	41	48,4
11. Coreia do Sul	49,1	51,4	54,4	55,1	52,2	47,4	48,3
12. Egito	38,9	39,2	40,1	40,1	46,9	48,2	45,4
13. Indonésia	36,1	38,1	39,9	41,8	39,7	39,5	45,2
14. México	35,4	38,4	39,2	37,7	35,4	34,5	35,4
15. Alemanha	31	33,6	33,4	33,6	30,4	30,2	33,5
<b>Total Mundial</b>	<b>2.344,80</b>	<b>2.608,00</b>	<b>2.797,70</b>	<b>2.841,50</b>	<b>3.033,00</b>	<b>3.345,00</b>	<b>3.638,00</b>

Fonte: Adaptado (SNIC, 2012)

A figura 3 apresenta os dados sobre o consumo mundial de cimento, nota-se que o consumo e a produção aumentaram proporcionalmente na maioria dos países. A China mantém a liderança na produção e consumo de cimento, representando cerca de 57% da produção e consumo mundial no ano de 2011 entre os maiores produtores e consumidores e um resultado ligado diretamente pelo crescimento econômico.

Figura 3 - Maiores consumidores mundiais de cimento (milhões de toneladas).

<b>Maiores Consumidores de Cimento (milhões de toneladas)</b>							
<b>Países</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
1. China	1.058,30	1.218,10	1.345,30	1.369,90	1.622,20	1.851,00	2.050,00
2. Índia	133,7	152,6	166,4	181,5	185,1	211,8	236,9
3. Estados Unidos	128,3	127,4	114,8	96,8	70,5	68,6	72,2
4. Brasil	37,7	41	45,1	51,6	51,9	60	65
5. Rússia	46,6	52,5	60,5	60,3	44	49,7	57,4
6. Irã	31,3	34,8	40	43,5	47,8	56	56,4
7. Turquia	35,1	41,6	42,5	40,6	41,1	46	55,7
8. Vietnã	30,9	32,7	35,5	40	47,9	50,2	49,2
9. Egito	31,9	34,3	36,8	39,6	47,9	49,6	48,7
10. Indonésia	31,5	32	34,2	38,1	38,5	40,7	48
11. Arábia Saudita	24,7	25	26,6	35	36,6	40	47
12. Coreia do Sul	46,3	48,4	50,8	50,6	48,5	47	44,7
13. Japão	59	58,6	56,8	51,4	44,3	41,8	42,1
14. México	32,7	35,9	36,8	35,1	34,4	33,9	34,4
15. Itália	46,1	46,9	46,4	41,8	36,1	34	32,8
<b>Total Mundial</b>	<b>2.333,70</b>	<b>2.588,20</b>	<b>2.778,80</b>	<b>2.824,00</b>	<b>3.004,70</b>	<b>3.294,00</b>	<b>3.583,00</b>

Fonte: Adaptado (SNIC, 2012).

Entre os continentes que registrou o maior número de produção e consumo do cimento Portland, esta se destacando o continente asiático. Que obteve um número de 2838 milhões de toneladas produzido e o consumo de 2786 milhões de toneladas no ano de 2011 (SNIC, 2012).

### 2.2.1 Cenário brasileiro da indústria do cimento portland

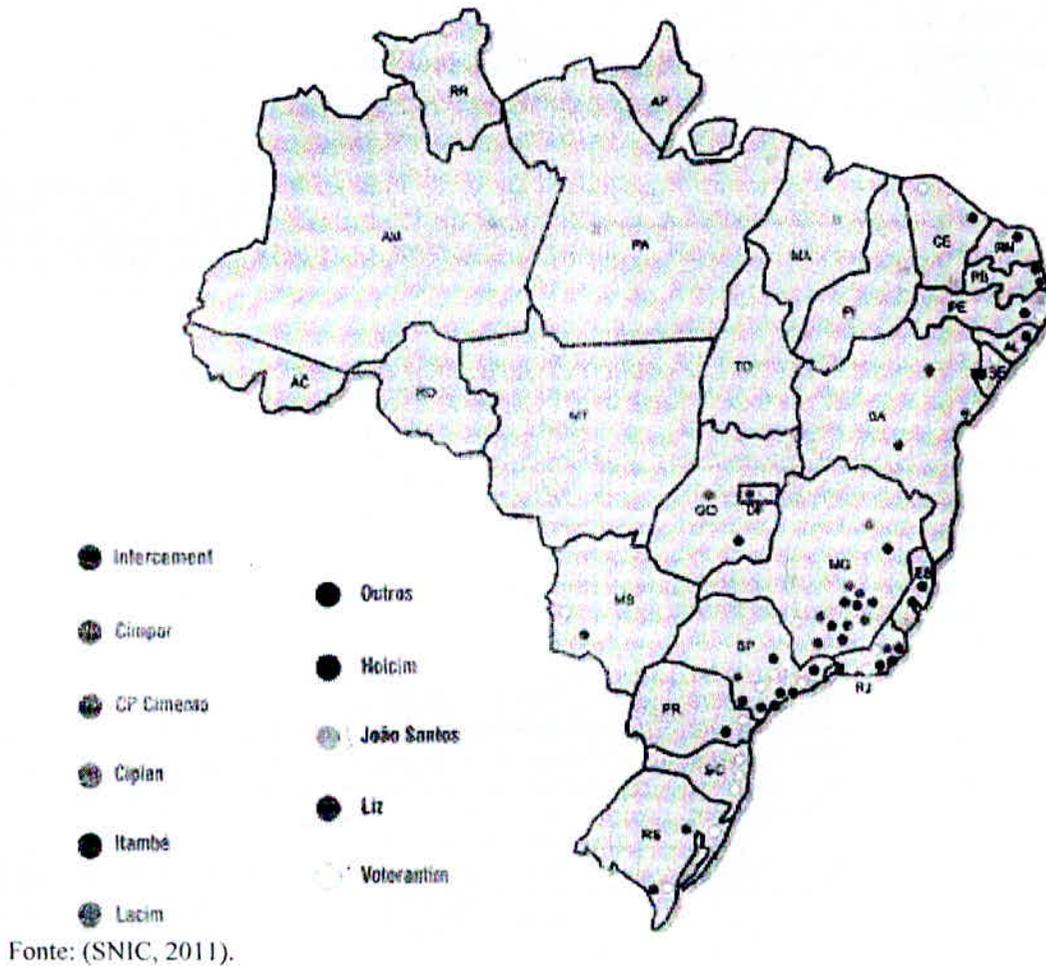
No cenário brasileiro a produção e o consumo vêm-se registrando gradativamente um aumento, e o Brasil se encontra na 6ª posição de maior produção e na 4ª posição de maior consumo mundial entre os maiores produtores e consumidores de cimento no ano de 2011. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento, em 2011 no país foram produzidas aproximadamente 60 milhões de toneladas de cimento nas 5 regiões do país. Sendo que a participação regional se separa da seguinte maneira: região sudeste 50%, região sul 14%, região centro-oeste 11%, região nordeste 19% e região norte 6% (SNIC, 2012).

Os principais grupos distribuídos pelo Brasil são: Intercement (Camargo Corrêa), Cimpor, CP Cimento, Ciplan, Lafarge/Lacim, Itambé, Holcim, João Santos, Votorantim, Liz,

Outros (Mizu, CSN, SP Cim e Apodi).

Na Figura 4 observa-se as localizações de cada cimenteira nos estados brasileiros, no ano de 2010. Elas estão identificadas, conforme legenda, por círculos de cores diferenciadas.

Figura 4 – Localização geográfica das empresas de cimento.



### 3 TECNOLOGIA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO

Este capítulo irá apresentar os tipos de cimento existentes, os tipos de processos e operações de fabricação do cimento.

#### 3.1 Tipos de cimento

No mercado brasileiro, existem vários tipos de cimento cada mesmo tem por objetivo suprir uma necessidade específica de seu cliente final. No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem a função de realizar a preparação e divulgação das normas técnicas que são utilizadas como referência em vários setores da economia inclusive o setor cimenteiro. A Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP) uma entidade sem fins lucrativos, que utiliza as normas da ABNT nos princípios do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) para se realizar toda a aferição na qualidade do cimento. A seguir serão mostrados os principais tipos de cimento.

##### 3.1.1 Cimento portland comum

E o tipo de cimento adequado para vários tipos de construções não podendo ser exposta a sulfatos, ao solo ou a águas subterrâneas. A sua composição é de basicamente de clínquer e gesso (ABCP, 2002). Segue abaixo a figura 5 com a composição dos dois tipos de cimentos portland comuns.

Figura 5 – Composição dos cimentos portland comuns.

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100				NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		

Fonte: (ABCP, 2002).

##### 3.1.2 Cimento portland composto

Este tipo de cimento tem como característica uma reação entre o cimento e a água ocorre uma liberação de uma quantidade de calor que aparece como resultado o endurecimento de uma pasta em menor velocidade do que o Cimento Portland Comum. Tem grande aplicação em elementos com alto volume de concretagem como: concreto armado, artefatos de cimento e elementos pré-moldados. É o tipo mais encontrado no mercado brasileiro, representando cerca de 75% da produção brasileira (ABCP, 2002). Segue abaixo a figura 6 a composição dos três tipos de cimentos portland compostos.

Figura 6 – Composição dos cimentos portland compostos.

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clinker + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: (ABCP, 2002).

### 3.1.3 Cimento portland de alto-forno

Este tipo de cimento possui na sua composição a adição de escórias de alto-forno tem como característica alta resistência a expansão, maior impermeabilidade e durabilidade. Pode ser aplicado em argamassas, concreto simples, concreto armado etc. Tem grande viabilidade em obras de concreto-massa como barragens, pontes, pilares etc (ABCP, 2002). Segue abaixo a figura 7 a composição do cimento portland de alto-forno.

Figura 7 – Composição do cimento portland de alto-forno.

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clinker + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735

Fonte: (ABCP, 2002).

### 3.1.4 Cimento portland pozolânico

Este tipo de cimento tem em sua composição a adição de materiais pozolânicos, possui baixo calor de hidratação em relação ao clínquer, o que favorece a sua aplicação em peças de grandes dimensões. Tem indicação de uso em locais com exposição a ação da água e ambientes agressivos (ABCP, 2002). Segue abaixo a figura 8 a composição do cimento portland pozolânico.

Figura 8 – Composição do cimento portland pozolânico.

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		C clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: (ABCP, 2002).

### 3.1.5 Cimento portland de alta resistência inicial

Este tipo de cimento possui uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, uma configuração de moagem mais fina de cimento e um modo de reação com a água diferente. Estas tipos de características faz com que o mesmo adquira elevadas resistências com maior velocidade. Seu uso é recomendado na fabricação de postes, tubos, lajes, blocos etc (ABCP, 2002). Segue abaixo a figura 9 a composição do cimento portland de alta resistência inicial.

Figura 9 – Composição do cimento portland de alta resistência inicial.

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		C clínquer + gesso	Material carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: (ABCP, 2002).

### 3.1.6 Cimento portland resistente aos sulfatos

Este tipo de cimento oferece alta resistência aos meios agressivos sulfatados. Tem aplicação em concreto usado em meios agressivos como estação de tratamento de esgoto e obras em regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas etc (ABCP, 2002). Segue abaixo a composição do cimento portland resistente aos sulfatos.

- a) Teor de aluminato tricálcio ( $C_3A$ ) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente (ABCP, 2002).
- b) Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa (ABCP, 2002).
- c) Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa (ABCP, 2002).
- d) Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovarem alta resistência aos sulfatos (ABCP, 2002).

### 3.2 ADIÇÕES

Para a fabricação de cada tipo de cimento, é necessário realizar adições junto ao clínquer. Atualmente as adições mais comuns, são resíduos originários de atividades industriais no qual os mesmos seriam descartados causando uma série de problemas e danos ao meio ambiente.

As adições tem como objetivo substituir parte do clínquer, não apenas diminuindo o impacto ambiental pelos resíduos industriais quando descartados de maneira incorreta, reduzindo o consumo de energia e de emissão de  $CO_2$  da indústria cimenteira. As adições minerais são as seguintes: gesso, material pozolânico, escória de alto forno e material carbonático. Abaixo será apresentado as principais características de cada matéria prima.

#### 3.2.1 Gesso

Os dois tipos de gessos mais utilizados pela indústria cimenteira são: o gesso natural e o sulfato de cálcio hidratado, que é encontrado na forma mineral com cristais de gipsita e o gesso sintético e resultado de atividades industriais como a fabricação de ácido fosfórico, ácido láctico entre outros (OLIVEIRA, 2012).

O gesso é adicionado junto ao clínquer, como função para regular o tempo de pega pois o aluminato tricálcio ( $C_3A$ ) contido no clínquer é altamente reativo com a água que endurece rápido e sua reação é exotérmica

#### 3.2.2 Material pozolânico

Os materiais pozolânicos são considerados materiais silicosos que quando divididos na presença de água reage com o hidróxido de cálcio adquirindo assim propriedades cimentícias (OLIVEIRA, 2012).

Os materiais pozolânicos podem ser classificadas em dois grupos que são: naturais e artificiais. Os materiais pozolânicos naturais são as rochas vulcânicas (pozolana). Enquanto que os materiais pozolânicos artificiais são resultantes de processos térmicos industriais como a argila calcinada que são queimadas em altas temperaturas e as cinzas volantes que são resíduos do processo de combustão do carvão mineral em usinas termoeletricas (OLIVEIRA, 2012).

### 3.2.3 Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é um resíduo oriundo do processo de produção do ferro gusa. O ferro gusa é produzido através do processo de fundição do minério de ferro em alto forno, onde ocorre a redução dos óxidos e a separação de suas impurezas. Onde a formação da escória acontece pela fusão destas impurezas que em sua composição apresenta silicatos e alumino-silicatos de cálcio (OLIVEIRA, 2012).

A escória que é utilizada para adição junto ao clínquer, e a escória granulada de alto-forno. No qual passa por um processo de resfriamento brusco que impede a formação de cristais (OLIVEIRA, 2012).

A adição de escória no cimento apresenta melhorias no seu desempenho como: maior resistência mecânica, maior durabilidade, maior resistência química a presença de sulfatos (OLIVEIRA, 2012).

### 3.2.4 Material carbonático

É resultado do processo de trituração da rocha de calcário. Este material apresenta um alto nível de finura, e adicionado ao cimento atuando em diversas características sendo que uma delas é responsável por tornar concretos e argamassas moldáveis. É conhecido tradicionalmente como filler de calcário (OLIVEIRA, 2012).

## 3.3 TIPOS DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO CIMENTO

Há quatro tipos de processos de produção do cimento: via úmida, via semi-úmida, via seca, via semi-seca. Atualmente o tipo de processo mais utilizado, e o via seca devido ao menor consumo de energia. Abaixo será apresentado as principais características de cada processo.

### 3.3.1 Processo via úmida

Este tipo de processo e mais antigo, e esta sendo substituído devido ao alto consumo de energia térmica. Neste processo e adicionado água na matéria prima formando uma pasta necessitando assim de um elevado consumo de energia térmica para fazer a água evaporar (RENO, 2007).

O processo via-úmida precisam de valores de energia térmica acima de 5,0 GJ por tonelada de clínquer (CARPIO, 2005).

### 3.3.2 Processo via semi-úmida

Este tipo de processo vem com o objetivo de melhorar a eficiência do processo via úmida. No processo via semi-úmida há também de água para a moagem do cru, em cerca de 16% a 21%. Neste tipo de processo a pasta crua passa por filtros prensa onde perde parte da sua água (RENO, 2007).

### 3.3.3 Processo via seca

E o tipo de processo mais utilizado, devido ao seu baixo consumo de energia térmica. No processo via seca, as matérias primas são homogenizadas secas sem adição nenhuma de água (RENO, 2007).

Este tipo de processo registra um consumo de energia térmica em cerca de 3800 KJ/KG para fornos equipados com pré-aquecedores de suspensão e 3100 – 3400 KJ/KG para aqueles equipados com pré-calcinadores (RENO, 2007).

### 3.3.4 Processo via semi-seca

Este tipo de processo e adicionado em torno de 12% de água na matéria prima. Apresenta um consumo de energia térmica em cerca de 4000 KJ/KG (RENO, 2007).

### 3.4 FABRICAÇÃO DO CIMENTO E SUAS CARACTERÍSTICAS

Será apresentado abaixo as operações e a descrição do processo de fabricação do cimento Portland.

#### 3.4.1 Extração da matéria-prima

Local de extração da pedra calcária que é considerado a primeira operação. A extração do calcário ocorre em céu aberto em lavras mecanizadas. Uma outra matéria-prima que é extraída juntamente nesta etapa é a argila (BELATO, 2013).

#### 3.4.2 Britagem

É onde é feita a diminuição do tamanho das partículas do calcário que extraído da mina. Nesta operação é importante analisar que quanto menor a dimensão da partícula e maior a superfície de contato irá acelerar as reações que acontecem dentro do forno rotativo (SILVA, 1994).

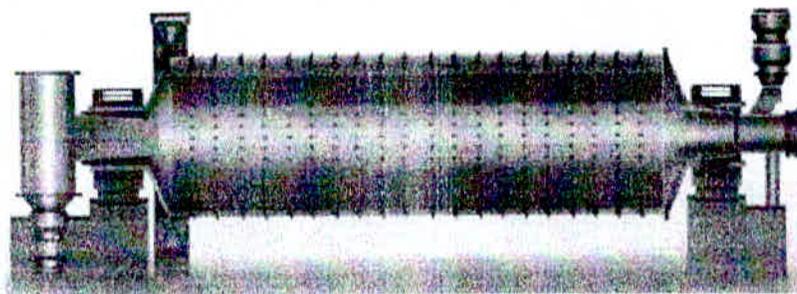
#### 3.4.3 Pré-homogeneização primária e secundária

Após a operação de britagem o calcário tem a necessidade de se misturar para se tornar mais homogêneo sendo armazenado por um período. Logo em seguida o calcário é misturado com a argila onde se realiza uma pré-homogeneização secundária (BELATO, 2013).

#### 3.4.4 Moagem e homogeneização

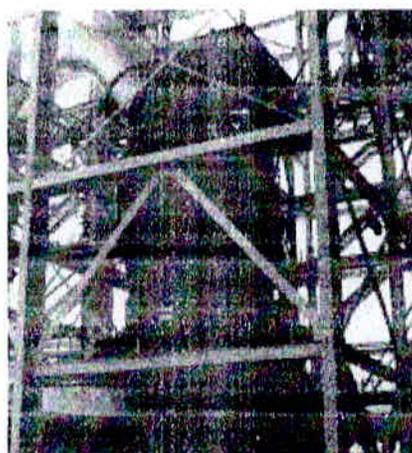
Depois com as misturas das matérias primas é necessário realizar um processo de moagem com o objetivo de redução nos tamanhos das partículas (BELATO, 2013). Abaixo será apresentado os 3 modelos de moinhos utilizados nas indústrias cimenteiras sendo a figura 10 apresenta um modelo de moinho de bolas, na figura 11 apresenta o moinho de rolos vertical e na figura 12 os rolos de moagem de alta energia.

Figura 10 - Moinhos de bolas.



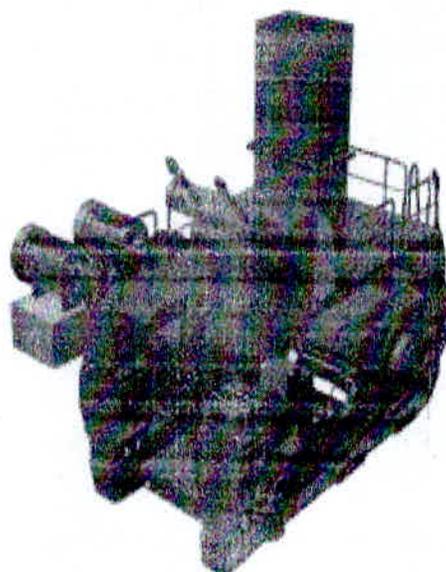
Fonte: (PATFAB ENGINEERS PVT. LTD., 2010 apud BELATO, 1993, p.11).

Figura 11 - Moinho de rolos vertical.



Fonte: (Simmons M., Gordy L. & Terembula J., 2005 apud BELATO, 2013, p.12).

Figura 12 - Rolos de moagem de alta pressão.

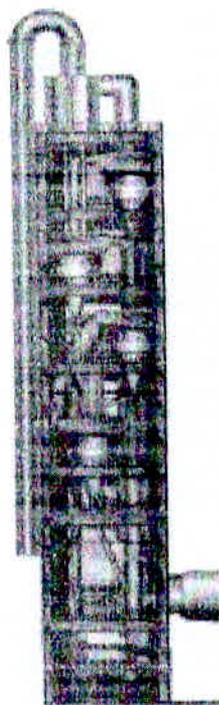


Fonte: (Weir Minerals, 2013 apud BELATO, 2013, p.12).

### 3.4.5 Pré-aquecimento

O pré-aquecimento é um processo que acontece na torre de ciclones que vem antes do forno rotativo de clínquer, que tem a função de retirar a umidade da farinha com a utilização da transferência de calor oriundo dos gases da combustão do forno rotativo (BELATO, 2013). Na figura 13 é possível observar um modelo de pré-aquecedor.

Figura 13 – Pré-aquecedor.

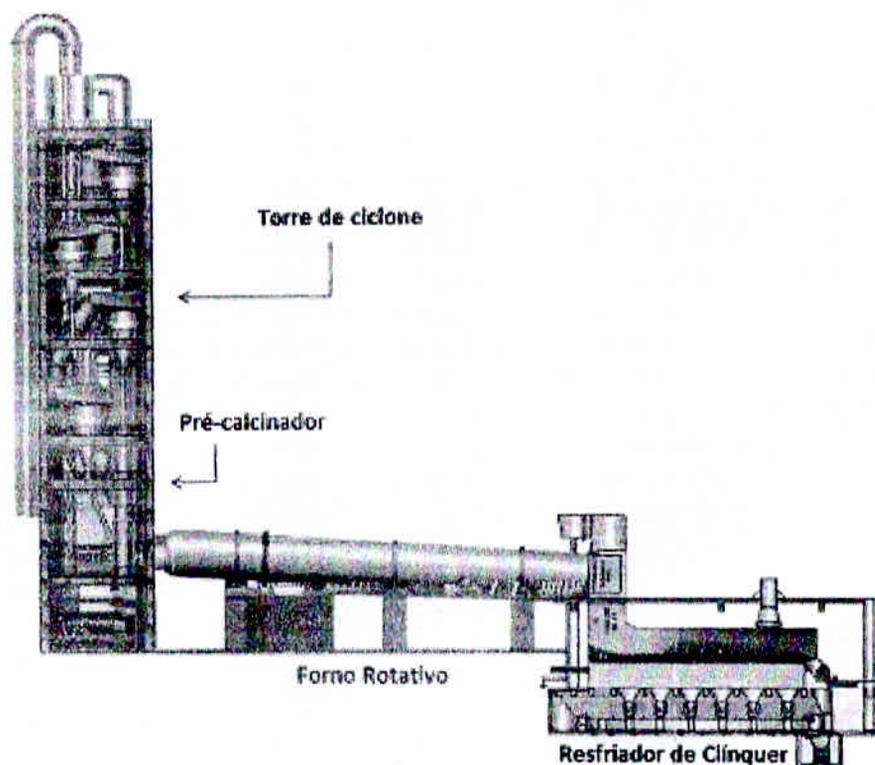


Fonte: (PATFAB ENGINEERS PVT. LTD., 2010 apud BELATO, 2013, p.13).

### 3.4.6 Pré-calцинаção

Logo após a passagem da farinha pelo processo de pré-aquecimento no qual já entra aquecida no pré-calcinador onde é considerado uma câmara de combustão que tem como função realizar o processo de decomposição química do calcário (BELATO, 2013). Na figura 14 apresenta um conjunto do pré-aquecedor, pré-calcinador e forno rotativo.

Figura 14 - Conjunto do pré-aquecedor, pré-calcinador e forno rotativo de clínquer.

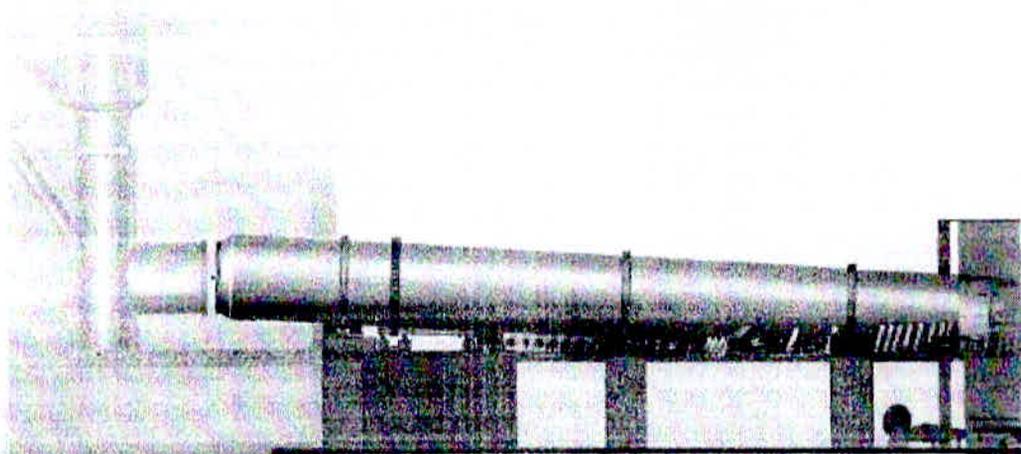


Fonte: Adaptado (PATFAB ENGINEERS PVT. LTD., 2010 apud BELATO, 2013, p.15).

### 3.4.7 Clínquerização

É um processo de reações químicas que acontece com a farinha dentro de um forno rotativo de material refratário e com uma chama a uma temperatura de cerca de 2000°C. O material proveniente do forno sai com uma temperatura cerca de 800°C passa por um resfriador localizado após o forno rotativo, que tem como função realizar o resfriamento rápido do clínquer (BELATO, 2013). Na figura 15 apresenta um modelo de forno rotativo de clínquer.

Figura 15 - Forno rotativo de clínquer.



Fonte: (PATFAB ENGINEERS PVT. LTD., 2010 apud BELATO, 2013, p.16).

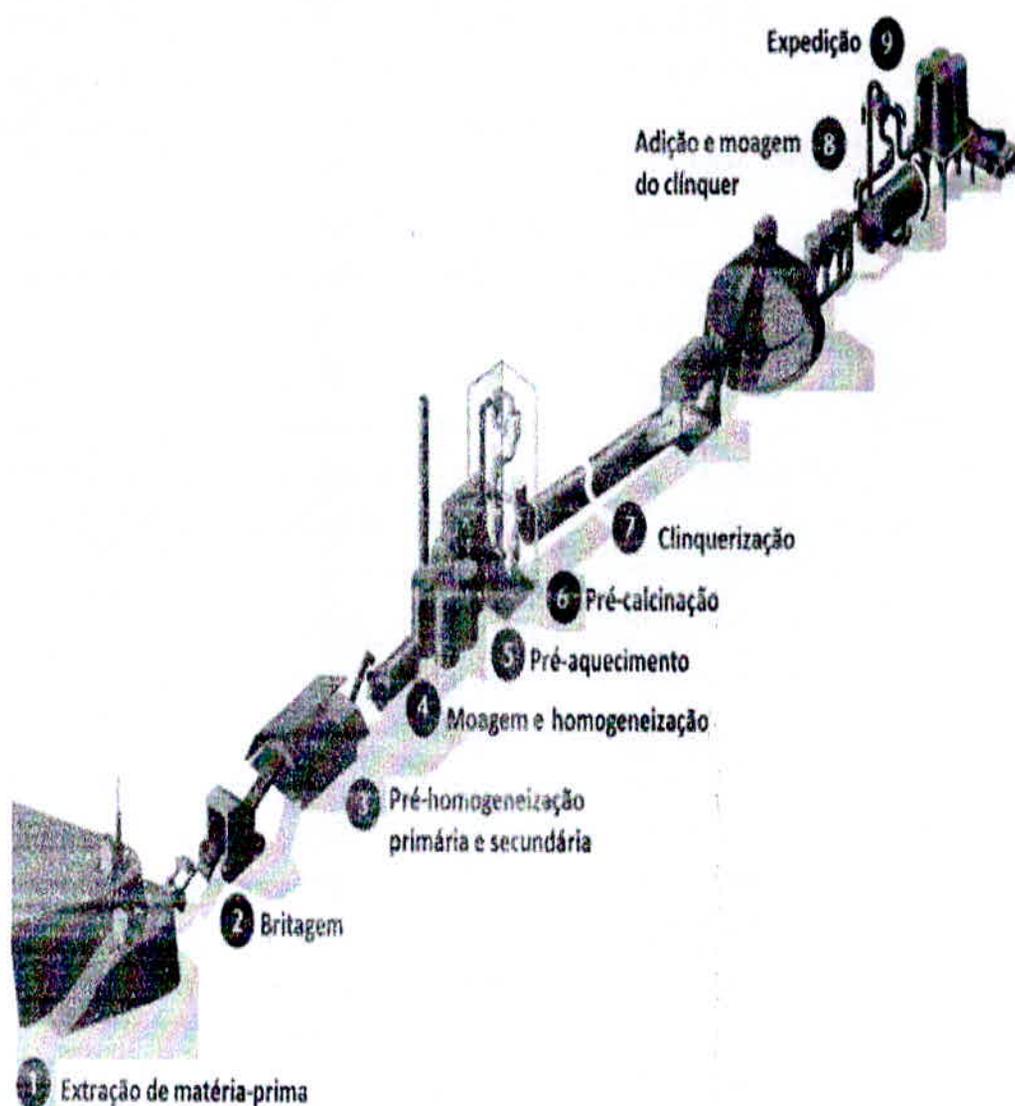
#### 3.4.8 Adição e moagem do clínquer

Após o processo de resfriamento do clínquer. O clínquer é moído juntamente com aditivos em um moinho de bolas. Os aditivos utilizados são gesso, escória e calcário (BELATO, 2013).

#### 3.4.9 Expedição

O cimento produzido poderá ser comercializado de duas formas: a granel ou em sacos de papel kraft de 50 kg (BELATO, 2013). Na figura 16 apresenta um fluxograma com o processo de produção do cimento.

Figura 16 – Fluxograma do processo de produção do cimento.



Fonte: Adaptado (WBCSD, 2009 apud BELATO, 2013, p.18).

### 3.5 MÓDULOS DE CONTROLE DA MISTURA

O clínquer tem a sua composição principalmente dos seguintes óxidos  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . E outros elementos em menor quantidade no quais os principais são  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$  e álcalis (CARPIO, 2005).

A composição química do clínquer, tem influência nas reações de clínquerização como nos seguintes parâmetros: qualidade do clínquer, facilidade de queima e problemas de operação. Estes parâmetros dependem das relações de teores entre os mesmos citados anteriormente. E utilizado quatro módulos para realizar o controle da composição química que

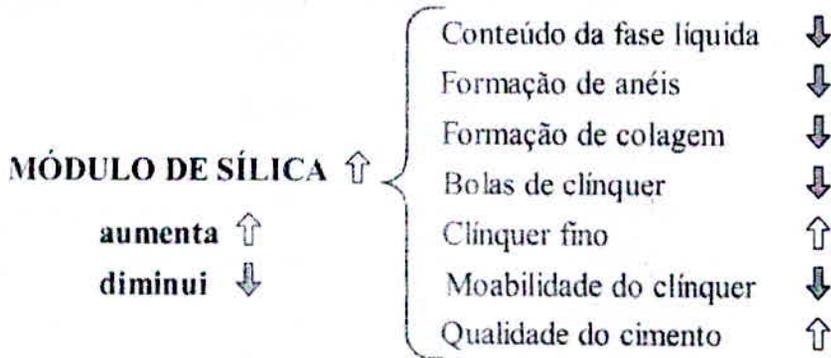
são: módulo de sílica, módulo de alumina, fator de saturação de cal e módulo hidráulico (CARPIO, 2005).

### 3.5.1 Módulo de sílica

O módulo de sílica é representado através de uma equação que relaciona o teor de  $\text{SiO}_2$  e a soma  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  expressos valores de porcentagem. Os valores máximos estabelecidos são os seguintes:  $1,2 < MS < 4,0$ ; sendo que os valores que são considerados ideais estão no intervalo de 2,4 e 2,7. Segue abaixo a equação que representa o módulo de sílica (ABCP, 1984). A figura 17 apresenta os efeitos do módulo sílica na clínquerização

$$MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Figura 17 – Efeitos do módulo sílica na clínquerização.



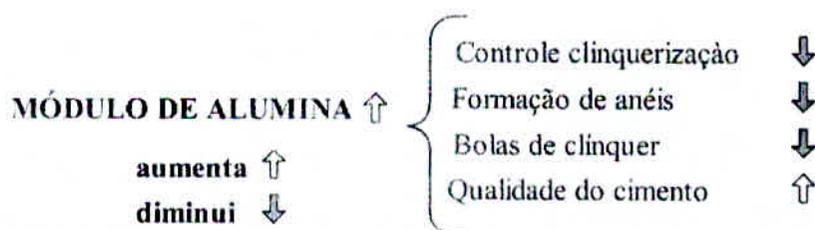
Fonte: (CARPIO, 2005).

### 3.5.2 Módulo de alumina

O módulo de alumina relaciona a alumina com o óxido de ferro, através de uma equação em expressos em valores de porcentagem. Os valores máximos estabelecidos são  $1 < MA < 4$ , sendo o intervalo ideal entre 1,4 e 1,6. Segue abaixo a equação que representa o módulo de alumina (ABCP, 1984). A figura 18 demonstra os efeitos do modo alumina durante a clínquerização.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Figura 18 – Efeitos do modo alumina durante a clínquerização.



Fonte: (CARPIO, 2005).

### 3.5.3 Fator de saturação de cal

O fator de saturação de cal é expresso pela equação abaixo, que seus valores recomendados se encontra entre 90% e 100% em peso. Segue abaixo a equação que representa o fator de saturação de cal (CARPIO, 2005). A figura 19 que demonstra os efeitos do fator de saturação de cal durante a clínquerização.

$$FSC = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3}$$

Figura 19 – Efeitos do fator de saturação de cal durante a clínquerização.

FSC alto	Farinha difícil de queimar; maior consumo de combustível; cal livre alto.
FSC baixo	Farinha fácil de queima; menos consumo de combustível; clínquer muito queimado.
FSC alto	Clínquer de excelente qualidade ( $C_3S > 50\%$ ); baixa resistência.
FSC baixo	Clínquer de péssima qualidade ( $C_3S < 50\%$ ); baixa resistência.

Fonte: (CARPIO, 2005).

### 3.5.4 Módulo hidráulico

O módulo hidráulico relaciona a cal com a soma do dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido férrico sendo expressos em porcentagem inseridos na equação abaixo. Os valores máximos estabelecidos são  $1,7 < MH < 2,2$ , sendo o valor recomendado de 2. Este módulo se assemelha ao de fator de saturação de cal, sendo pouco usado atualmente (ABCP, 1984). Segue abaixo a equação que representa o módulo hidráulico.

$$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

### 3.6 COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS CIMENTOS

A composição do clínquer apresenta como base os seguintes constituintes:  $C_2S$  (Silicato dicálcio),  $C_3S$  (Silicato tricálcio),  $C_3A$  (Aluminato tricálcio) e  $C_4AF$  (Ferroaluminato tetracálcio) depois juntamente com as adições minerais e obtido o cimento como produto (CARPIO, 2005). Na figura 20 apresenta a composição química mineralógica do cimento.

Figura 20 – Composição química mineralógica do cimento.

Componente	% em peso
SiO <sub>2</sub>	19,71 – 24,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,76 – 6,78
CaO	63,76 – 70,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,29 – 4,64
MgO	0,00 – 4,51
SO <sub>3</sub>	0,20 – 2,07
K <sub>2</sub> O	0,31 – 1,76
Na <sub>2</sub> O	0,03 – 0,33
TiO <sub>2</sub>	0,21 – 0,52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02 – 0,27

Fonte: (CEMBUREAU, 1999 apud CARPIO, 2005, p.35).

#### 4 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND

A indústria cimenteira tem como característica nos fornos clínquer a queima de vários tipos de combustíveis

Com o alto consumo de combustíveis, a procura por um combustível economicamente viável. Os dois tipos de combustíveis utilizados são: combustíveis primários que são de origem fósseis e combustíveis alternativos que são os resíduos. A figura 21 que demonstra a relação de combustíveis primários, a figura 22 apresenta a relação de combustíveis alternativos já na figura 23 encontra a relação de resíduos proibidos de serem coprocessados em fornos clínquer.

Figura 21 -Relação de combustíveis primários.

<b>Combustíveis Primários</b>
Coque de Petróleo
Gás Natural
Carvão Mineral
Óleo Combustível

Fonte: (O Autor).

Figura 22 - Relação de combustíveis alternativos.

COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS SÓLIDOS			COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS LÍQUIDOS	
PRODUTOS SINTÉTICOS	PRODUTOS NATURAIS	OUTROS PRODUTOS	BAIXA TOXICIDADE FÁCIL DECOMPOSIÇÃO	ALTA TOXICIDADE DIFÍCIL DECOMPOSIÇÃO
Papel e papelão	Xisto oleoso	Resíduo de tapeçaria	Breu	Hidrocarbonetos poliaromáticos
Pó de grafite	Resíduos de madeira	Resíduos urbanos	Lama ácida	Bifenila policlorada
Pasta de carvão	Palha de arroz	Resíduos de material fibroso	Resíduos oleosos	Comp. Aromáticos contendo cloro
Resíduo plástico	Casca de coco	Refugo de biogás	Resíduos petroquímicos	Comp. Cíclicos contendo cloro
Resíduo de borracha	Semente de oliva	Lama de esgoto	Resíduos da indústria de tinta	
Pneus inservíveis	Casca de amendoim		Resíduos químicos	
Resíduo de bateria	Resíduo de cana-de-açúcar		Lama asfáltica	
Bentonita ativada			Borra oleosa	

Fonte: Adaptado (Terry, 1999 apud SALOMON, 2002, p.47)

Figura 23 - Relação de resíduos proibidos de serem coprocessados.

<b>Tipos de Resíduos Proibidos de Serem Coprocessados</b>
Resíduos hospitalares não-tratados;
Lixo doméstico não-classificado;
Explosivos;
Elementos radioativos;
Pesticidas;
Fossas orgânicas;
Materiais com alto teor de metais pesados;
Materiais com alto teor de cloro;
Materiais com baixo poder calorífico ou sem contribuição na substituição de matérias-primas.

Fonte: Adaptado (CARPIO, 2005).

#### 4.1 Combustíveis primários da indústria do cimento portland

Será demonstrado os tipos e características dos combustíveis primários que são de origem fóssil utilizados na indústria do cimento portland.

##### 4.1.1 Coque de petróleo

O coque de petróleo e o subproduto do processo de craqueamento das refinarias. É um material granular de coloração negra que se assemelha a um carvão. Sua composição apresenta cerca de 90% a 95% de carbono e cerca 5% de enxofre. No Brasil é o tipo de combustível mais utilizado na indústria cimenteira.

Existem 2 tipos de coque de petróleo que são: o coque verde e o coque calcinado. Sendo que o coque verde é obtido de coprodutos do craqueamento de óleos residuais pesados e são divididos em dois subgrupos: agulha e esponja. O coque agulha é obtido a partir de óleos aromáticos pesados. O coque esponja é obtido a partir da destilação a vácuo de óleos residuais (BELATO, 2013).

Para a indústria cimenteira uma característica analisada no coque de petróleo, e a sua granulometria pois se o coque de petróleo não tiver um alto grau de finura terá que ficar um maior tempo na moagem com isso aumentará o gasto energético (BELATO, 2013).

Na figura 24 apresenta uma análise de composição química de coques de petróleo verde de origens diferentes.

Figura 24 – Análise de composição química de coques de petróleo verde.

Composição do combustível (%)	Coque de Petróleo Verde				
	Brasil	Argentina	China	EUA	Indonésia
Carbono	91,95	91,09	92,10	91,02	92,22
Hidrogênio	3,63	3,61	3,73	3,70	3,94
Oxigênio	0,89	1,56	1,04	0,67	1,32
Nitrogênio	2,63	2,08	2,30	1,67	1,63
Enxofre	0,79	1,45	0,68	2,81	0,53
Cinzas	0,11	0,21	0,15	0,13	0,36
Umidade	5,1	7,2	1,2	6,4	5,7
PCI (kJ/kg)	35946	36425	36293	36362	36439

Fonte: Adaptado (Lee et al, 1998 apud BELATO, 2013, p.33).

Na sua composição apresenta, um alto teor de enxofre fazendo com que os usuários realize o controle das emissões atmosféricas. A figura 18 abaixo demonstra o coque de petróleo.

#### 4.1.2 Gás natural

O gás natural é um tipo de combustível gasoso, sendo pouco utilizado como combustível na queima em fornos clínquer. O gás é encontrado em rochas porosas subterrâneas. O gás natural pode ser dividido em dois tipos: associado e não associado. O tipo de gás associado vem diluído em óleo no reservatório. O gás não associado encontra-se livre do óleo ou junto em pequenas quantidades (SALOMON, 2002). A figura 25 apresenta a composição do gás natural associado e não associado e após o processo na unidade de processamento de gás natural.

Figura 25 - Composições típicas do gás natural, em % volumétrico.

Elementos	Associado (1)	N. Associado (2)	Processado (3)
Metano	81,57	87,12	88,56
Etano	9,17	6,35	9,17
Propano	5,13	2,91	0,42
I-Butano	0,94	0,52	-
N-Butano	1,45	0,87	-
I-Pentano	0,26	0,25	-
N-Pentano	0,30	0,23	-
Hexano	0,15	0,18	-
Heptano e Superiores	0,12	0,20	-
Nitrogênio	0,52	1,13	1,20
Dióxido de Carbono	0,39	0,24	0,65
Total	100	100	100
Densidade	0,71	0,66	0,61
Riqueza (% Mol C <sup>2+</sup> )	8,35	5,16	0,42
Poder Cal. Inf. [kcal/m <sup>3</sup> ]	9.916	9.249	8.621
Poder Cal. Sup. [kcal/m <sup>3</sup> ]	10.941	10.223	9.549

1- Gás do campo de Garoupa, Bacia de Campos

2- Gás do campo de Miranga, na Bahia

3- Saída da UPGN Candeias, na Bahia

Fonte: (PETROBRÁS/CONPET, 2001 apud SALOMON, 2002, p.41).

As especificações do gás para consumo são ditadas pela Portaria N° 41 de 15 de abril de 1998, emitida pela Agência Nacional do Petróleo, sendo dividido em três grupos separados por faixa de poder calorífico. O gás mais comercializado no Brasil é do tipo M (médio) que possui Poder Calorífico Superior (na condição de 20°C de temperatura ambiente e pressão de 101 kPa) de aproximadamente 36850 a 43000 kJ/m<sup>3</sup> (SALOMON, 2002).

O gás natural depois de ser tratado e processado tem sua utilização em comércios, residências, indústrias e veículos.

#### 4.1.3 Óleo combustível

O óleo combustível derivado do petróleo, é resultado do processo de destilação das frações de petróleo, conhecido como frações pesadas.

De acordo com RENO (2007) os óleos combustíveis são diversos tipos, de acordo com a sua origem e características. No Brasil são classificados em dois grupos A e B.

Grupo A: Teor de enxofre máximo (5% em massa – óleo 1 A e 5,5% em massa – demais tipos) (RENO, 2007).

Grupo B: Teor de enxofre máximo (1% em massa) (RENO, 2007).

Na figura 26 apresenta algumas características típicas de óleo combustível do tipo A e B.

Figura 26 – Características típicas do óleo combustível do tipo A e B.

Óleo Combustível (tipo)	Viscosidade (SSF) 50°C (máx.)	Densidade (20°C/4°C)	Enxofre (% peso)	Ponto de fulgor	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
1 A	600	1,003	2,20	85	42724	40391
2 A	900	1,007	2,80	105	42168	39927
3 A	2400	1,010	2,85	103	42130	39927
4 A	10000	1,013	3,50	100	42711	40391
7 A	300000	1,027	4,30	160	42385	40115
8 A	1000000	1,030	4,90	240	40613	39371
1 B	600	0,965	0,80	82	43589	41123
2 B	900	0,976	0,74	85	42247	41043
3 B	2400	0,979	1,00	80	44425	41833
4 B	10000	0,980	1,00	92	44032	41461
7 B	300000	1,015	0,91	240	42736	40487

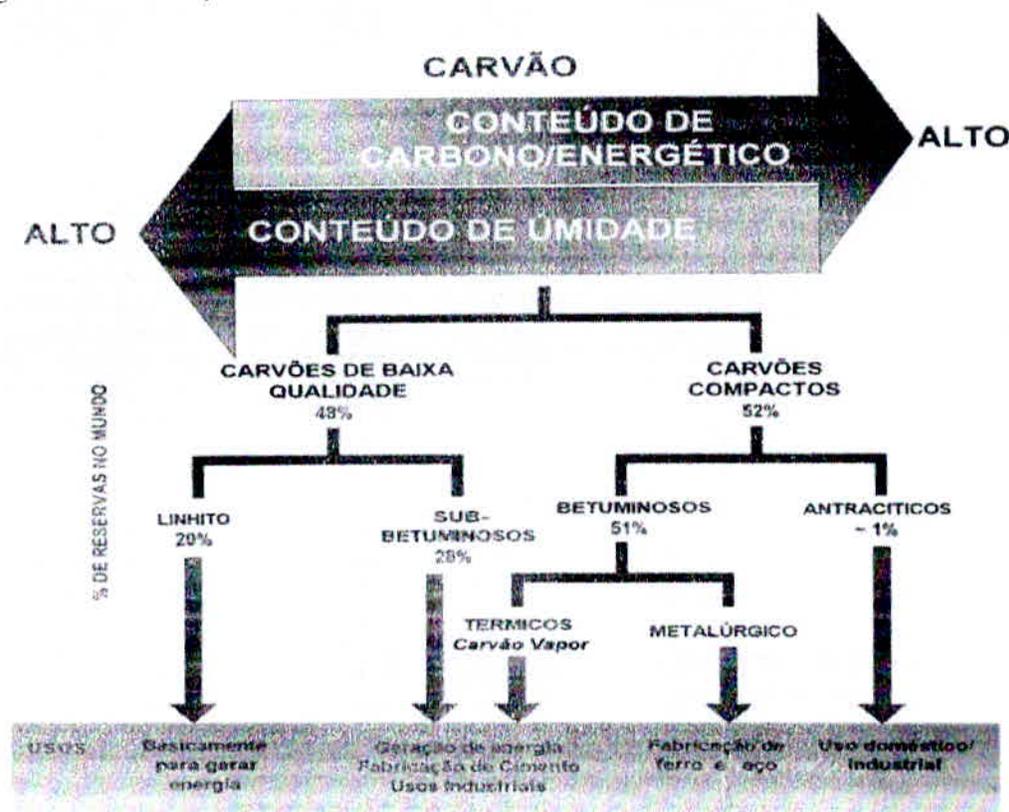
Fonte: (Lora e Nascimento, 2004 apud RENO, 2007, p.32).

#### 4.1.4 Carvão mineral

O carvão mineral é um tipo de combustível fóssil e sólido, composto pela mistura de componentes orgânicos ao longo de milhões de anos. O carvão mineral pode ser classificado

pela quantidade de carbono, enxofre, hidrogênio, cinzas e poder calorífico (CARPIO, 2005). Na figura 27 encontra as classificações do carvão mineral e o total de reservas no mundo.

Figura 27 - Classificações do carvão mineral e o total de reservas no mundo



Fonte: (CARPIO, 2005).

De acordo com CARPIO (2005) o carvão mineral brasileiro, apresenta um alto teor de cinzas que dificulta o seu uso como recurso energético pois a presença de cinzas no mesmo faz a redução do poder calorífico. Com o objetivo da solução do problema, e aplicado o processo de beneficiamento que é regido pela NBR 8.289 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), pois o mesmo descreve o método para determinação do teor de cinzas no carvão mineral. Na figura 28 são apresentados, os componentes químicos das cinzas dos carvões minerais.

Figura 28 – Componentes químicos das cinzas do carvão mineral.

Elementos Principais	SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , CaO, MgO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> e SO <sub>3</sub> .
Elementos traços	Mn, Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, As, outros.

Fonte: (MCT, 2002 apud CARPIO, 2005, p.67).

## 4.2 Combustíveis alternativos da indústria do cimento portland

Será demonstrado os tipos e características dos combustíveis alternativos que são geralmente resíduos sólidos urbanos ou oriundos de atividades industriais utilizados na indústria do cimento portland.

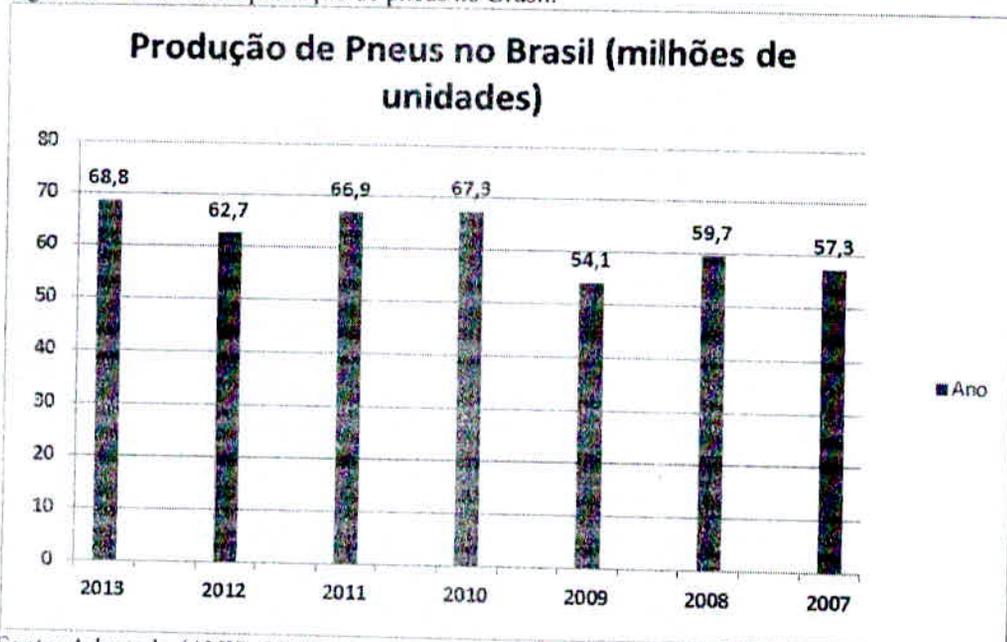
### 4.2.1 Pneus inservíveis

De acordo com a Resolução CONAMA nº 416/2009 dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e estabelece que as empresas fabricantes e importadoras de pneus são as responsáveis pela destinação deste resíduo (BRASIL, 2009).

A Lei nº 12.305/2010 institui a PNRS (Política Nacional dos Resíduos Sólidos), que dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

Segundo os dados registrados pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP). A figura 29 que representa o número de produção de pneus no Brasil no período de 2007 a 2013.

Figura 29 - Gráfico da produção de pneus no Brasil.



Fonte: Adaptado (ANIP, 2013).

E possível observar que em 2013, teve o maior registro de produção de pneus no Brasil em virtude do crescimento econômico e da venda de automóveis.

Os pneus inservíveis são excelentes formas, como combustíveis secundários em fornos clínquer. Sendo que um pneu de um automóvel tem o seu peso aproximado em 7,2 Kg e com uma capacidade aproximada de 238 MJ de energia térmica (Ferrer, 1997 apud CARPIO, 2005, p.74). A figura 30 registra algumas características típicas e composição química do pneu.

Figura 30 – Composição química e PCI em kJ/kg de amostras de raspas de pneu.

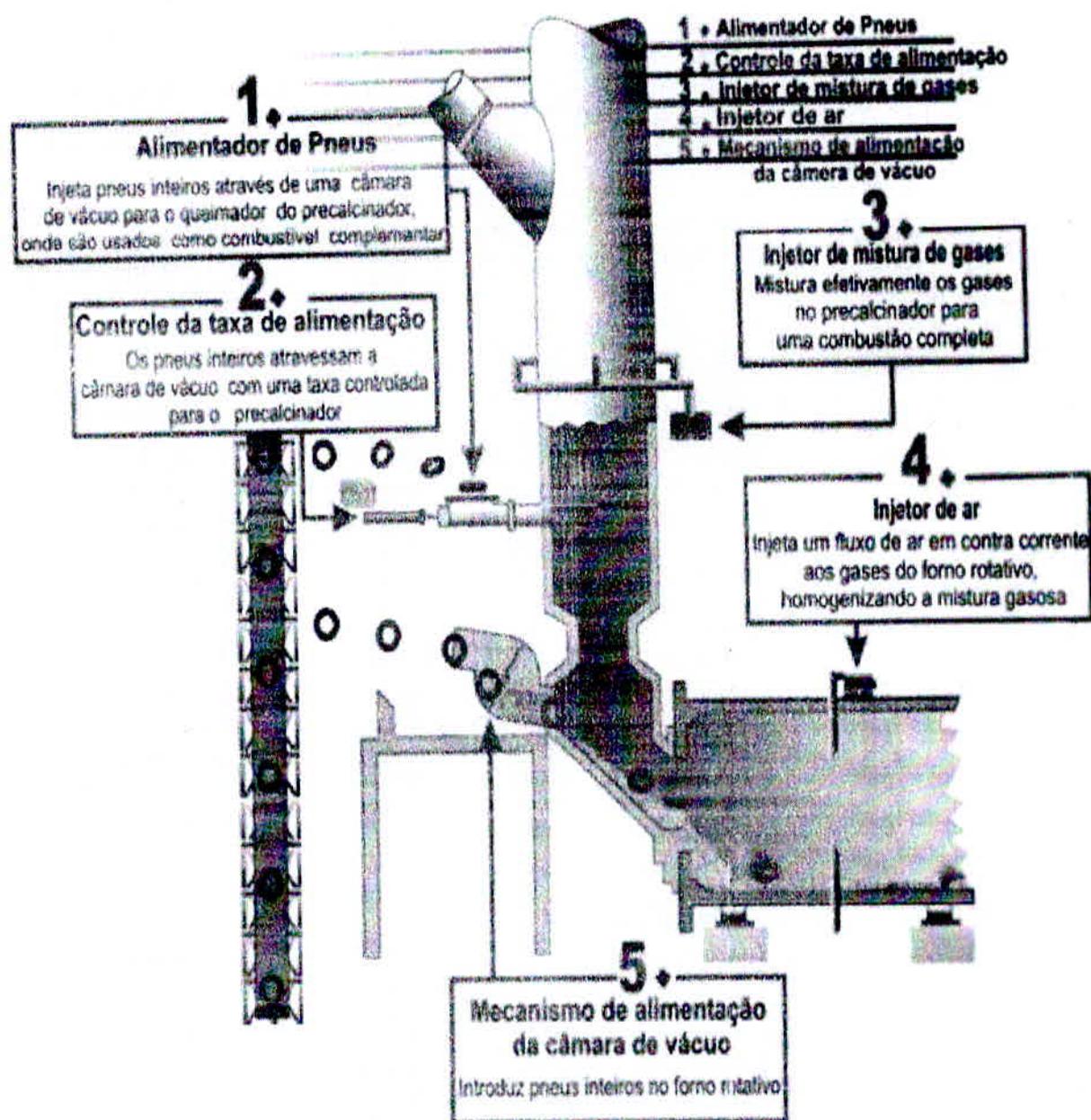
Composição do combustível (%)	Raspas de Pneu			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Carbono	72,30	75,90	77,60	79,00
Hidrogênio	7,10	6,50	5,90	5,40
Enxofre	1,54	2,00	1,10	1,47
Oxigênio	5,00	0,50	0,30	1,80
Nitrogênio	0,36	0,50	0,10	0,06
Umidade	0,14	0,07	0,40	0,09
Cinzas	13,70	14,60	15,00	12,20
Voláteis	61,70	59,10	61,50	38,30
PCI (kJ/kg)	33650	38970	35118	36055

Fonte: Adaptado (Akkapeddi, 2008 apud BELATO, 2013, p.51).

Os pneus podem ser inseridos de três maneiras no sistema de alimentação do combustível sendo: inteiro, picado ou raspas (SIGNORETTI, 2008).

No Brasil muitas indústrias cimenteiras utiliza um equipamento chamado hot disc para a alimentação de pneus inteiro nos fornos dotados de pré-aquecedor/pré-calcinador (SIGNORETTI, 2008). Como pode ser observado na figura 31.

Figura 31 – Hot disc equipamento de inserção de pneu.



Fonte: (cadencerecycling.com, 2006 apud SIGNORETTI, 2008, p.82).

#### 4.2.2 Resíduos agrícolas

Segundo SILVA (1994) a indústria de alimentos e bebidas, através de seus processos industriais para a produção de seus produtos como a fabricação de sucos, amendoins, arroz entre outros. Como resultado desta atividade é gerado vários tipos de resíduos que contêm em sua composição basicamente proporções de celulose, resina, cinzas etc.

Para CARPIO (2005) estes resíduos agrícolas geram um impacto ambiental como: contaminação de águas subterrâneas, aumento das pragas, contaminação atmosféricas etc. Devido a este impacto ambiental, tem a necessidade de estabelecer um plano de gestão destes resíduos, que tem objetivo converte-los em: adubo orgânico ou combustível. A figura 32 abaixo demonstra o teor de cinzas, poder calorífico e teor de umidade de alguns resíduos agrícolas. Já na figura 33 apresenta uma análise da composição das cinzas da casca do arroz.

Figura 32 - Teor de cinzas, poder calorífico e teor de umidade de alguns resíduos agrícolas

RESÍDUOS	UMIDADE [% em peso]	CINZAS [% em peso]	PODER CALORÍFICO [kJ/kg]
Casca/palha de arroz	10,6	20,1	12.550
Palha de trigo	9,2	18,0	15.900
Caule de algodão	12,0	13,5	13.800
Palha de milho	11,5	14,2	19.670
Sabugo de milho	8,6	13,8	14.650
Caule de mamona	-	-	19.950
Casca de mamona	-	-	15.340
Pó de bambú	-	10,0	15.890

Fonte: (Ahluwala e Page, 1992 apud CARPIO, 2005, p. 77).

Figura 33 - Análise da composição das cinzas de casca de arroz.

Constituinte	Cinzas de casca de arroz
CaO	1,85
SiO <sub>2</sub>	88,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26
MgO	0,46
Cinzas (%)	19,50
Materiais Voláteis (%)	65,18
Poder Calorífico (kJ/kg)	13.438,70

Fonte: Adaptado (Barkakati et al., 1994 apud CARPIO, 2005, p.78).

#### 4.2.3 Óleos lubrificantes usados ou contaminados (Olucs)

Segundo a NBR 10.004/2004, os óleos lubrificantes são classificados como resíduo perigoso – classe I devido a sua composição apresentar ácidos orgânicos, Hidrocarbonetos Polinucleares Aromáticos (HPAs) e dioxinas e além de metais pesados. O tipo de combustível utilizado na indústria cimenteira, e o tipo de resíduo denominado como óleos combustíveis usados ou contaminados (Olucs) (ABNT, 2004).

Conforme a Resolução do CONAMA nº 362/2005 que regulamenta o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado (BRASIL, 2005).

De acordo com a Resolução do CONAMA nº 450/2012, altera o artigo 9 da Resolução do CONAMA 362/2005, que impõe o percentual mínimo de coleta de óleo lubrificante usado ou contaminado, venha com um relatório justificativo acompanhado e recolhido pelo IBAMA (BRASIL, 2012).

O processo de rerrefino consiste na remoção de contaminantes, produtos de degradação e aditivos dos óleos lubrificantes usados, cuja as características técnicas são iguais as do óleo de primeiro refino. O processo de rerrefino é regido pela Portaria ANP – 130/1999, que o processo industrial conta com três tecnologias diferentes que são as seguintes:

- a) Sistema Ácido Argila com “Termo Craqueamento”. Nessa modalidade de tecnologia, predomina a obtenção de óleo básico neutro pesado;
- b) Sistema de Destilação a Flash ou evaporação pelicular. Essa tecnologia propicia a obtenção predominante de óleo básico neutro leve e médio;
- c) Sistema por extração a solvente seletivo de propano. Essa tecnologia propicia a obtenção de óleo básico neutro médio.

#### 4.2.4 Resíduos sólidos urbanos

A utilização de resíduos sólidos urbanos (RSU) como combustível alternativo em fornos de clínquer, teve início nas duas últimas décadas. Devido a grande variação que é encontrada diariamente na composição de RSU e pela apresentação de um alto teor de umidade. Estas características podem ocasionar problemas na operação do pré-aquecedor e o forno devido ao alto teor Cl, Na e K (HALEY, 1985 apud SILVA, 1994, p.98).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) para ser utilizado no coprocessamento, é necessário realizar um pré-tratamento no resíduo com as seguintes atividades de trituração, pesagem da matéria prima, medição do poder calorífico e análise química. Com o objetivo da

separação da matéria prima reciclável, da matéria prima orgânica com alto teor de umidade do rejeito gerando assim o RDF (Refused Derived Fuel). O RDF (Refused Derived Fuel) é o combustível alternativo utilizado em fornos de clínquer. As cinzas que são produzidas pela queima do RDF, apresenta como característica a incorporação junto ao clínquer como adição mineral diminuindo assim a quantidade de matéria prima (HALEY, 1985 apud SILVA, 1994, p.98).

Segundo um estudo indica que uma fábrica na Inglaterra do Grupo Blue Circle's em Westbury, desde 1979 tem utilizado o RDF como combustível secundário com um grau de substituição parcial em torno de 20% do carvão. A figura 34 demonstra a composição química elementar do RDF. Na figura 35 demonstra uma análise química das cinzas geradas pela queima do RDF. Já na figura 36 encontra os valores do poder calorífico inferior e superior do RDF utilizado Grupo Blue Circle's em Westbury (HALEY, 1985 apud SILVA, 1994, p.98).

Figura 34 – Composição química elementar do RDF (% em peso).

C	H	N	S	Cl	Cinzas	Umidade
34,2	5	1,1	0,4	0,8	29,6	34,6

Fonte: Adaptado (HALEY, 1985 apud SILVA, 1994, p.98).

Figura 35 - Análise química das cinzas do RDF (% em peso).

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO
51,6	14,9	11,5	4,7	5,7	1,9	0,3

Fonte: Adaptado (HALEY, 1985 apud SILVA, 1994, p.98).

Figura 36 – Poder calorífico inferior e superior do RDF (kJ/kg).

Poder Calorífico Inferior	Poder Calorífico Superior
9.235	10.714

Fonte: Adaptado (HALEY, 1985 apud SILVA, 1994, p.98).

## 5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

O coprocessamento é uma atividade que tem legislação em território federal e estadual. Os seguintes estados tem sua legislação própria: Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo. A seguir será apresentada uma análise da legislação federal e do estado de Minas Gerais e da legislação europeia aplicadas no processo de licenciamento do coprocessamento.

### 5.1 Legislação federal

De acordo com a Resolução do CONAMA nº 264 do ano de 1999, trata-se do licenciamento para a prática do coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção em clínquer (BRASIL, 1999). O processo para obter-se o licenciamento para instalação e operação do coprocessamento deve ser requerido nos órgãos ambientais competentes e tem que estar fundamentado tecnicamente nos seguintes parâmetros:

01) Estudo de Viabilidade de Queima (EVQ): O EVQ é um documento que deverá conter as seguintes informações dados básicos da empresa, descrição do processo produtivo, equipamentos de controle de poluição, matérias primas, combustíveis e as características qualitativas e quantitativas dos resíduos a serem coprocessados (BRASIL, 1999).

02) Plano de Teste em Branco: Com a aprovação do EVQ pelo órgão ambiental, deverá ser montado o Plano de Teste em Branco. Neste documento é necessário conter a descrição de como será realizado o teste em branco, os equipamentos e os parâmetros que serão utilizados (BRASIL, 1999).

03) Relatório do Teste em Branco: Após a aprovação do Plano de Teste em Branco, e com a realização do teste em branco a empresa deverá montar o documento chamado de Relatório do Teste em Branco para a entrega no órgão ambiental. Nele deverá conter os resultados do Teste em Branco, com detalhes e descritos no Plano (BRASIL, 1999).

04) Plano de Teste de Queima (PTQ): De acordo com a aprovação do Relatório do Teste em Branco, terá que ser montado pela empresa o Plano de Teste de Queima. No mesmo deverá conter o objetivo de realização do teste, descrição e fluxograma do processo produtivo, descrição dos equipamentos do forno, descrição de cada resíduo e a descrição de como será realizado o teste de queima e demais parâmetros (BRASIL, 1999).

05) Relatório do Teste de Queima: Seguido da aprovação do PTQ, a empresa deverá apresentar ao órgão ambiental o Relatório do Teste de Queima. O mesmo deverá conter os resultados do Teste de Queima. Se o órgão ambiental dar aprovação, a empresa já está apta para o coprocessamento deste resíduo (BRASIL, 1999).

06) Estudo de Análise de Risco (EAR): Este último documento, deverá ser entregue pela empresa. Nele deverão estar descritos as informações das etapas de transporte, armazenamento e processamento dos resíduos que serão coprocessados no forno. Com a aprovação do órgão ambiental, a empresa já obterá a autorização para o coprocessamento.

Em anexo a todos os documentos citados anteriormente, deverá ser entregue um plano de treinamento e emergências para os colaboradores envolvidos com a operação das unidades de mistura, pré-condicionamento e coprocessamento de resíduos (BRASIL, 1999).

A Resolução do CONAMA nº 264 estabelece o monitoramento e os limites máximos de emissões de poluentes na atmosfera. Os limites máximos de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  são de responsabilidade do órgão ambiental local. De acordo com a figura 37, apresenta os limites máximos de emissões de poluentes na atmosfera.

Figura 37 - Limites máximos de emissão de poluentes.

POLUENTE	LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÃO
HCL	1,8 kg/h ou 99% de redução
HF	5 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
CO*	100 ppmv corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
MP	70 mg/Nm <sup>3</sup> farinha seca corrigido a 11% de O <sub>2</sub> (base seca)
THC (expresso como propano)	20 ppmv corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
Mercúrio (Hg)	0,05 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
Chumbo (Pb)	0,35 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
Cádmio (Cd)	0,10 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
Télio (Tl)	0,10 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)	7,0 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 7% de O <sub>2</sub> (base seca)

\* As concentrações de CO na chaminé não poderão exceder a 100 ppmv em termo de média horária.

Fonte: (BRASIL, 1999).

Segundo a Resolução do CONAMA n° 264 estabelece o monitoramento contínuo das seguintes emissões: MP, O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e THC. E o monitoramento periódico para as seguintes emissões: SO<sub>x</sub>, PCOPs, HCl/Cl<sub>2</sub> e HF (BRASIL, 1999).

Avaliando a Resolução citada anteriormente, e possível analisar que ainda falta algumas questões a serem estabelecidas e outras melhoradas. Deveria ser contemplado um controle para análise das características de resíduos que são utilizados para formar o blend, pois as cimenteiras tem se aumentando gradativamente o uso desta tecnologia para a queima no forno. O mesmo define que deve ser feito um controle para resíduos sólidos que serão coprocessados, mas não se define uma frequência mínima (BRASIL, 1999).

A Resolução do CONAMA n° 316, de 29 de outubro de 2002 estabelece padrões e normas para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. O coprocessamento deverá seguir a Resolução do CONAMA n° 264 de 1999, tendo como exceção as dioxinas e furanos que deverá obedecer esta Resolução. O mesmo estabelece o monitoramento periódico das seguintes emissões: dioxinas e furanos (BRASIL, 2002).

A lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece diretrizes relativas a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos que tem com o objetivo a extinção de todo tipo de destinação incorreta de resíduos

como por exemplo: os lixões. Desta maneira a indústria cimenteira, se apresenta como alternativa ambientalmente segura para estes resíduos (BRASIL, 2010a).

O decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos que tem o objetivo de instituir os procedimentos para a elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos e demais trabalhos (BRASIL, 2010b).

## 5.2 Legislação estadual

A seguir analisa-se a legislação que rege o coprocessamento de resíduos da indústria cimenteira no estado de Minas Gerais. Pois o estado é o principal polo cimenteiro do Brasil.

### 5.2.1 Legislação de Minas Gerais

A legislação estadual de Minas Gerais, aplicada no processo de licenciamento de coprocessamento e a Deliberação Normativa COPAM nº 154, de 25 de agosto de 2010 (MINAS GERAIS, 2010).

Segundo a DN COPAM nº 154/2010 (MINAS GERAIS, 2010), institui que os resíduos para serem coprocessados deverá apresentar um PCI mínimo de 8373 KJ/Kg. O mesmo liberou a queima de resíduos domiciliares pré tratados ou tratados, sendo que o PCI mínimo exigido para o coprocessamento é 6280 KJ/Kg esta liberação representa um grande avanço pois amplia a gama de resíduos que poderão ser coprocessados pois os resíduos domiciliares pré tratados ou tratados apresentam um poder calorífico alto.

As matérias primas secundárias tem algumas restrições nesta norma. A DN COPAM nº 154/2010 (MINAS GERAIS, 2010) exige que somente resíduos com os elementos Ca, Si, Al, Fe, F, S, K e Na poderão ser utilizados se a sua concentração for superior a 45%, ainda respeitando os limites máximos de emissão podem ser utilizados como matéria prima secundária.

Na Resolução CONAMA nº 264, não estabelece limites máximos de metais na entrada do forno (BRASIL, 1999b). Diferentemente na DN COPAM nº 154/2010 (MINAS GERAIS, 2010) que impõe limites máximos de metais para a entrada no forno, que deve ser para a mistura de resíduos (blend) e não para o resíduo individual. Os limites máximos de metais para a entrada no forno, deverá ser de acordo com a figura 38.

Figura 38 – Limites máximos para a entrada metais no forno.

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

Fonte: (MINAS GERAIS, 2010).

Os limites máximos de emissões de poluentes, estabelecidos pela DN COPAM nº 154/2010 (MINAS GERAIS, 2010) e a DN COPAM nº 026/1998 (MINAS GERAIS, 1998), que era legislação utilizada em Minas Gerais são os de acordo com a figura 39.

Figura 39 - Os limites máximos de emissões de poluentes, estabelecidos pela DN COPAM nº 154/2010 e a DN COPAM nº 026/1998.

Parâmetro	Concentrações	
	DN COPAM nº 154	DN COPAM nº 26
HCl	1,8 kg/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos que contenham mais de 0,5% de Cloreto	1,8 kg/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos que contenham mais de 0,5% de Cloreto
HF	5 mg/Nm <sup>3</sup>	5 mg/Nm <sup>3</sup>
CO	100 ppm <sup>(1)</sup>	100 ppm <sup>(1)</sup>
SO <sub>x</sub> - medido como SO <sub>2</sub>	280 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup> , exceto quando o enxofre for proveniente da matéria-prima. Nesses casos, o limite máximo se baseará no valor de SO <sub>x</sub> , calculado da seguinte forma: Para um teor de até 0,2% de SO <sub>3</sub> na farinha: 400 mg/Nm <sup>3</sup> , expresso como SO <sub>2</sub> ; Para um teor entre 0,2% e 0,4% de SO <sub>3</sub> na farinha, conforme a fórmula abaixo: 400 mg/Nm <sup>3</sup> + (%SO <sub>3</sub> - 0,2) x 4000 mg/Nm <sup>3</sup> , expresso como SO <sub>2</sub> ; Para um teor acima de 0,4% de SO <sub>3</sub> na farinha: 1.200 mg/Nm <sup>3</sup> , expresso como SO <sub>2</sub> .	280 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup>
NO <sub>x</sub> - medido como NO <sub>2</sub>	450 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup> - Para fontes novas 730 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup> - Para fontes existentes *	560 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup>
Material Particulado Total	50 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup> - Para fontes novas 70 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup> - Para fontes existentes	70 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>(1)</sup>
THC	20 ppmv <sup>(2)</sup> , medido como propano	-
Tolueno, Etilbenzeno, Xileno	100 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h (verificar TA Luft).	-
Benzeno	20 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h (verificar TA Luft).	-

<sup>(1)</sup> Corrigido a 11% de O<sub>2</sub> (base seca)

<sup>(2)</sup> Corrigido a 7% de O<sub>2</sub> (base seca)

Fonte: Adaptado de (Minas Gerais, 2010) e (Minas Gerais, 1998).

Avaliando a DN COPAM nº 154/2010 (MINAS GERAIS, 2010) e possível observar os avanços obtidos como a liberação da queima de resíduos domiciliares pré tratados ou tratados. Em relação as emissões de poluentes teve um aumento nos limites máximos estabelecidos em relação a DN COPAM nº 026/1998 (MINAS GERAIS, 1998), isso representa um retrocesso na legislação ambiental estadual, pois traz impactos negativos ao meio ambiente e sociedade.

### 5.3 Legislação europeia

A legislação europeia aplicada no coprocessamento, e a referente a incineração de resíduos, é a Diretiva 2000/76/EC de 28 de dezembro de 2000 (EC, 2000).

De acordo com a Diretiva 2000/76/EC de 28 de dezembro de 2000 (EC, 2000) ela estabelece limites máximos de emissões de poluentes na atmosfera pelo coprocessamento, que tem o objetivo de reduzir o máximo possível os impactos ambientais ocasionados pelo coprocessamento. A figura 40 demonstra os limites máximos de emissões de poluentes que são calculados nas seguintes condições: 273K de temperatura, 101,3 kPa de pressão e 10% de O<sub>2</sub> livre em via seca.

Figura 40 - Limites da emissão total de poluentes no coprocessamento, em mg/m<sup>3</sup>.

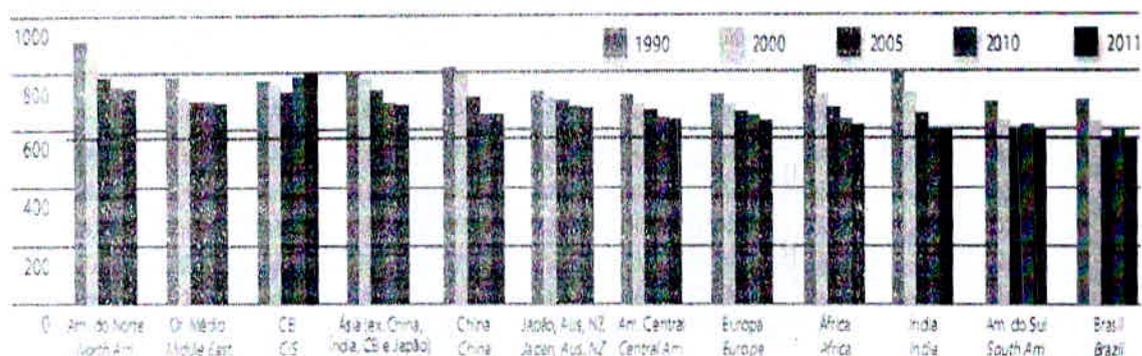
Poluente	Concentração
Material particulado	30
HCl	10
HF	1
NO <sub>x</sub> para plantas existentes	800
NO <sub>x</sub> para plantas novas	500
Cd + Tl	0,05
Hg	0,05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu +	0,5
Dioxinas e furanos	0,1
SO <sub>2</sub>	50
TOC - Carbono Orgânico Total	10

Fonte: Adaptado de EC (2000).

## 6 EMISSÕES DE POLUENTES DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

A indústria do cimento em decorrência das suas atividades registra-se um alto índice de emissões de poluentes. Diante deste cenário o Brasil, vem se exigindo cada vez mais um controle de emissões mais eficazes. Conforme podemos observar na figura 41 o Brasil, e país que apresentou o menor de índice de emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento no ano de 2011. (SNIC, 2012).

Figura 41 - Emissão média de dióxido de carbono por tonelada de cimento.



Fonte: Adaptado (SNIC, 2012).

No ano de 2009 foi aprovada a Política Nacional de Mudanças Climáticas, mas em 2011 que teve a sua regularização que tinha o seguinte objetivo de redução de 36% a 39% das reduções de emissões de gases do efeito estufa (GEE) até 2020. Sendo 7 setores industriais incluídos neste plano de redução: Cimento, Alumínio, Química, Papel e Celulose, Siderurgia, Vidro e Cal (SNIC, 2012).

As emissões saem forma de gás e sólido dos seguintes poluentes: monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), material particulado e demais metais pesados etc. Estas emissões causa vários tipos de danos ambientais, por exemplo: acidificação, eutrofização, destruição da camada de ozônio etc.

### 6.1 Tecnologias de controle de NO<sub>x</sub>

As tecnologias para controle de emissões do óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) pode ser divididos em três categorias:

Modificação no processo: A seguir serão apresentadas algumas mudanças que podem ser realizadas: treinamento dos operadores dos fornos, homogeneização do cru e controle de dosagem de carvão. Uma outra técnica utilizada, conhecida pelo de CemStar, que consiste em adicionar pequenas quantidades de escória de alto forno no clínquer. A técnica do CemStar pode apresentar cerca de 30% de redução nas emissões de  $\text{NO}_x$  (SIGNORETTI, 2008).

Modificação na combustão: Consiste na diminuição da concentração de oxigênio e a modificação na maneira com que o combustível é injetado para a combustão, consegue-se aplicação na maioria dos tipos de fornos clínquer. Esta técnica atinge-se um cerca de 2% a 3% (SIGNORETTI, 2008).

Remoção do  $\text{NO}_x$ : Consiste na remoção do  $\text{NO}_x$ , após a sua formação de pós combustão que apresenta duas técnicas de controle. Redução catalítica seletiva que tem a sua aplicação baseado na conversão do  $\text{NO}_x$  em água e nitrogênio, com a adição de amônia na presença de um catalisador. A redução catalítica não seletiva tem aplicação na redução do  $\text{NO}_x$  até  $\text{N}_2$  através da injeção de amônia ou ureia sem presença de catalisadores (SIGNORETTI, 2008).

## 6.2 Tecnologias de controle de $\text{SO}_2$

A seguir são apresentadas as principais tecnologias para controle de emissão do dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ):

Tipos de combustíveis: Evitar o uso de combustíveis com o alto teor de enxofre (SIGNORETTI, 2008).

Tipos de fornos: O uso de fornos que permita o controle de entrada de combustível (SIGNORETTI, 2008).

Seleção de matéria prima: No processo da mineração recomenda-se selecionar os tipos das matérias primas com o objetivo de evitar o uso de matérias primas com alto teor de enxofre em sua composição (SIGNORETTI, 2008).

## 6.3 Tecnologias de controle de CO

A seguir são apresentadas as tecnologias para controle da emissão do monóxido de carbono (CO): o tipo de pré-calcinador, a mudança de matéria prima, tempo de retenção, oxidante térmico regenerativo (SIGNORETTI, 2008).

#### **6.4 Tecnologias de controle de CO<sub>2</sub>**

As tecnologias utilizadas para conseguir uma maior eficácia controle de emissão do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):

Melhorias no processo: Investimentos em novas tecnologias, como os fornos dotados de pré-aquecedores e pré-calcinadores e a utilização de novos sistemas de moagem com estes investimentos permitem-se uma maior economia de energia e menor emissão de CO<sub>2</sub> (SIGNORETTI, 2008).

Utilização de combustíveis alternativos: O uso de combustíveis alternativos com o objetivo da redução do consumo de combustíveis fósseis (SIGNORETTI, 2008).

#### **6.5 Tecnologias de controle de MP**

As tecnologias utilizadas para o controle de material particulado são as seguintes abaixo:

Precipitador eletrostático: As partículas são removidas pelas forças elétricas originadas pela diferença de potencial aplicado nos eletrodos, que realiza a separação das partículas dos gases até os eletrodos (SIGNORETTI, 2008).

Filtro de mangas: Através da passagem do ar juntamente com as partículas sólidas nas mangas, que tem como função reter as partículas sólidas em sua superfície atuando como meio filtrante (SIGNORETTI, 2008).

## 7 ANÁLISE ENERGÉTICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO

O processo de produção do cimento é uma atividade que necessita de muita energia, tanto elétrica quanto térmica. Os custos energéticos chegam a representar de 20% a 40% dos custos de produção (SILVA, 2013).

O consumo térmico de uma planta de produção de cimento, está centralizado basicamente no processo do pré-calcinador e forno. O tipo de processo de produção do cimento mais utilizado é o via seca. Nele a matéria prima é homogeneizada sem adição de água, fazendo assim que diminua o consumo térmico.

Nos últimos anos a indústria cimenteira, obteve avanços tecnológicos significativos. Como a utilização de pré-calcinadores de 6 estágios que reduzem o consumo de combustíveis no forno. A figura 42 demonstra a relação de consumo térmico com o tipo de tecnologia do forno.

Figura 42 - Consumo térmico por tecnologia.

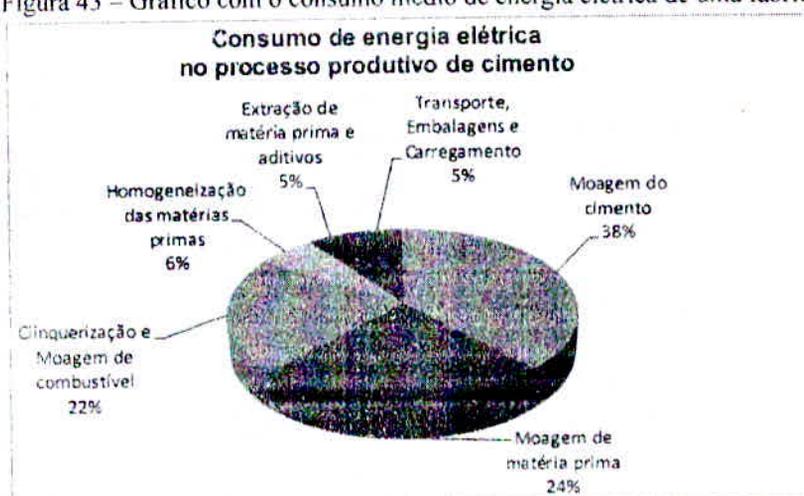
Tipo de processo	Consumo de combustível (GJ/ t clínquer)
Processo úmido	5,9 – 6,7
Processo seco longo	4,6
Forno rotativo com pré aquecedor de 1 estágio	4,2
Forno rotativo com pré aquecedor de 2 estágios	3,8
Forno rotativo com pré aquecedor de 3 estágios	3,3
Forno rotativo com pré aquecedor de 4 estágios + pré calcinador	3,1
Forno rotativo com pré aquecedor de 5 estágios + pré calcinador	3,0 – 3,1
Forno rotativo com pré aquecedor de 6 estágios + pré calcinador	2,9

Fonte: (FLSmith, (2006); IEA, (2007) apud SILVA, 2013, p.43).

O consumo elétrico de uma planta de produção de cimento, está centralizado no processo de moagem, pré-aquecedor, forno e resfriador. As indústrias cimenteiras buscam-se, na construção de novas plantas sempre a utilização de novas tecnologias principalmente no processo de moagem para redução do consumo elétrico.

A figura 43 demonstra um gráfico com consumo elétrico médio, de uma planta de produção de cimento via seco.

Figura 43 – Gráfico com o consumo médio de energia elétrica de uma fábrica de cimento.



Fonte: (IEA/ETSAP, 2010 apud SILVA, 2013, p.59).

A figura 44 demonstra, os equipamentos de menor consumo energético tanto elétrico quanto térmico em uma planta de produção de cimento de acordo com as tecnologias disponíveis no mercado.

Figura 44 – Equipamentos de menor consumo energético térmico e elétrico.

Equipamentos	Consumo elétrico (kWh/ t cimento)	Consumo térmico (GJ/t clínquer)
Moinho de farinha crua	14,0	--
Moinho de combustível	3,4	--
Pré calcinador	--	0,4
Forno com pré aquecedor de 6 estágios	6,0	2,7
Resfriador	6,0	--
Moinho de cimento	28,5	--
Britador, Transportador, Empacotadeira, Misturador das matérias primas	10,4	--
Total do consumo	68,3	3,1

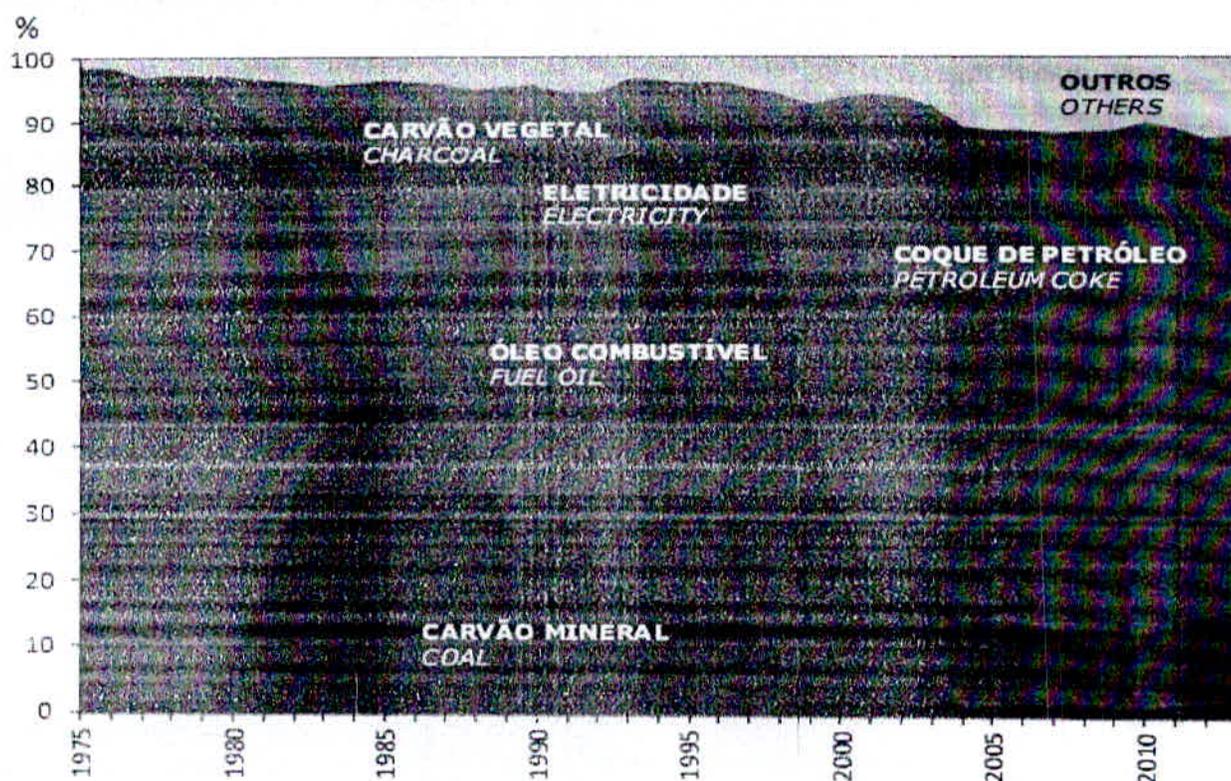
Fonte: (CSTEP, 2012; CEMBUREAU, 1999; IEA/ETSAP 2010 apud SILVA, 2013, p.60).

A seguir será realizada uma análise, da eficiência energética da indústria cimenteira no cenário nacional.

## 7.1 Análise energética da indústria cimenteira brasileira

Na figura 45 será apresentado um gráfico com a matriz energética térmica e elétrica da indústria cimenteira brasileira com suas respectivas mudanças no período de 1975 a 2013.

Figura 45 – Matriz energética da indústria cimenteira no período de 1975 a 2013.



Fonte: (BEN, 2013).

Nos próximos tópicos será realizada uma análise do consumo de energia térmica e elétrica da indústria cimenteira brasileira no período de 1970 a 2013 demonstrando avanços e dificuldades de cada tipo de energia térmica e elétrica.

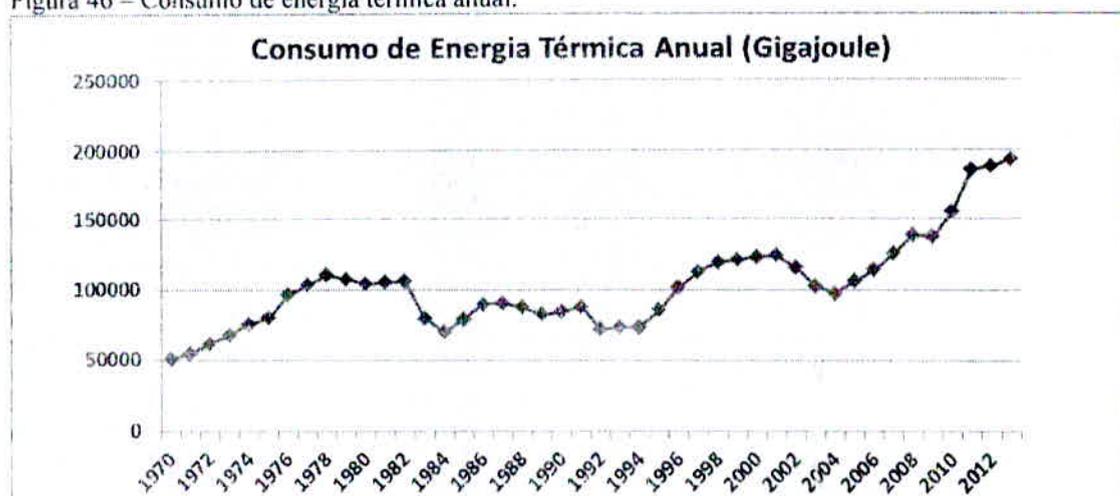
### 7.1.1 Análise da energia térmica da indústria cimenteira brasileira

O consumo térmico de uma planta de produção de cimento, está centralizado basicamente no processo de formação do clínquer.

Nos últimos anos a indústria cimenteira, obteve avanços tecnológicos significativos. Como os pré-calcinadores de 6 estágios que reduzem o consumo de combustíveis no forno (SILVA, 2013).

O processo de clínquerização acontece em alta temperatura que variam em torno de 1450°C a 2000°C, fator este que demanda alta quantidade de combustível para a queima no forno. Diante desta necessidade a indústria cimenteira, tem que buscar os tipos de combustíveis que atendam a estas exigências. A figura 46 ilustra, o consumo de energia térmica pelas indústrias cimenteiras nacionais, no período de 1970 a 2013 expressos em gigajoule.

Figura 46 – Consumo de energia térmica anual.



Fonte: Adaptado (BEN, 2013).

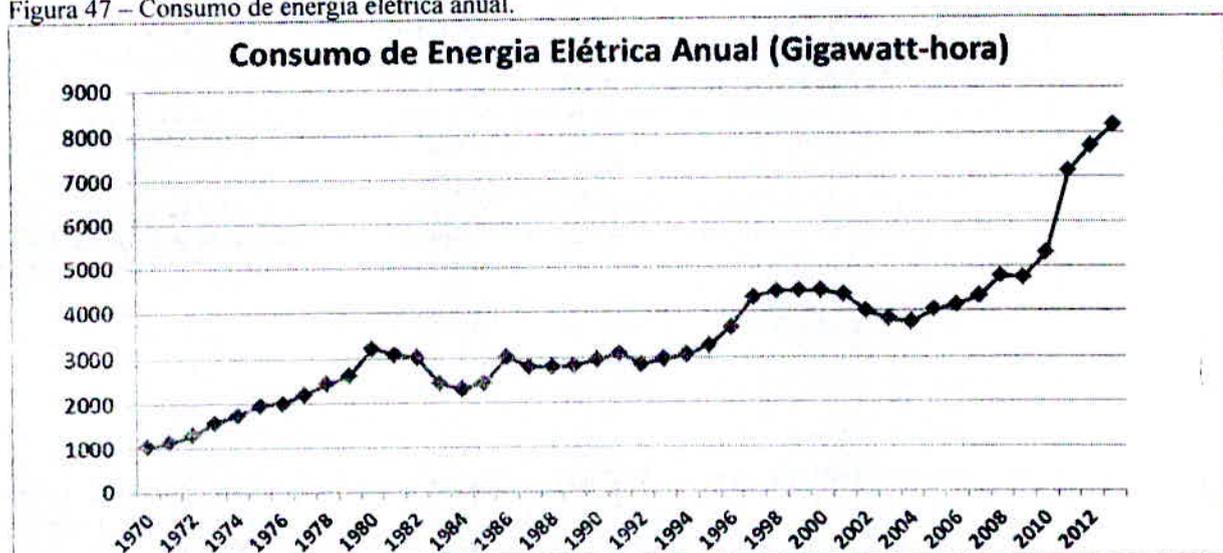
### 7.1.2 Análise da energia elétrica da indústria cimenteira brasileira

No processo de fabricação do cimento, alguns equipamentos o seu funcionamento a partir da energia elétrica como: moinho de cimento, moinho de farinha crua, forno com pré aquecedor e resfriador (SILVA, 2013).

Um grande problema enfrentado no Brasil, e as grandes demandas de energia elétrica para o abastecimento de todo setor industrial inclusive o cimenteiro que e considerado uma indústria energo intensiva (SILVA, 2013).

Atualmente vem sendo realizado investimentos, para a descoberta e aplicação de novas fontes para o fornecimento de energia elétrica. No Brasil a principal fonte de abastecimento de energia elétrica, são as hidrelétricas mas devido a sua complexidade estrutural e as questões ambientais acaba gerando atrasos nos projetos de construção por isso muitas vezes as termoeletricas oferecem projetos de construção mais rápido (SILVA, 2013). A figura 47 demonstra o consumo de energia elétrica do setor cimenteiro no período de 1970 a 2013 expressos em gigawatt-hora.

Figura 47 – Consumo de energia elétrica anual.



Fonte: Adaptado (BEN, 2013).

No período de 2001 a 2002, é possível observar uma redução no consumo de energia elétrica por causa da crise nacional que afetou o fornecimento de energia elétrica e as indústrias cimenteiras foram obrigadas a reduzir o seu consumo em cerca de 25%.

## 8 COPROCESSAMENTO NO BRASIL

No Brasil das 51 plantas de produção de cimento Portland instaladas apenas 36 estão licenciadas para o coprocessamento de resíduos no ano de 2012. Sendo que na região sudeste apresenta o maior número de plantas licenciadas que no total são 17 plantas no ano de 2012. A figura 48 que apresenta a distribuição de plantas pelo Brasil (Panorama do Coprocessamento, 2012).

Figura 48 - Distribuição de plantas de cimento licenciadas pelo coprocessamento no Brasil.



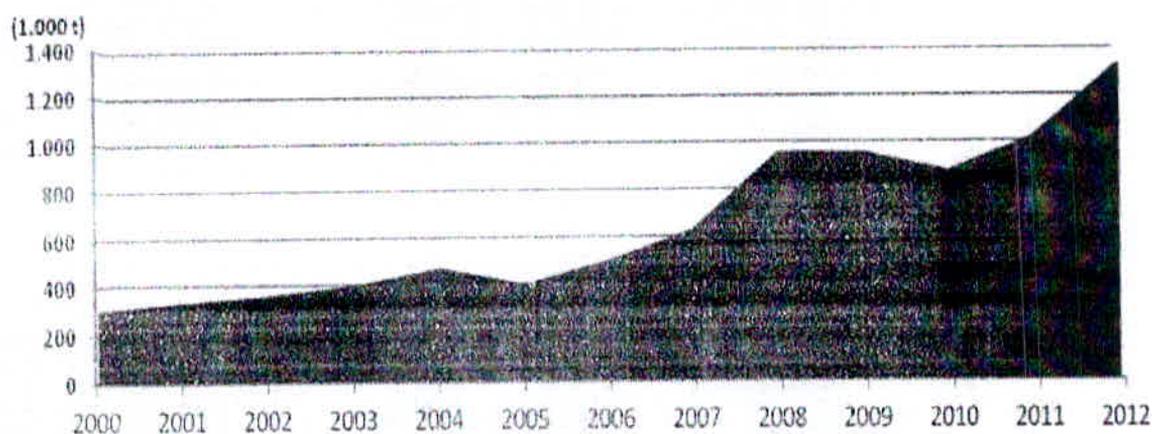
Fonte: (Panorama do Coprocessamento, 2012).

Com a criação da lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a indústria cimenteira tem se apresentado cada vez mais como solução segura para a destinação de resíduos (BRASIL, 2010a).

Os resíduos coprocessados no ano de 2012 com eliminação total de 1,32 milhões de toneladas. Conforme a figura 49 e possível observar que no período de 2001 a 2012 houve um aumento cerca de 1.000 milhões de toneladas de resíduos coprocessados no Brasil.

Figura 49 - Total de resíduos coprocessados no Brasil (milhões de toneladas).

## Resíduos coprocessados no Brasil

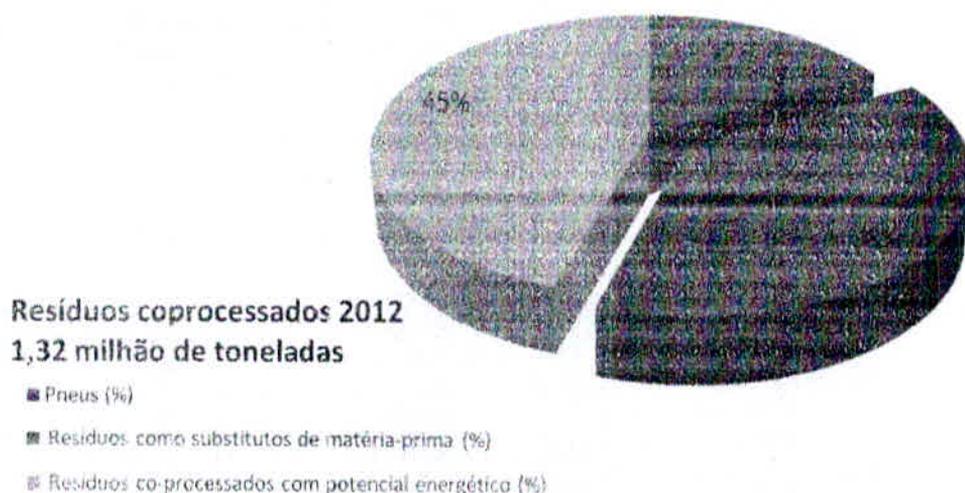


Fonte: (Panorama do Coprocessamento, 2012).

De acordo com a figura 50, consegue observar que os resíduos coprocessados no ano de 2012, apenas 62% (823.000 toneladas) apresentam com potencial energético, 38% (500.000 toneladas) como substituto de matérias primas e 17% são pneus. De acordo com a figura 49 demonstra o perfil dos resíduos coprocessados (Panorama do Coprocessamento, 2012).

Figura 50 - Perfil dos resíduos coprocessados em 2012.

## Perfil dos Resíduos Coprocessados ano base 2012

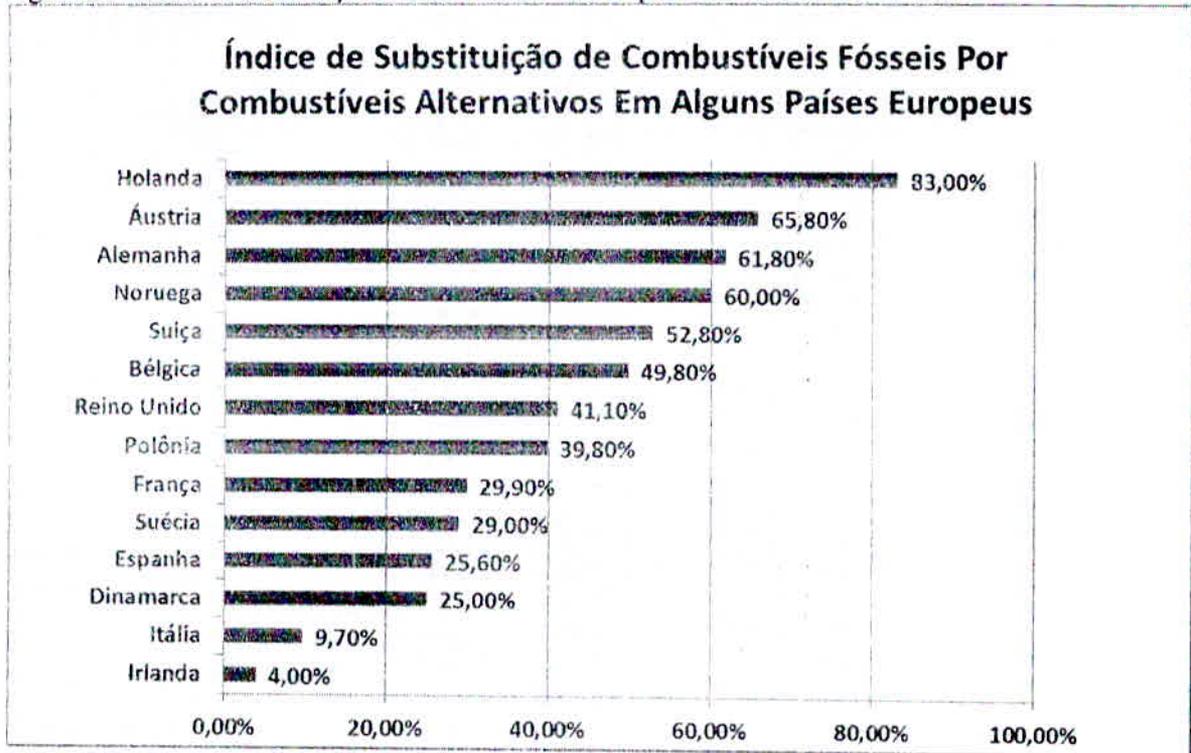


Fonte: (Panorama do Coprocessamento, 2012).

## 9 COPROCESSAMENTO NO MUNDO

A seguir será realizada uma análise com dados dos índices de utilização e os tipos de combustíveis alternativos utilizados na indústria cimenteira em alguns países do mundo. A figura 51 demonstra o índice de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos em alguns países do continente europeu no período de 2008 a 2012

Figura 51 – Índice de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos.

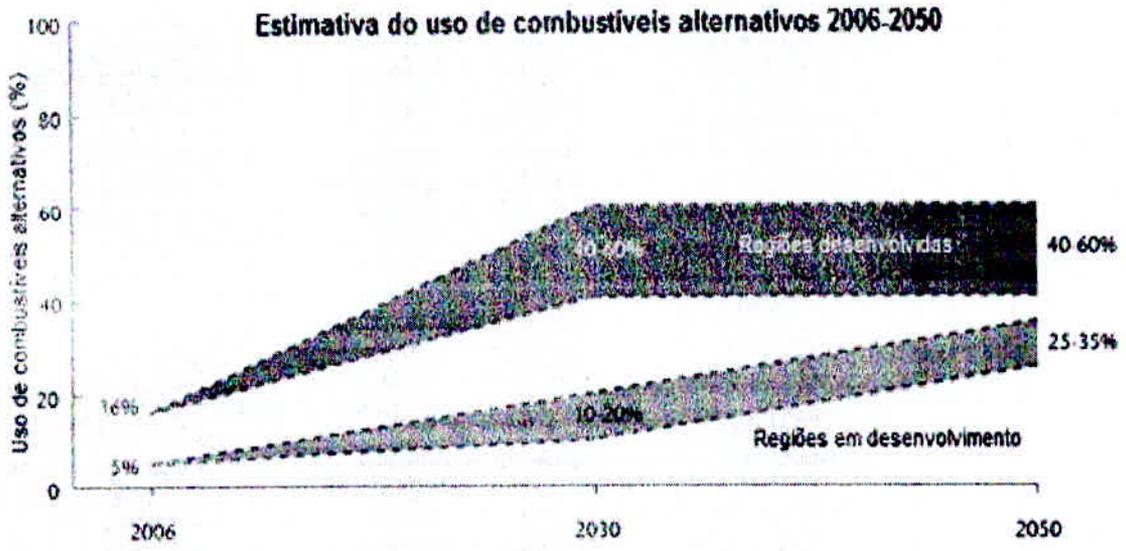


Fonte: Adaptado (OFICEMEN, 2012).

Analisando o gráfico acima podemos observar que, alguns países europeus estão com altos índices de substituição em relação ao Brasil que é apenas de 9% ano de 2012. Como é o caso da Holanda, Áustria, Alemanha e Noruega que já os seus índices já são iguais a superiores de 60% no período de 2008 a 2012 isso é resultado das políticas ambientais adotadas por cada país.

Na figura 52 demonstra um gráfico com a estimativa de utilização de combustíveis alternativos da indústria cimenteira nos próximos 36 anos. Avaliando o gráfico é possível observar que demonstra um cenário de crescimento constante para o uso de combustíveis alternativos. Sendo que nas regiões desenvolvidas apresenta crescimento até o ano de 2030 e após a sua estabilização (BELATO, 2013).

Figura 52 – Estimativa do uso de combustíveis alternativos no mundo no período de 2006-2050.



Fonte: (WBCSD, 2009 apud BELATO, 2013, p.39).

## 10 CONCLUSÃO

Concluimos que avaliando o cenário mundial de produção e consumo do cimento Portland é notório o seu crescimento. Embora houveram avanços significativos na tecnologia de produção garantindo assim um menor consumo de combustível por tonelada de cimento produzido, este ramo continua demandando um grande volume energético. Sendo considerado um segmento energo-intensivo.

Na atualidade a principal fonte energética das cimenteiras é o coque de petróleo, assim sendo, sujeito as variações do mercado de petróleo. O coprocessamento de resíduos industriais em fornos de cimento vem reduzir o consumo de coque e viabilizar a destinação ambientalmente correta. Esta participação na matriz energética somente foi viabilizada devido aos avanços ocorridos no monitoramento e controle das emissões associados a automação dos processos.

O coprocessamento vem se firmando dando início a um novo ramo denominado blendeiras. Que vem apoiar as cimenteiras a garantir um combustível a partir de resíduos que atendam aos critérios de emissões previsto em lei.

## REFERÊNCIAS

ABCP (1984). Associação Brasileira de Cimento Portland. **Curso de Microscopia de Clínquer no Cimento Portland**. Divisão de Tecnologia de Cimento. Departamento Físico-Química. São Paulo, SP – Brasil.

ABCP (2002). Associação Brasileira de Cimento Portland. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7ª.ed. São Paulo, 28 p. (BT-106) Brasil.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004 Resíduos Sólidos - Classificação**. 71p. 2004.

ANIP (2013). Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – Disponível em: <[http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&titulo\\_pagina=Produ%E7%E3o](http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&titulo_pagina=Produ%E7%E3o)>. Acessado em Março de 2014.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN – Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>>. Acessado em Maio de 2014.

BELATO, Mariana Natale. **Análise da Geração de Poluentes na Produção de Cimento Portland com o Coprocessamento de Resíduos Industriais**. 2013. 171f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

BRASIL (1999). **Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999**. Dispõe sobre o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 20 de março de 2000. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 25 de março de 2014.

BRASIL (2002). **Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 20 de novembro de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 25 de março de 2014.

BRASIL (2005). **Resolução CONAMA nº 362, de 23 de junho de 2005**. Dispõe sobre o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 27 de junho de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 29 de março de 2014.

BRASIL (2009). **Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009**. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 1 de outubro de 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 29 de março de 2014.

BRASIL (2010a). **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2 de ago. 2010. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em 26 de março de 2014.

BRASIL (2010b). **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 23 de dez. 2010. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em 26 de março de 2014.

BRASIL (2012). **Resolução CONAMA nº 450, de 6 de março de 2012**. Altera os arts. 9º, 16, 19, 20, 21 e 22, e acrescenta o art. 24-A à Resolução no362, de 23 de junho de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, DF, 7 de março de 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 20 de março de 2014.

CARPIO, Ricardo Carrasco. **Otimização no Co-processamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental**. 2005. 174f. Dissertação (Doutorado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá

EC – European Commission. **“Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste”**. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/consleg/2000/L/02000L0076-20001228-en.pdf>>. Acesso em: Maio de 2014.

MINAS GERAIS (MG). Deliberação Normativa COPAM nº 026, de 28 de julho de 1998. **Dispõe sobre o co-processamento de resíduos em fornos de clínquer**, Minas Gerais, 1998.

MINAS GERAIS (MG). Deliberação Normativa COPAM nº 154, de 25 de agosto de 2010. **Dispõe sobre o co-processamento de resíduos em fornos de clínquer**, Minas Gerais, 2010.

OFICEMEN - Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. **“Anuario del sector cementero español”**. Disponível em: <<https://www.oficemen.com/Uploads/docs/Anuario%202012%281%29.pdf>>. Acesso em: Maio de 2014.

OLIVEIRA, Gabriel Augusto Rodrigues Nunes. **Critérios de Projeto Para Escolha do Moinho do Cimento Portland**. 1º ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012, 107f.

Panorama do Coprocessamento 2012. In: **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND**. 2012. Disponível em: <[http://coprocessamento.org.br/cms/wpcontent/uploads/2013/12/Panorama\\_Coprocessamento\\_2012.pdf](http://coprocessamento.org.br/cms/wpcontent/uploads/2013/12/Panorama_Coprocessamento_2012.pdf)>. 2012. Acesso em 25 de março de 2014.

SALOMON, Virginia Gouveia. **Avaliação dos Efeitos da Presença de Metais Pesados nos Resíduos Co-Processados Quando Utilizados como Combustíveis Alternativos e Matéria-Prima na Indústria Cimenteira**. 2002. 143f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

RENÓ, MariaLuiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento**. 2007. 123f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

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 do Cimento**. 2008. 205f. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

SILVA, Andreza Alves. **Potencial de Conservação de Energia na Indústria Cimenteira do Brasil**. 2013. 74f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2013.

SILVA, Rogério José. **Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland**. 1994. 242f. Dissertação (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC) - PRESS KIT, 2011 - Disponível em [http://www.snic.org.br/pdf/presskit\\_SNIC\\_2011.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2011.pdf) - Acesso em Junho de 2014.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC) - Disponível em: [http://www.snic.org.br/pdf/Historia\\_do\\_Cimento\\_no\\_Brasil.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/Historia_do_Cimento_no_Brasil.pdf). Acesso em Maio de 2014.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC) - Relatório Anual 2012-2013. Disponível em <<http://www.snic.com.br>>. Acesso em 23 de março de 2014.

TOSTA, L.I.; SOUZA, A.C.; SILVA R.J. **Gestão da Energia na Produção de Cimento Portland com Uso de Mineralizadores e Combustíveis Alternativos**. In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 17, 2007, Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2007, v. 1.