



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade de Tecnologia**

**As ISO 50001 e ISO 14040 aplicadas a indústria  
cimenteira: Comparação entre fontes fóssil e  
renovável de energia térmica**

**Autor: Érica Santos Silva  
Orientador: Prof. Armando Caldeira Pires, Dr.  
Co Orientador: Marcia Mitiko Onoyama  
Esquiagola, Dr.**

**Brasília, DF  
2017**

**Érica Santos Silva**

**As ISO 5001 e ISO 14040 aplicadas a indústria cimenteira: Comparação  
entre fontes fóssil e renovável de energia térmica**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

Orientador: Prof. Armando Caldeira  
Pires, D.S.c. (UnB-FT)

Co-Orientador: Marcia Mitiko Onoyama  
Esquiagola (Embrapa)

**Brasília, DF  
2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Érica Santos.

As ISO 50001 e ISO 14040 aplicadas a indústria cimenteira: Comparação entre fontes fóssil e renovável de energia térmica/ Érica Santos Silva. Brasília: UnB, 2017. Nº de páginas p. 88: il. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2017).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Indústria cimenteira. 2. Avaliação de Ciclo de vida. 3. Gestão Energética

I. ENM/FT/UnB. II. Título.

CDU Classificação

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, ÉRICA SANTOS (2017). As ISO 50001 e ISO 14040 aplicadas a indústria cimenteira: Comparação entre fontes fóssil e renovável de energia térmica. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM-DM 270/2017. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília- DF 88p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Silva, Érica Santos.

TÍTULO: As ISO 50001 e ISO 14040 aplicadas a indústria cimenteira: Comparação entre fontes fóssil e renovável de energia térmica.

GRAU: Mestre ANO: 2017.

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.





UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA

ÉERICA SANTOS SILVA

**As ISO 50001 e ISO 14040 aplicadas a indústria  
cimenteira: Comparação entre fontes fóssil e renovável  
de energia térmica**

Dissertação submetida à Faculdade de  
Tecnologia no programa de Ciências  
Mecânicas da Universidade de Brasília como  
parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Mestre em Ciências  
Mecânicas.

Aprovada por:

---

Prof. Armando Caldeira Pires, Dr. (UnB-FT) - Orientador

---

Prof. Mario Benjamim Baptista de Siqueira, Dr. (UnB-FT) -  
Examinador Interno

---

José Manuel Cabral de Sousa Dias, Dr. (Embrapa) -  
Examinador Externo

Dedico esta dissertação a todos que em algum momento contribuirão para que ela fosse possível.

“If you can dream it, you can do it.”  
Walt Disney

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por todas as vitórias concedidas para chegar até aqui.

A minha mãe Deomar Santos, agradeço o dom da vida, por toda dedicação e amor que colocou em mim me permitindo ser o que hoje sou, todo discernimento, compreensão, apoio, carinho, exemplo, força e ensinamentos. À minha irmã Juliana de um modo especial agradeço pelos sorrisos e alegrias que traz para os meus dias. Ao meu pai Elizeu agradeço por todos os momentos que me ensinou a crescer e amadurecer. Aos Avós maternos e avó paterna 'in memoriam', avô paterno, Tios e Primos agradeço ao incentivo, apoio e torcida, sem vocês minha caminhada não seria a mesma e com toda certeza bem mais difícil.

Aos amigos agradeço a força, carinho e apoio, vocês foram indispensáveis para vencer cada dia, sejam eles estudando, trabalhando ou me divertindo, em especial a amiga Adriana que acompanhou diretamente minha trajetória na vida acadêmica na graduação e mestrado.

Aos amigos de trabalho na Embrapa Agroenergia que dividiram comigo dias de alegrias e também dias tão difíceis e me fizeram companhia por 3 anos de tanto crescimento pessoal e profissional. Em especial a minha coorientadora e chefe Marcia Esquiagola por todo apoio, incentivo, amizade e compreensão e a Patrícia Barbosa, Lilian Matheus e Regiani Ribeiro colegas de trabalho, que levarei para a vida, por todo carinho e apoio no dia a dia. Ao Dr. José Cabral por toda sabedoria que me passou durante esses anos de trabalho.

A Universidade de Brasília e aos meus professores que deram continuidade a minha formação profissional pela oportunidade de estar aqui meu muito obrigada.

Por fim, agradeço a todos que fizeram de alguma forma parte da minha história, citados ou não, pelo apoio.



## **Resumo**

No contexto atual, nem sempre são fáceis os desafios ambientais ligados ao consumo de energia. Principalmente devido à grande dependência de combustíveis fósseis, torna-se cada vez mais evidente a necessidade de agentes econômicos, políticos, e sociedade em geral, assumirem um compromisso focado na melhoria da eficiência energética e no uso racional da energia, decorrentes das atividades econômicas. Considerando a pressão ambiental e o consumo elevado de energia na produção de cimento, a indústria cimenteira tem buscado o aumento da eficiência energética e a substituição de fontes fósseis por combustíveis renováveis. A partir da necessidade de se identificar/alterar etapas produtivas ambientalmente nocivas, este trabalho realizou a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para a produção de cimento, considerando uma fonte de energia fóssil e outra renovável. A metodologia compreendeu a coleta de dados secundários, o tratamento de acordo com a norma de gestão ambiental ISO 14040 e 14044 e a análise utilizando o software de ACV SimaPro S Analyst, além da norma ISO 50001 norma de gestão do sistema de energia. A unidade funcional foi de 1 tonelada de cimento e a fronteira do berço ao portão. Foram consideradas as etapas de mineração, homogeneização, produção de clínquer e produção de cimento. A substituição dos combustíveis ocorreu na fase de produção do clínquer. O ICV (Inventário de ciclo de vida) considerou dados de consumo energético, balanço de massa e emissões. Os resultados do trabalho indicam além da possibilidade de adoção de sistema de produção sustentável para a indústria cimenteira, a existência de benefícios ambientalmente relevantes quando se trata do carvão vegetal como combustível.

### **Palavras chave:**

Sistema de produção de cimento, Avaliação do ciclo de vida, Sistema de gestão energética, impactos ambientais e desempenho energético.

## **Abstract**

Given the current scenario, the environmental challenges related to energy consumption do not always present an easy solution. Mainly for the extreme reliance on fossil fuels, the need becomes more and more straightforward for economic and political agents, so as for society in general to assume a commitment focused on improvement in the energetical efficiency and rational use of energy due to economic activities. Considering the environmental pressure and the high consumption of energy in the production of cement, the industry is pursuing the increase in energetical efficiency and replacement of fossil fuels for renewable fuels. Starting from the need of identifying/changing noxious production stages, this paper performed a ACV for the cement production, considering one source with fossil fuels and another on renewable energy. The methodology consisted on a secondary data collection, processing accordingly to Norm ISO 14040 and 14044 and an analysis using the ACV SimaPro S Analyst software, so as the ISO 50001 for management of energy systems norm. The functional unit was of 1 ton of cement and the boundary from the cradle to gate. The mining, homogenization, production of clinker and cement production stages were considered. The replacement of the fossil fuels took place on the clinker production stage. The ICV (life cycle inventory) contemplated the data on energy consumption, mass balance and emissions. The achieved results state that beyond the possibility of adoption of a sustainable production system for the cement industry, the use of charcoal based fuels present significant environmental benefits.

## **Keywords:**

Cement production system, Life cycle assessment, Energy management system, environmental impacts and energy performance.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Emissões de gases de efeito estufa da indústria global de cimento no ano de 2000. ....                             | 2  |
| Figura 2 - Potencial de redução de CO <sub>2</sub> em 2006 da indústria cimenteira (Mt CO <sub>2</sub> /ano). ....            | 4  |
| Figura 3 - Emissão específica de CO <sub>2</sub> por Tonelada de Cimento .....  | 4  |
| Figura 4 - Emissões totais diretas da indústria mundial, por setor, no período de 1970-2010 (GtCO <sub>2</sub> eq / ano)..... | 7  |
| Figura 5 - Emissões de GEE em atividades industriais por ramo industrial (1990-2014). ....                                    | 7  |
| Figura 6 - Consumo aparente de cimento no Brasil. ....  | 14 |
| Figura 7 - Produção de cimento no Brasil. ....  | 14 |
| Figura 8 - Sistema produtivo do cimento .....   | 19 |
| Figura 9 - Fluxograma energético da produção de cimento - Via seca. ....  | 20 |
| Figura 10 - Ciclo PDCA de acordo com a ISO 50001 .....  | 31 |
| Figura 11 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida.....  | 35 |
| Figura 12 - Funcionalidades disponíveis das diversas versões do SimaPro® comercializadas.....                                 | 36 |
| Figura 13 - Os requisitos da norma distribuídos nas ações do PDCA.....  | 37 |
| Figura 14 - Fronteira do sistema de produção do cimento. ....   | 39 |
| Figura 15 - Etapas da extração de calcário.....   | 40 |
| Figura 16 - Etapas de Transformação de clínquer. ....   | 41 |
| Figura 17 - Etapas de produção do cimento. ....   | 43 |
| Figura 18 - Resultado de depleção abiótica. ....  | 44 |
| Figura 19 - Resultado de aquecimento global.....  | 45 |
| Figura 20 - Resultado de depleção da camada de ozônio. ....   | 46 |
| Figura 21 - Resultado de acidificação. ....   | 47 |
| Figura 22 - Resultado de eutrofização. ....   | 47 |
| Figura 23 - Fluxograma energético da produção de cimento - Via seca. ....   | 48 |
| Figura 24 - Rotas de sustentabilidade para a indústria cimenteira proposta pela The European Cement Association. ....         | 50 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Produção de cimento dos principais países, período de 2006 a 2013 (em milhões de toneladas) ..... | 12 |
| Tabela 2 - Produção anual de cimento Portland (em 1.000 toneladas).....                                      | 15 |
| Tabela 3 - Tipos e especificações de cimentos Portland no Brasil.....  | 16 |
| Tabela 4- Consumo energético na produção de cimento brasileiro. ....   | 21 |
| Tabela 5 - Lista de Categorias de Impacto para AICV .....  | 25 |
| Tabela 6 - Inventário da etapa de extração do calcário.....  | 40 |
| Tabela 7 - Inventário da etapa de transformação de clínquer. ....  | 41 |
| Tabela 8 - Inventário da etapa de produção do cimento .....  | 43 |



# Sumário

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| <b>Agradecimentos</b> .....                                     | <b>ii</b>                     |
| <b>Resumo</b> .....   | <b>iv</b>                     |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>v</b>                      |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....                                   | <b>vii</b>                    |
| <b>LISTA DE QUADROS</b> .....                                   | <b>ix</b>                     |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                                   | Erro! Indicador não definido. |
| <b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES</b> .....                      | <b>xiii</b>                   |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                      | <b>1</b>                      |
| 1.1 Enquadramento da pesquisa .....                             | 6                             |
| 1.2 Justificativa.....  | 6                             |
| 1.3 Questões de pesquisa.....                                   | 8                             |
| 1.4 Objetivo .....  | 9                             |
| 1.1.1. Objetivo Geral.....                                      | 9                             |
| 1.1.2. Objetivos Específicos .....                              | 9                             |
| 1.5 Estrutura da dissertação .....                              | 9                             |
| <b>2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....                       | <b>11</b>                     |
| 2.1 INDÚSTRIA DE CIMENTO E O PROCESSO PRODUTIVO .....           | 11                            |
| 2.1.1. Panorama da Indústria Cimenteira no Brasil .....         | 13                            |
| 2.1.2. Cimento Portland .....                                   | 15                            |
| 2.1.3. Sistema produtivo do cimento.....                        | 18                            |
| 2.1.4. Energia para produção de cimento.....                    | 19                            |
| 2.1.5. Combustíveis alternativos para indústria cimenteira..... | 21                            |
| 2.2 Avaliação de ciclo de vida .....                            | 23                            |
| 2.2.1. Métodos de ACV.....                                      | 25                            |
| 2.3 ISO 50001 – Sistema de Gestão de energia.....               | 29                            |
| 2.4 Síntese .....   | 33                            |
| <b>3. METODOLOGIA</b> .....                                     | <b>34</b>                     |
| 3.1 Avaliação de ciclo de vida.....                             | 34                            |
| 3.1.1. SimaPro® .....   | 36                            |
| 3.2 Norma ISO 50001 – Sistema de Gestão de Energia (SGE).....   | 36                            |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                          | <b>38</b>                     |
| 4.1 Avaliação do ciclo de vida da indústria cimenteira.....     | 38                            |
| 4.1.1. Escopo do estudo .....                                   | 38                            |
| 4.1.2. Inventário do ciclo de vida .....                        | 39                            |
| 4.1.3. Mineração e homogeneização.....                          | 39                            |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.1.4.    | Produção do clínquer.....  | 40        |
| 4.1.5.    | Produção do cimento.....   | 42        |
| 4.2       | Avaliação dos impactos .....   | 43        |
| 4.2.1.    | Depleção abiótica .....  | 43        |
| 4.2.2.    | Aquecimento Global .....   | 44        |
| 4.2.3.    | Depleção da camada de ozônio.....  | 45        |
| 4.2.4.    | Acidificação .....   | 46        |
| 4.2.5.    | Eutrofização .....   | 47        |
| 4.3       | Sistema de gestão energética.....  | 48        |
| 4.3.1.    | Especificações do sistema produtivo do cimento .....                                 | 49        |
| 4.3.2.    | Plano de ação para melhoria a gestão da energia no sistema produtivo de cimento..... | 49        |
| 4.3.3.    | Exemplo de ações nortearam o SGE no setor cimenteiro.....                            | 50        |
| <b>5.</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>  | <b>55</b> |
| 5.1       | Limitações e oportunidades de pesquisa .....   | 57        |
| 5.2       | Sugestões para trabalhos futuros .....   | 58        |
| <b>6.</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>60</b> |

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES**

ABCP – Associação Brasileiro de Cimento Portland  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV – Avaliação de ciclo de vida  
ASD - Inversores de Velocidade Ajustável  
BEN – Balanço Energético Nacional  
CNI – Confederação Nacional da Indústria  
CSI – Cement Sustainability Initiative  
CV – Carvão Vegetal  
DNC – Departamento Nacional de Combustíveis  
EC – Comissão Europeia  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
GEE – Gases de efeito estufa  
IEA – International Energy Agency  
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change  
MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia  
MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio  
PIB – Produto Interno Bruto  
PLN – Plano Nacional de Energia  
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria de Cimento  
WBCSD – World Business Council for Sustainable Development  
SGE – Sistema de Gestão de Energia  
UE – União Europeia  
ACV – Avaliação de ciclo de vida



## 1 INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais – causados por interferências humanas nos ecossistemas globais por meio da alteração na composição da atmosfera do planeta, que se somam à variabilidade climática natural – compõem um dos maiores desafios atuais da humanidade. Torna-se, portanto, uma estratégia mundial, o conhecimento científico dos possíveis impactos da mudança do clima projetada para ocorrer neste século. Nacionalmente, todos os setores, sistemas e regiões do País, agem especialmente sobre a agricultura, recursos hídricos, energias renováveis, saúde humana, ecossistemas e biodiversidade, zonas costeiras e oceanos, infraestrutura, cidades e indústria. Pois a partir desse conhecimento será possível estabelecer melhores estratégias para alcançar a mitigação ou redução dessas vulnerabilidades (Brasil, 2016a).

Sabe-se hoje que as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre (principalmente dióxido de carbono, metano e óxido nitroso) têm aumentado consideravelmente desde a revolução industrial. Tais atividades contemplam, principalmente, a queima de combustíveis fósseis, a mudança no uso da terra (concentração de dióxido de carbono na atmosfera) e a agropecuária (metano e do óxido nitroso) (Brasil, 2012a).

O dióxido de carbono, emitido principalmente pela queima de combustíveis fósseis pelos setores industrial e de transporte, é o principal gás de efeito estufa responsável pelas mudanças climáticas. As concentrações de dióxido de carbono na atmosfera têm apresentado uma oscilação histórica entre cerca de 180ppm (partes por milhão), durante períodos glaciais, e, 280ppm, durante períodos interglaciais. Entretanto, desde o início da revolução industrial, em meados do século XIX, as atividades humanas, principalmente por meio da queima de combustíveis fósseis e mudanças de uso do solo, têm perturbado e continuam a perturbar o ciclo de carbono, aumentando a concentração atmosférica de dióxido de carbono ao nível atual, cerca de 368ppm (SCBD, 2003).

Conforme o mesmo documento:

*O Painel Intergovernamental sobre Mudança de Clima,*

*fundamentado em futuras mudanças demográficas, econômicas, sociopolíticas, tecnológicas, e comportamentais plausíveis, e na ausência de ações internacionais coordenadas para proteger o sistema de clima por meio da redução da emissão de gases de efeito-estufa, projetou que a concentração de dióxido de carbono atmosférico aumentaria do nível atual de aproximadamente 368ppm, para entre 540 e 970ppm, até o ano 2100, sem levar em consideração possíveis liberações adicionais da biosfera induzidas pelo clima, em um mundo mais quente (SCBD, 2003).*

A indústria cimenteira representa aproximadamente 5% das emissões de CO<sub>2</sub> de origem antrópica no mundo, devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis. No Brasil esse valor corresponde a 1,4%, de acordo com o 2º Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa (SNIC, 2012). Nas emissões equivalentes à indústria do cimento, aproximadamente 50% referem-se ao processo produtivo, cerca de 5% ao transporte, 5% ao uso da eletricidade e os outros 40% referem-se ao processo de ‘cliquerização’ (WBCSD, 2002). A Figura 1 apresenta a relação da emissão de gases de efeito estufa dessa indústria com a global (WBCSD, 2002).

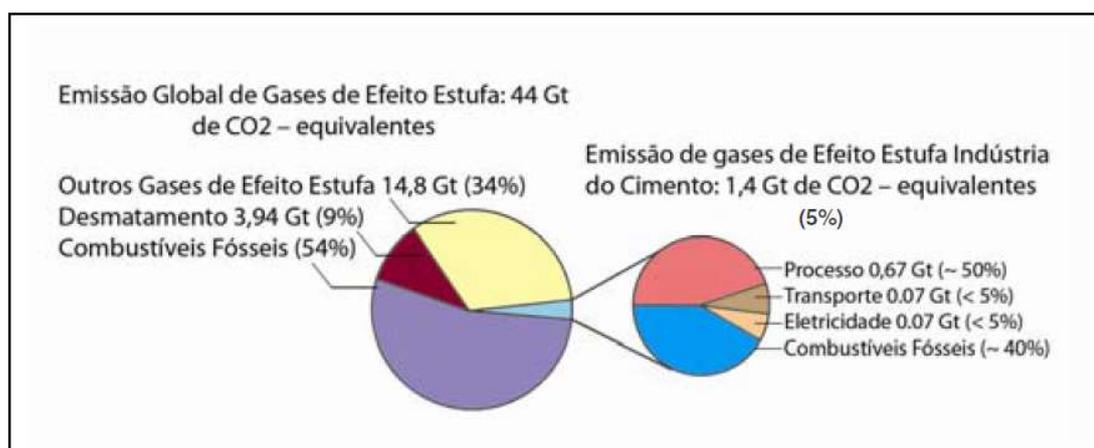


Figura 1 - Emissões de gases de efeito estufa da indústria global de cimento no ano de 2000.

Fonte: Adaptado de WBCSD (2002).

No processo de produtivo de cimento, as emissões de dióxido de carbono são provenientes da queima de combustíveis e da etapa de calcinação do calcário. Em vista das elevadas temperaturas necessárias à etapa de clínquerização, que tornam o processo industrial energeticamente intensivo, quantidades substanciais de CO<sub>2</sub> são produzidas na geração de energia térmica, mas a emissão total depende do consumo específico de energia, e geralmente situa-se entre 0,85 a 1,35 kg de CO<sub>2</sub> por quilograma de clínquer produzido. A emissão média de dióxido de carbono no processo de calcinação é de cerca de 500kg por tonelada de cimento produzido (USEPA, 2000).

Além do dióxido de carbono, material particulado, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono são os poluentes primários emitidos no processo de fabricação de cimento. Quantidades menores de compostos orgânicos voláteis, amônia, cloro, cloreto de hidrogênio e produtos de combustão incompleta, que são considerados poluentes atmosféricos perigosos, podem ser lançados no meio ambiente. Os metais pesados contidos nas matérias-primas e combustíveis, mesmo em concentrações muito pequenas, podem ser emitidos na forma de particulado ou de vapor por meio das chaminés das fábricas (USEPA, 2000).

Para tanto, a indústria cimenteira mundial tem buscado o aumento da eficiência energética e o uso conjunto de combustíveis, em um processo denominado de coprocessamento, que em geral, possuem baixo poder calorífico, baixo custo por serem em sua maioria material de reciclagem ou reuso e conseqüentemente degradam menos o ambiente (Mastorakos et al, 1999).

No caso particular da indústria do cimento brasileira, considerada como a mais eficiente do mundo, por possui um parque industrial moderno e eficiente, com instalações que operam com baixo consumo energético. (Figura 2). Características como a produção do cimento por via seca, processo industrial que garante a diminuição do uso de combustíveis em até 50% em relação a outros processos, e de medidas adotadas pelo setor, como a utilização de biomassa como combustível e o coprocessamento citado anteriormente, posicionaram-no entre os mais eficazes no controle de suas emissões, apresentando os menores níveis de CO<sub>2</sub> por tonelada de

cimento produzida, conforme a Figura 3 (WBCSD-CSI, 2013; CNI, 2012).

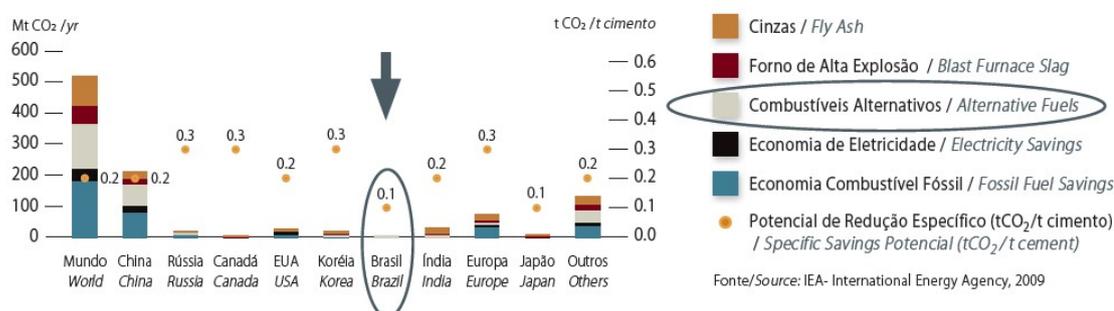


Figura 2 - Potencial de redução de CO<sub>2</sub> em 2006 da indústria cimenteira (Mt CO<sub>2</sub>/ano).  
(Fonte: IEA – International Energy Agency, 2009.)

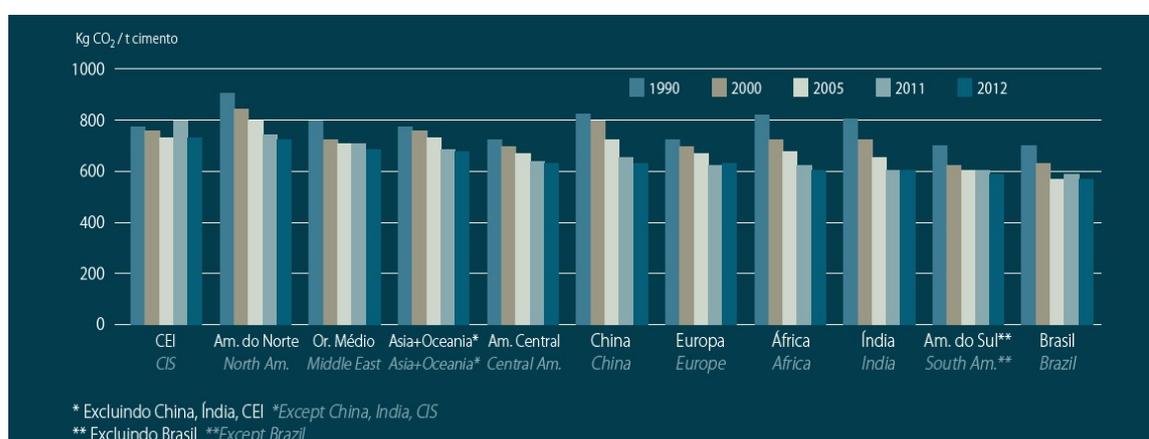


Figura 3 - Emissão específica de CO<sub>2</sub> por Tonelada de Cimento  
(Fonte: WBCSD – CSI, 2013.)

Sendo assim, fica clara a necessidade de buscar fontes de energia sustentáveis, no qual se enquadra a bioenergia, como fonte renovável e limpa e que pode possuir qualidade e eficiência igual ou superior às fontes não renováveis (NREL, 2004). Torna-se, portanto, relevante estudar o ciclo de vida da produção de cimento, comparando a utilização de fontes fósseis com renováveis, baseado no sistema gestão de energia alinhando com coerência as metas internacionais de redução dos impactos ambientais vinculados ao uso intensivo de energia.

A ferramenta Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) permite analisar de acordo com Lidiane Souza (2015) “toda a cadeia de produção, uso e fim de vida de processos e produtos, considerando os recursos energéticos, as matérias-primas e emissões decorrentes dessas atividades”.

O conceito de Avaliação de Ciclo de Vida está associado à análise dos efeitos ambientais associados a uma dada atividade desde a extração e utilização da matéria-prima no ambiente até o ponto em que todos os resíduos retornam a ele (Wigton et al., 1994). Para CHOI et al., (2012), a ACV é o método mais aceito na maior parte dos casos, para avaliar o desempenho ambiental de determinado processo ou produto. Com esse método, é possível avaliar desde a extração da matéria-prima, seu processamento, fabricação, distribuição, uso do produto e gerenciamento do fim de vida.

Do ponto de vista dos especialistas, a ACV pode ser utilizada em empresas e organizações para avaliar o impacto que seus produtos, ações ou serviços podem gerar ao longo da cadeia produtiva (Enciclo, 2014).

Com relação à eficiência energética, a Norma de Gestão da Energia ISO 50.001 possibilita delinear uma matriz energética eficiente e sustentável para o Sistema de Produção de Cimento (SPC), alinhando a produção a eficiência energética reduz danos ambientais e garante maior competitividade no mercado e marketing, que hoje em dia é uma questão de sobrevivência na indústria (Marques, 2011).

A ISO 50001 permite que as organizações estabeleçam os sistemas e processos necessários para melhorar de forma contínua o desempenho energético. A norma deve conduzir a reduções nos custos, nas emissões de gases do efeito estufa e outros impactos ambientais por meio da gestão sistemática da energia. (Prado Filho, 2016).

Dessa forma, definiu-se como objetivo deste trabalho a avaliação de ciclo de vida para a produção de cimento, considerando uma fonte fóssil (coque) e outra renovável (carvão vegetal) de energia para subsidiar a elaboração de uma matriz energética sustentável para o Sistema de Produção de Cimento (SPC), seguindo os preceitos da Norma ISO 50.001.

## 1.1 Enquadramento da pesquisa

Esta pesquisa desenvolve-se no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas na faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília na linha de pesquisa Energia e Ambiente.

## 1.2 Justificativa

As pesquisas acadêmicas em torno dos temas ACV e eficiência energética (ISO 50.001) são relevantes, dado que no Brasil o Plano Setorial de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação (Plano Indústria), composto por Alumínio, Cal, Cimento, Ferro-gusa e Aço, Papel e Celulose, Química, Vidro, tem como objetivo reduzir emissões de gases de efeito estufa geradas por processos industriais e pelo uso de energia na indústria, mediante o aumento da eficiência energética e o uso de materiais, e preparar o setor para os desafios, bem como as oportunidades da economia de baixo carbono, estabelecendo uma meta de redução de emissões global para a indústria de transformação de 5% sobre o cenário tendência (Business As Usual) de emissões em 2020, como pode ser visto na Figura 4 (Brasil, 2016b).

A escolha da indústria de cimento como objeto de estudo se justifica por ter uma participação significativa nas emissões de gases de efeito estufa e de dióxido de carbono em nível mundial (IPCC,2014). Como pode ser visto na Figura abaixo a indústria cimenteira é a sexta maior poluidora do mundo e no Brasil (Figura 5) fica em segundo lugar, atrás apenas da indústria siderúrgica.

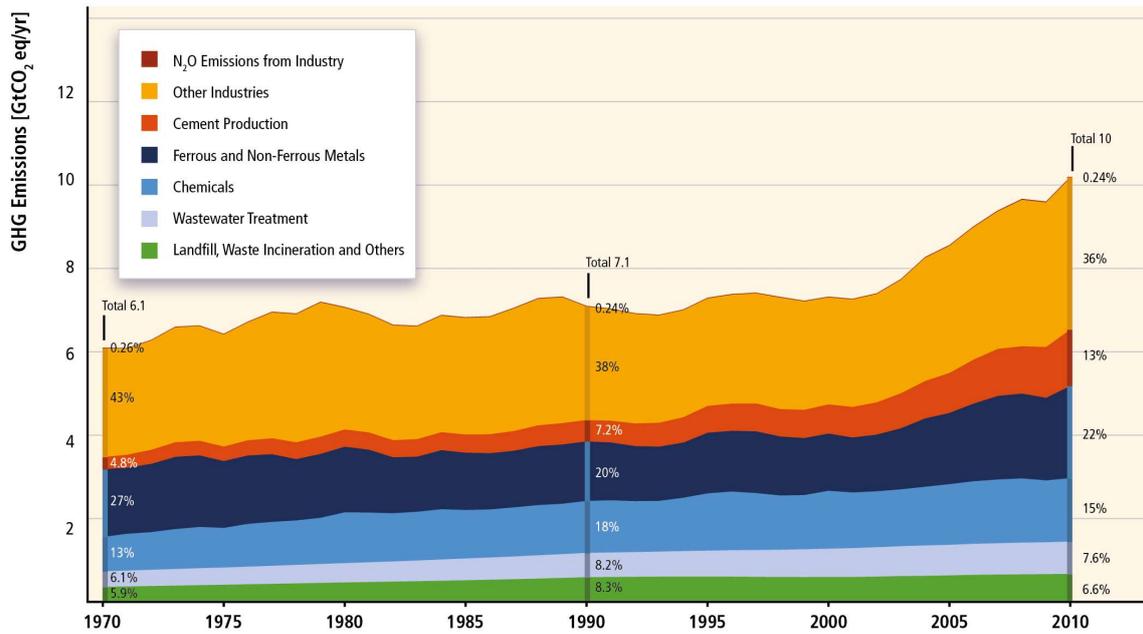


Figura 4 - Emissões totais diretas da indústria mundial, por setor, no período de 1970-2010 (GtCO<sub>2</sub>eq / ano).

Fonte: IPCC,2014.

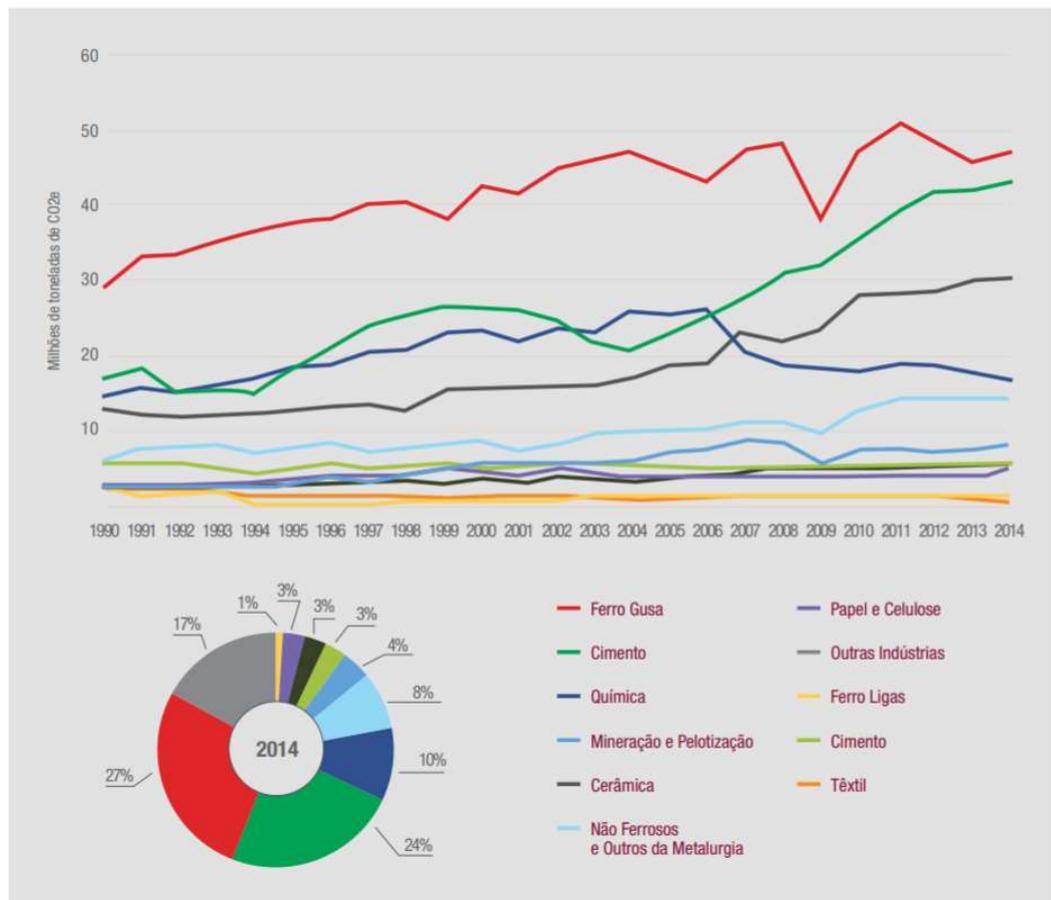


Figura 5 - Emissões de GEE em atividades industriais por ramo industrial (1990-2014).

Fonte: SEEG,2016.

No Brasil, os segmentos que mais contribuem para as emissões na indústria são a siderurgia (produção de ferro-gusa e aço), a produção de cimento e a indústria química. Juntos esses setores representaram 60% das emissões associadas à atividade industrial em 2014 (queima de combustíveis e processos industriais somados). O principal fator que explica a desaceleração das emissões de processos industriais foi a queda de produção na siderurgia, consequência da redução de demanda da matéria-prima pela China, cuja economia sofreu forte desaceleração. A produção de cimento continuou com emissões crescentes, apesar de desacelerar a partir de 2013 acompanhando a estagnação econômica. Esse segmento passou por uma redução de emissões por tonelada entre 2000 e 2004 devido ao aumento do uso de aditivos (redução do uso de clínquer). Com o aquecimento da construção civil na última década, as emissões voltaram a subir. A queda das emissões no setor industrial depende de aumentos da eficiência energética e inovações em processos industriais, como a Emissões de GEE em atividades industriais Emissões de GEE em atividades industriais por ramo industrial (1990-2014) expansão das possibilidades de uso de carvão vegetal na siderurgia, a reciclagem do aço, alternativas técnicas para reduzir ainda mais o uso de clínquer na produção de cimento e ainda processos de captura e armazenamento de carbono (SEEG,2016).

Para tanto, uma melhor compreensão sobre os impactos da substituição de fonte fóssil de energia por outra renovável no sistema de produção de cimento, pode contribuir para um melhor entendimento sobre como estruturar uma matriz energética mais eficiente, pois o sistema referido desde a sua origem não passou por grandes mudanças e transformações até que se começasse a corrida atual por indústrias mais sustentáveis e equilibradas em consumo de materiais e produção da matéria prima.

### 1.3 Questões de pesquisa

Face ao que foi exposto, o problema de pesquisa apresentado neste trabalho compreende:

Como a matriz energética do sistema de produção de cimentos poderá ser mais sustentável e eficiente?

## 1.4 Objetivo

### 1.1.1. Objetivo Geral

Elaborar um ACV do Sistema de Produção de Cimento (SPC) baseado em dados secundários, comparando uma fonte fóssil (coque) e outra renovável (carvão vegetal) de energia para subsidiar a elaboração de uma matriz energética sustentável, seguindo os preceitos da Norma ISO 50.001.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são classificados em conceituais, metodológicos e de análise.

- i. Levantar o Estado da arte da substituição energética aplicada a indústria de cimento;
- ii. Definir o escopo da substituição energética com combustíveis renováveis oriundos da biomassa em unidade de produção de cimento, incluindo os processos e fluxo energético de cimento;
- iii. Basear nas diretrizes das normas ISO 50001, 14040 e 14044, para definir os indicadores ambientais a serem analisados;

## 1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por seis capítulos. O capítulo 1 corresponde a introdução e apresenta o projeto de pesquisa com a apresentação da justificativa, o problema, o enquadramento da pesquisa, os objetivos gerais e específicos.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial bibliográfico, composto por um panorama da indústria cimenteira no Brasil e no mundo, uma caracterização do cimento como produto, o sistema produtivo e as etapas envolvidas para chegar ao produto final e os combustíveis alternativos utilizados na indústria de cimento.

O Capítulo 3 será responsável por apresentar a metodologia utilizada e o

software usado para executar os resultados apresentados no capítulo 4 que possui a avaliação de todo o ciclo de vida do sistema produtivo do cimento em etapas, a avaliação dos impactos referente as categorias escolhidas, além da discussão e apresentação do sistema de gestão de energia baseado na norma ISO 50001

Por fim, têm-se as principais considerações finais que resumem os principais resultados desta pesquisa, as limitações encontradas no decorrer do trabalho e os desdobramentos possíveis a partir do trabalho desenvolvido em sugestões de trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Este capítulo tem o objetivo de apresentar uma revisão da literatura sobre a indústria de cimento, avaliação do ciclo de vida e sistema de gestão de energia, baseado na visão dos principais autores e instituições das áreas. São introduzidos conceitos, abordagens, melhores estratégias de desenvolvimento e métodos. Essa revisão bibliográfica sobre posteriormente a metodologia, resultados e discussões nos capítulos seguintes.

### 2.1 INDÚSTRIA DE CIMENTO E O PROCESSO PRODUTIVO

A utilização do cimento pode ser considerada como uma espécie de “marca” da civilização atual, pois tem sido desde o início do século XX, a solução econômica e em grande escala tanto para o problema de moradia humana, como para a construção de grandes obras da engenharia moderna. Sua matéria-prima principal, calcário, é abundante e relativamente barata. Isso faz com que grandes e pequenas obras realizadas em todo o mundo utilizem o cimento, fato que está diretamente relacionado à melhoria de qualidade de vida das populações (SNIC, 2012).

Distribuída por quase todos os países do mundo, com atuação marcante tanto de empresas locais como de grandes grupos internacionais integrados e com desempenho global. A indústria sistematicamente implanta novas unidades integradas, com investimentos situando-se em torno de US\$ 150,00/t/ano de clínquer, englobando somente equipamentos e construção, não sendo computados terrenos, jazidas e capital operacional. No total, o investimento situa-se entre US\$ 180,00 e US\$ 200,00/ton/ano de cimento ou clínquer, mundialmente falando. A produção mundial de cimento em 2013 foi um pouco superior a 4.000 Mton, ou seja, um crescimento próximo a 8,1% em relação ao montante produzido em 2012, que foi de aproximadamente 3.700 milhões de toneladas. No cenário de produção de cimento no mundo, apenas a China, Índia e EUA mantiveram suas posições no ranking comparativo 2005-2013 (Cembureau, 2013).

Segundo dados obtidos pela The European Cement Association (2013), a produção de cimento, em uma perspectiva mundial, vivencia um contínuo

crescimento, com destaque a países de economias emergentes, tais como China, Índia e Brasil. Por outro lado, a partir dos dados apresentados na Tabela 1, a União Europeia, devido à crise econômica dos países participantes, como Espanha, Itália e Portugal, tem presenciado uma queda na produção nos últimos anos.

Tabela 1 - Produção de cimento dos principais países, período de 2006 a 2013 (em milhões de toneladas)

| Produção de cimento (em milhões de toneladas) |        |        |        |       |        |        |       |       |
|---|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| País  | 2006   | 2007   | 2008   | 2009  | 2010   | 2011   | 2012  | 2013  |
| China   | 1236,8 | 1361,2 | 1388,4 | 1644  | 1881,9 | 2063,2 | 2137  | 2359  |
| Índia   | 159.0  | 170.5  | 185.0  | 205.0 | 220.0  | 270.0  | 239.0 | 272.0 |
| União Europeia                                | 264.8  | 271.0  | 251.8  | 201.3 | 191.0  | 195.5  | 159.2 | 157.2 |
| EUA   | 98.2   | 95.5   | 86.3   | 63.9  | 65.2   | 68.6   | 74.0  | 77.0  |
| Brasil  | 41.4   | 45.9   | 51.6   | 51.7  | 59.1   | 63.0   | 68.0  | 71.9  |
| Turquia                                       | 47.4   | 49.3   | 51.4   | 54.0  | 62.7   | 63.4   | 63.8  | 70.8  |
| Rússia  | 54.7   | 59.9   | 53.5   | 44.3  | 50.4   | 56.1   | 53.0  | 55.6  |
| Japão   | 69.9   | 67.8   | 63.0   | 54.9  | 51.7   | 51.5   | 59.2  | 61.7  |

(Fonte: adaptado de THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, 2013, p. 12.)

Em 2012, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2012), o consumo per capita de cimento atingiu o valor de 353 kg/hab.ano. Embora este valor tenha sofrido aumento, comparado aos consumos realizados em países de infraestrutura desenvolvida, observa-se um patamar inferior, apresentando-se como uma oportunidade e necessidade de expansão da indústria. Somando-se a isso, já se nota o crescimento do parque industrial nacional, a partir da inauguração de novas unidades nos últimos anos.

O sistema de produção de uma indústria cimenteira tem em destaque duas atividades principais: extração de matéria-prima e o processo de fabricação do cimento, o que torna usual a instalação de plantas industriais próximas de minas de calcário, principal matéria-prima utilizada na manufatura do cimento (Santi, 2003). Este estudo descreve os impactos ambientais, sociais e econômicos que ocorrem nas diversas fases produtivas do cimento, desde a extração de matérias-primas, passando pela 'cliquerização' até a produção final.

Em relação às indústrias de cimento Portland, Santi (2003, p. 1-2) comenta que:

*À fabricação de cimento estão associados impactos ambientais significativos: a exploração de minerais supõe uma alteração dos ecossistemas naturais, especialmente da flora e da fauna, tanto pela ocupação do solo, quanto pelas atividades minerárias propriamente ditas; a emissão de material particulado associada às operações de manuseio e armazenamento e ao processamento de materiais sólidos [...]; a intensidade energética da atividade, que impõe o consumo elevado de recursos naturais, na maioria das vezes, não renováveis; e a emissão para a atmosfera dos gases de combustão.*

#### 2.1.1. Panorama da Indústria Cimenteira no Brasil

Após uma fase pioneira, iniciada no final do século XIX, o cimento começou a ser produzido no Brasil em escala industrial, a partir de 1926. Na década de 1970, a produção cresceu intensamente, com uma elevação do patamar de 9,8 milhões de toneladas por ano para 27,2 milhões de toneladas no início dos anos 1980, período que a recessão da economia nacional provocou queda no consumo e instabilidade política (SNIC, 2006).

Ao longo dos anos 1990 houve uma retomada no crescimento do consumo, que provocou grande aumento de produção. A produtividade desenvolvida na época da estagnação foi eficaz para a obtenção dos resultados nessa fase. O ano de 1999 foi recorde, alcançando 40,2 milhões de toneladas de cimento devido, especialmente, ao advento do Plano Real. A partir de 2000, a produção sofreu queda resultante das sucessivas crises mundiais e consequente instabilidade econômica. A partir de 2004, o consumo ficou estável, indicando o início de uma retomada. (SNIC, 2006). As Figura 6 e Figura 7 mostram o consumo e a produção brasileira entre a década de 1970 até o ano de 2015 de acordo com o período político (SNIC, 2013 e 2015).

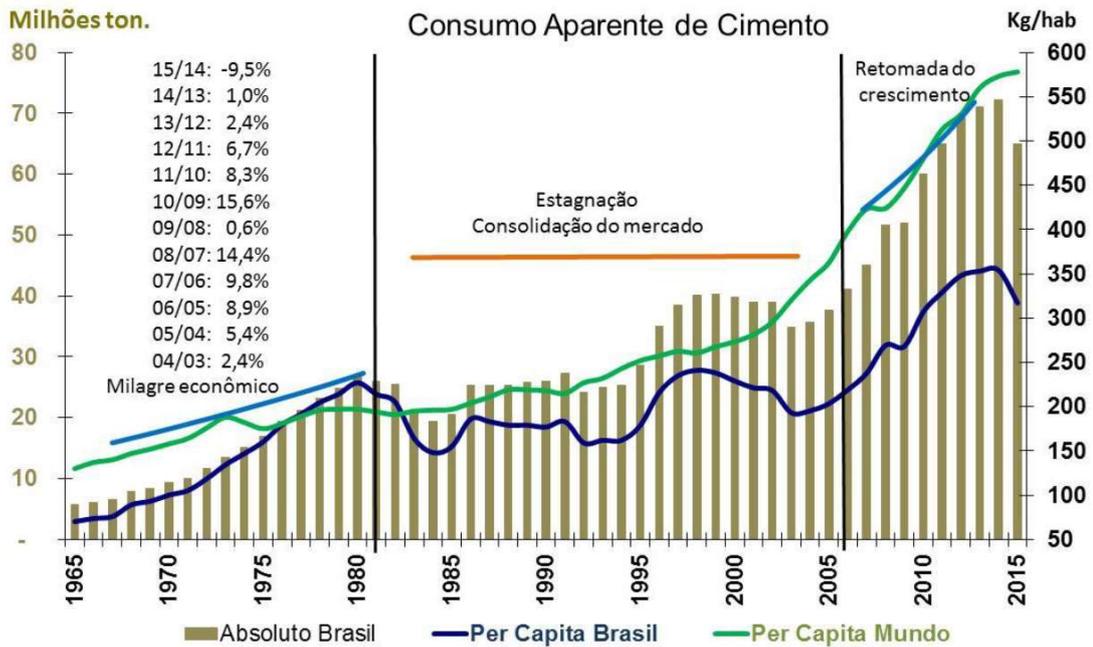


Figura 6 - Consumo aparente de cimento no Brasil.  
 (Fonte: SNIC, 2016.)

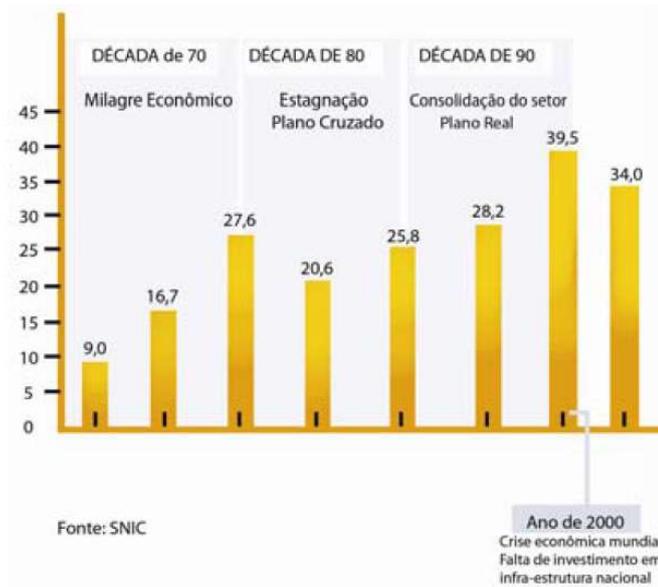


Figura 7 - Produção de cimento no Brasil.  
 (Fonte: SNIC, relatório anual 2012, 2012.)

O mercado do cimento no Brasil é atualmente composto por 24 grupos cimenteiros, nacionais e estrangeiros, com 99 plantas produzindo, espalhadas por todas as regiões brasileiras. A capacidade instalada calculada do país já é de 100 milhões de toneladas/ano, com a entrada das plantas em construção (Cimento, 2016).

A construção civil em 2016 sofreu queda de 5,2% e a indústria nacional como um todo, registrou uma queda um pouco menor, segundo o CBIC de 3,8%. Já a o mercado cimenteiro, segundo o SNIC, no mesmo ano, sofreu queda de 11,9%, com um consumo aparente de cimento totalizando 57,6 milhões de toneladas (Cimento,2016).

### 2.1.2. Cimento Portland

O Cimento Portland, por definição da Associação Brasileira de Normas Técnica (1991), é:

*“Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland com adição de sulfato de cálcio. O clínquer, por sua vez, é um produto constituído majoritariamente por silicatos de cálcio e durante a sua moagem permite a inserção de adições de materiais pozolânicos, carbonáticos, escória granulada de alto-forno e outros materiais”.*

A inserção de adições minerais na composição do cimento Portland, como escória granulada de alto-forno e pozolanas, se difundiu com o propósito de reduzir custos. Porém, devido ao ganho de desempenho pelo uso destas adições, a produção de cimentos Portland compostos e com adições superou a produção do cimento Portland comum (Mehta, 2014). Na Tabela 2, pode-se observar o contínuo aumento da produção e, por sua vez, a redução na produção do cimento Portland comum (CP I), na indústria brasileira.

Tabela 2 - Produção anual de cimento Portland (em 1.000 toneladas)

| Ano  | Tipos de cimento |        |        |       |       |        |          | Total  |
|------|------------------|--------|--------|-------|-------|--------|----------|--------|
|      | CP I             | CP II  | CP III | CP IV | CP V  | Branco | Ajustes* |        |
| 2007 | 1.034            | 29.848 | 7.842  | 3.876 | 3.254 | 115    | 582      | 46.551 |
| 2008 | 346              | 33.080 | 8.879  | 5.714 | 3.577 | 86     | 288      | 51.970 |
| 2009 | 84               | 34.662 | 7.967  | 5.097 | 3.377 | -      | 560      | 51.747 |
| 2010 | 88               | 38.474 | 8.345  | 6.686 | 4.211 | -      | 1.313    | 59.117 |
| 2011 | 103              | 38.659 | 9.347  | 8.247 | 4.973 | -      | 2.764    | 64.093 |
| 2012 | 98               | 39.743 | 10.000 | 9.612 | 5.580 | -      | 3.776    | 68.809 |
| 2013 | 263              | 41.249 | 9.405  | 9.863 | 5.660 | -      | 3.721    | 70.161 |

\*Dados secundários

(fonte: adaptado de Sindicato Nacional da Indústria, 2013)

Assim como no Brasil, na Europa e na Ásia as produções de cimentos compostos ultrapassaram a fabricação de cimento Portland puro. Já nos Estados Unidos, a produção de cimentos compostos ainda não é superior à do cimento puro, pois há grandes incentivos e aplicações do uso de adições minerais, como exemplo a cinza volante, na mistura utilizada na produção do concreto (Mehta, 2014).

A partir da Tabela 3, apresenta-se a relação dos cimentos Portland produzidos no Brasil, com exceção do cimento Portland resistente a sulfatos.

Tabela 3 - Tipos e especificações de cimentos Portland no Brasil

| <b>Componentes (% em massa)</b>                  |                              |                                      |  |                            |                             |
|--|------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Sigla</b>                                     | <b>Classe de resistência</b> | <b>Clínquer + sulfatos de cálcio</b> | <b>Escória granulada de alto-forno</b> | <b>Material pozolânico</b> | <b>Material carbonático</b> |
| <b>NBR 5732 - Cimento Portland comum</b>         |                              |                                      |  |                            |                             |
| CP I   | 25                           | 100                                  |  | 0                          |                             |
|  | 32                           |                                      |  |                            |                             |
|  | 40                           |                                      |  |                            |                             |
| CP I-S   | 25                           | 99-95                                |  | 1 – 5                      |                             |
|  | 32                           |                                      |  |                            |                             |
|  | 40                           |                                      |  |                            |                             |
| <b>NBR 11578 - Cimento Portland composto</b>     |                              |                                      |  |                            |                             |
| CP II-E  | 25                           | 94 - 56                              | 6 – 34                                 | -                          | 0 - 10                      |
|  | 32                           |                                      |  |                            |                             |
|  | 40                           |                                      |  |                            |                             |
| CP II-Z  | 25                           | 94 - 76                              | -                                      | 6 – 14                     | 0 - 10                      |
|  | 32                           |                                      |  |                            |                             |
|  | 40                           |                                      |  |                            |                             |
| CP II-F  | 25                           | 94 - 90                              | -                                      | -                          | 6 - 10                      |
|  | 32                           |                                      |  |                            |                             |
|  | 40                           |                                      |  |                            |                             |
| <b>NBR 5735 - Cimento Portland de alto-forno</b> |                              |                                      |  |                            |                             |

|  |      |         |       |         |       |
|--|------|---------|-------|---------|-------|
| CP III   | 25   | 65-25   | 35-70 | -       | 0 – 5 |
|  | 32   |         |       |         |       |
|  | 40   |         |       |         |       |
| <b>NBR 5736 - Cimento Portland pozolânico</b>                  |      |         |       |         |       |
| CP IV  | 25   | 85 – 45 | -     | 15 – 50 | 0 – 5 |
|  | 32   |         |       |         |       |
| <b>NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial</b> |      |         |       |         |       |
| CP V-<br>ARI   | > 34 | 100-95  |       |         | 0 – 5 |

(fonte: adaptado de ABNT, 1991)

A variedade de cimento Portland produzida pelas indústrias segue os padrões definidos pelas regulamentações determinadas para cada país. A norma EN-197-1 determina, para a União Europeia – UE – as especificações dos diferentes tipos de cimento Portland, estas são (European Committee for Standardization, 2000):

- a) CEM I – composto por 95% de clínquer Portland e até 5% de adições de sulfatos de cálcio;
- b) CEM II – abrange 19 variedades de cimentos Portland compostos, contendo, no mínimo, 65% de clínquer Portland. As diferentes adições incluídas no cimento são escória granulada de alto-forno, cinza volante calcária, cinza volante silicosa, sílica de fumo, pozolanas naturais, xisto cozido, calcário e sulfato de cálcio;
- c) CEM III – possui três variações de cimentos Portland, compostos por, no mínimo, 35% de clínquer Portland e adições variáveis de escória granulada de alto-forno;
- d) CEM IV – possui duas variações de composições de cimento Portland, uma composta por proporções de 65 a 89% de clínquer Portland e outra por 45 a 64% de clínquer Portland, com adições de materiais pozolânicos, tais como sílica de fumo, pozolanas naturais e cinzas

volantes;

- e) CEM V – também possui duas variações de cimento Portland, sendo uma composta de 36 a 60% e outra
- f) de 62% a 80% entre adições de escória granulada de alto-forno, cinza volante silicosa e pozolanas naturais.

Diante da proporção descrita dos cimentos constituintes das especificações europeias, pode-se notar algumas similaridades com os cimentos Portland nacionais, principalmente nas proporções de cimentos com adições mineiras.

### 2.1.3. Sistema produtivo do cimento

Existem quatro tipos principais de processos utilizados para a obtenção do clínquer são as vias úmida, semiúmida, semisseca e seca.

Os processos diferem de acordo com o nível de umidade da mistura de materiais que entra no forno. No mundo e no Brasil (SNIC, 2010), predomina a adoção do processo via seca (Figura 8), pois o mesmo diminui o uso de combustíveis em até 50% com relação aos outros processos e é tido como o mais moderno e de maior custo-eficiência (CSI, 2008). O processo via úmida é mais intensivo em carbono que o via seca, sendo necessário mais combustível para levar o material úmido à temperatura ideal para ocorrer a clinquerização (SNIC, 2012).

O processo de produção de cimento implantado na maioria das indústrias brasileiras é constituído, basicamente, das seguintes etapas de acordo com Santi & Sevá Filho (1996):

- 1ª. Moagem e homogeneização das matérias-primas – calcário, a argila e quantidades menores de minério de ferro e areia – para obtenção da farinha crua.
- 2ª. Clinquerização da farinha crua em fornos rotativos para obtenção do clínquer e resfriamento do clínquer.
- 3ª. Moagem do clínquer para e adição de gesso para obtenção do cimento.
- 4ª. Ensacamento e expedição do produto final.

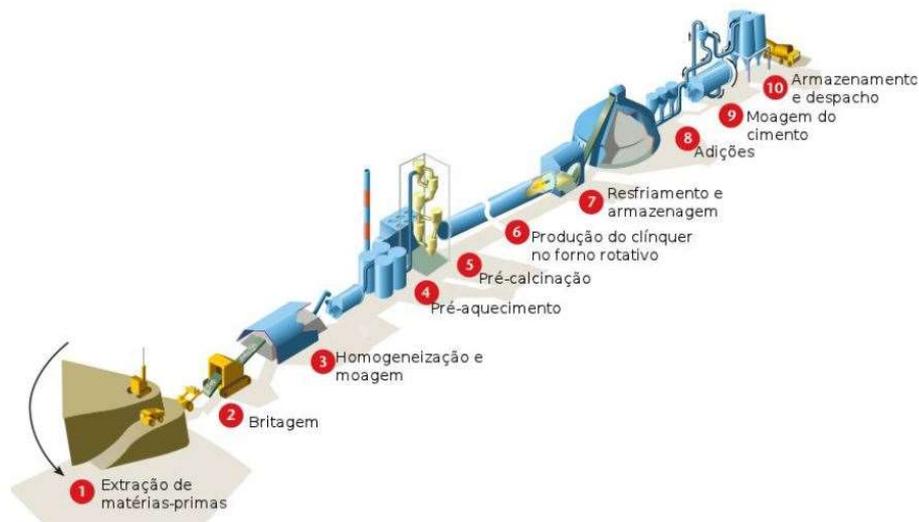


Figura 8 - Sistema produtivo do cimento

(Fonte: adaptado IEA - International Energy Agency, 2009)

#### 2.1.4. Energia para produção de cimento

A energia consumida no processo é fornecida pela queima de coque ou pela queima de óleo combustível nos fornos e no pré-calcinador. O clínquer produzido é misturado com gesso e outros aditivos na planta de moagem, em proporções adequadas à produção do cimento (Santi, 1997).

O consumo de energia térmica destinada aos fornos de clínquer e de energia elétrica destinada, principalmente, ao acionamento de motores é grande. O consumo específico de energia térmica depende do processo empregado, sendo que os processos por via seca com sistemas de pré-aquecimento e pré-calcinação têm consumos específicos de energia térmicas menores do que os outros sistemas. Para se ter uma ideia melhor da distribuição geral de energia numa planta cimenteira a Figura 9 nos mostra o gasto de energia térmica e elétrica.

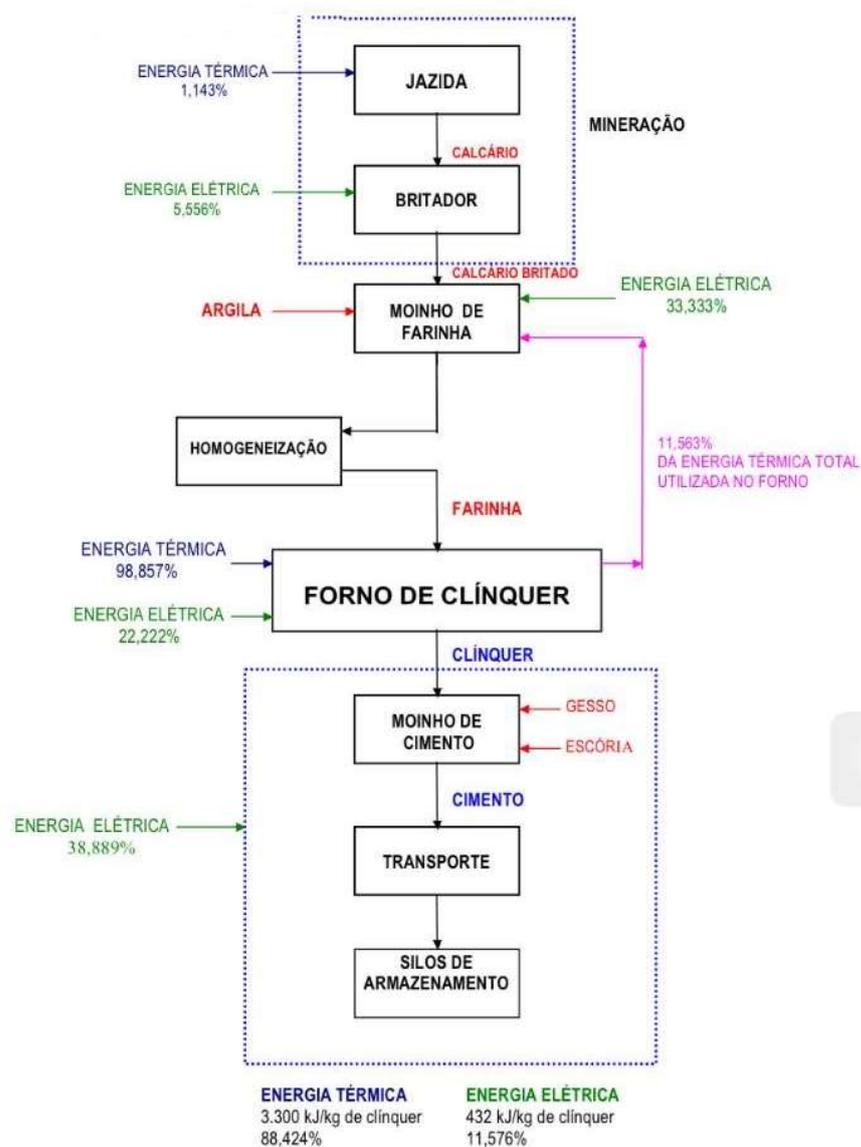


Figura 9 - Fluxograma energético da produção de cimento - Via seca.

(Fonte: CEMIG, 1991)

Pela Figura 9, é possível perceber que a concentração de gasto energético é maior na etapa de produção do clínquer, pois é nesta etapa que está 98% do uso de energia térmica.

A Tabela 4 apresenta o consumo energético na produção de cimento no Brasil, ano base 2010 (BEN, 2011), notadamente a energia térmica, em geral, advém de fontes não renováveis de energia. O coque de petróleo responde por 76% de todo o uso consumo energético, isso é um grande indicativo em relação aos problemas ambientais, sociais e econômicos, mas por outro lado aponta para as necessidades

de sustentabilidade energética industrial, outros mais de 10% corresponde ao consumo de eletricidade, pontos que serão base para o estudo e as soluções encontradas nesse trabalho.

Tabela 4- Consumo energético na produção de cimento brasileiro.

| Fonte             | Consumo 2011        |            |
|-------------------|---------------------|------------|
|                   | 10 <sup>3</sup> tEP | (%)        |
| Gás Natural       | 23                  | 0,56       |
| Carvão Mineral    | 62                  | 1,50       |
| Óleo Diesel       | 45                  | 1,09       |
| Óleo Combustível  | 8                   | 0,19       |
| Eletricidade      | 431                 | 10,40      |
| Carvão Vegetal    | 63                  | 1,52       |
| Coque de Petróleo | 3161                | 76,30      |
| Outras            | 350                 | 8,45       |
| <b>Total</b>      | <b>4143</b>         | <b>100</b> |

(Fonte: BEN, 2011)

#### 2.1.5. Combustíveis alternativos para indústria cimenteira

Em relação ao uso de recursos alternativos na indústria cimenteira, a Confederação Nacional da Indústria (2012), afirma que “o cimento e seu processo de produção tem contribuído para a solução de vários problemas ambientais, ao incluir em seu processo produtivo o aproveitamento de inúmeros resíduos industriais como matéria-prima ou combustível [...]”. Essa substituição de combustíveis de modo geral é justificada pela redução dos custos de produção e pelas vantagens ambientais globais que a prática proporciona, tais como a minimização dos consumos de combustíveis fósseis, redução de emissões de dióxido de carbono, aproveitamento do potencial energético do resíduo, ausência de cinzas no processo de co-incineração e a minimização dos impactos associados à disposição de material, cinzas e resíduos em aterros. Esse processo se apresenta em expansão, tendo em vista a substituição de combustíveis convencionais (coque de petróleo, óleos combustíveis e moinha de carvão vegetal) por resíduos com poder calorífico e/ou que caracterizem substituição de matérias-primas utilizadas na fabricação do clínquer, resultando na redução da destinação de resíduos aos aterros e consequente aumento em sua vida útil.

As indústrias europeias também fazem uso de materiais alternativos às matérias-

primas, oriundas de diferentes fontes, tais como resíduos e subprodutos como cinzas e escória granulada de alto-forno. Pela norma aplicada para União Europeia, a EN-197, já existem designações quanto a substituições de clínquer Portland por adições minerais, porém é recomendada a análise de ciclo de vida para avaliar, além das propriedades adquiridas, a quantificação da potencial redução dos impactos ambientais gerados no processo (The European Cement Association, 2013).

Devido às altas temperaturas de queimas nos fornos das indústrias de cimento, a instalação de plantas com coprocessamento torna-se estratégico para a empresa. O coprocessamento se baseia na recuperação da energia disponível nos resíduos, substituindo parte daquela fornecida pelos combustíveis tradicionais ou na substituição de matérias-primas por resíduos com características químicas semelhantes àquelas normalmente empregadas na produção do clínquer (Maringolo, 2001).

Desta forma, alia-se a necessidade de reduzir o consumo de recursos não-renováveis nas indústrias e do aproveitamento do espaço para incineração de resíduos. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2012), “das 51 plantas [industriais de cimento] instaladas para a produção do clínquer Portland, 36 estão licenciadas para o [coprocessamento] de resíduos.”. O licenciamento das plantas industriais brasileiras deve seguir o regulamento estabelecido pela resolução da CONAMA n. 264 em vigor desde 1999.

Para Mantegazza (2004), as adaptações dos fornos rotativos da indústria de cimento fornecem condições adequadas para a utilização de coprocessamento de produtos. Por isso, em diversas indústrias brasileiras já está sendo usado o coprocessamento para reaproveitamento de resíduos. Confederação Nacional da Indústria et al. (2012) apresentam exemplos de indústrias que já trabalham com o coprocessamento no Brasil, caso da Votorantim Cimento, Lafarge e Holcim.

Diante do que foi exposto, são variadas as alternativas para aplicações de soluções que promovam um sistema produtivo sustentável nas indústrias cimenteiras. A implementação de um sistema de gestão ambiental integrado ao processo produtivo

surge como uma ferramenta que fornece diretrizes e técnicas para o desenvolvimento sustentável das indústrias brasileiras.

Uma solução pode ser avaliada por intermédio da avaliação do ciclo de vida do produto e da ISO 50001, que será tratado nas sessões subsequentes, que se inicia com o diagnóstico dessa matriz atual, posteriormente um inventário desses dados e em sequência a construção de medidas efetivas para se chegar as metas estabelecidas.

## 2.2 Avaliação de ciclo de vida

Ciclo de Vida é o conjunto de todas as etapas necessárias para que um produto cumpra sua função na cadeia de produção e transformação. Seu foco repousa sobre o processo, ou seja, é a reflexão sobre o ciclo de vida dos produtos, processos e serviços (Silva, 2005).

A expressão do 'berço ao túmulo' ('cradle to grave') – alguns autores vêm adotando 'cradle to cradle', ou seja, do berço ao berço para significar o fechamento de ciclos produtivos– tem caracterizado o significado da ACV, que é uma poderosa ferramenta do pensamento sistêmico de apoio à tomada de decisões que: gera informações; avaliam impactos e compara desempenhos ambientais de produtos (Silva, 2005).

De acordo com Caldeira-Pires et al (2005):

*No longo prazo, a Avaliação de Ciclo de Vida pode prover as mudanças tecnológicas fundamentais na produção e nos produtos, em parte devido ao efeito multiplicador ao longo da cadeia de produção, inclusive no uso otimizado de energia e de materiais, por meio do uso de processos de reciclagem e de reuso. [...] A ACV, como ferramenta sistemática e integradora, provou também ser um instrumento apropriado para apoiar a tomada de decisões relacionada às questões ambientais, provendo as*

*informações ambientais necessárias pela tomada de decisões para a sustentabilidade.*

Os passos da ACV estão internacionalmente padronizados pela Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) e pela International Organization of Standardization (ISO). Atualmente, as normas para a ACV, as ISO 14040, 14041, 14042 e 14043, estão sendo condensadas em apenas dois únicos futuros documentos 14040 e 14044.

Na ISO 14040, a ACV é definida como uma técnica para a avaliação de aspectos ambientais associados ao produto por meio de uma compilação em um inventário de entradas e saídas relevantes de um sistema; avaliando os potenciais impactos ambientais associados a estas entradas e saídas, e interpretando os resultados do inventário a cada uma das fases de impacto em relação aos objetivos do estudo. Produtos também incluem serviços fornecidos em uma dada função (Haes, 2002).

A referência para o estudo de uma ACV é a função fornecida por um produto. Isto significa que todos os impactos ambientais são relatados para esta função, sendo a base para a comparação a ser feita, o produto, que fornece esta função, é estudado durante todo o seu ciclo de vida; todos os processos relatados para o produto durante todo o seu ciclo de vida são juntos denominados de sistema produtivo. Estes processos são estudados empregando uma aproximação matemática quantitativa formalizada. Uma clara distinção é feita entre objetivo e partes normativas, assegurando, desse modo, a transparência das informações obtidas (Chehebe, 1997).

A ACV é aplicada em vários níveis, variando desde a operação até as aplicações estratégicas. Ela é usada em gestão operacional, incluindo tomadas de decisão; em comunicação e marketing, incluindo o suporte a programas de rótulos ambientais; no desenvolvimento e planejamento de produtos contribuindo para a área de design ecológico, no suporte de investimentos capitais; e no planejamento estratégico. O foco das aplicações é em grandes companhias, mas cada vez mais inclui agências governamentais e organizações filiais de pequenas empresas

(Silva,2005).

Estas ferramentas vêm sendo aplicadas na Europa, no Japão e nos Estados Unidos e já vêm sendo adotadas por algumas indústrias no Brasil. Dentre algumas, a Natura e a Basf já realizaram estudos de Avaliação de Ciclo de Vida como ferramentas para a tomada de decisão sobre o uso de um ou outro produto. Em seus processos, outras empresas já vêm se adaptando principalmente para melhorarem sua competitividade no mercado, tendo em vista que Europa, Estados Unidos e Japão já utilizam como critério de importação de produtos se a empresa possui a ISO 14040 (Haes, 2002).

### 2.2.1 Métodos de ACV

Segundo Ferreira (2004) as categorias de impacto selecionadas na análise devem permitir uma avaliação abrangente, ter o mínimo de sobreposição, ser internacionalmente aceitas e o número de categorias não deve ser demasiadamente elevado.

As categorias normalmente utilizadas em estudos de ACV foram classificadas em três áreas de proteção: recurso, saúde humana e saúde do ecossistema, conforme Tabela 5. O manual do ILCD (JRC, 2010) recomenda que as categorias selecionadas devam abranger essas três áreas.

Tabela 5 - Lista de Categorias de Impacto para AICV

| Categorias de Impacto                 |         | Áreas de proteção |                      |
|---------------------------------------|---------|-------------------|----------------------|
| Função                                | Recurso | Saúde humana      | Saúde do ecossistema |
| <b>a) Depleção de recursos</b>        |         |                   |                      |
| Recursos abióticos                    | +       |                   |                      |
| Recursos bióticos                     | +       |                   |                      |
| <b>b) Poluição</b>                    |         |                   |                      |
| Aquecimento global                    |         | +                 | +                    |
| Destruição da cama de ozônio          |         | +                 | +                    |
| Formação de fotoquímicos atmosféricos |         | +                 | +                    |
| Acidificação                          |         | +                 | +                    |
| Eutrofização                          |         |                   | +                    |

|   |   |   |
|---|---|---|
| Toxicidade humana                               | + |   |
| Ecotoxicidade                                   | + | + |
| <b>c) Degradação de ecossistemas e paisagem</b> |   |   |
| Utilização do solo                              |   | + |

Fonte: Adaptado de Ferreira (2004).

Para a definição das categorias de impacto da ACV, realizada nessa dissertação, foi feito um levantamento das categorias utilizadas nos sistemas de emissão nacionais de DAP do Reino Unido, Alemanha, França, Holanda, Espanha, Noruega e Suécia e nas ACV's conduzidas em produções técnico-científicas brasileiras. Além disso, foram consideradas as categorias de impacto obrigatórias da EN 15.804 (BSI, 2014). Considerando-se as categorias de maior ocorrência e a viabilidade de aplicação, foram consideradas nesta avaliação as seguintes categorias:

- i. Potencial de Mudanças Climáticas (GWP): é causado pelo efeito estufa que é induzido pela emissão de gases como CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> para a atmosfera. As consequências dessas mudanças são as alterações na intensidade das chuvas e frequência de inundações, por exemplo (JRC, 2011). A unidade de medida dessa categoria de impacto é kg equivalente de CO<sub>2</sub>;
- ii. Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP): acontece devido à emissão de compostos químicos como o triclourofluormetano (R-11 ou CFC-11) ou clorodifluormetano (R-22). A mudança integrada no total de ozônio estratosférico por unidade de massa de emissão de um composto específico, relativamente à mudança integrada no total de ozônio por unidade de massa de emissão de um composto de referência (ex. CFC-11) (JRC, 2010). A unidade de medida dessa categoria de impacto é kg equivalente de R11;
- iii. Potencial de Acidificação (AP): é calculado sobre as emissões de substâncias ácidas nos ecossistemas naturais por meio da ação do homem. As principais fontes de emissões dessas substâncias são a agricultura, por meio dos fertilizantes, e a queima de combustíveis fósseis utilizados principalmente no

transporte e na produção de eletricidade. Exemplos dessas substâncias são: Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e Amônia (NH<sub>3</sub>) (JRC, 2011). A unidade de medida dessa categoria de impacto é kg equivalente de SO<sub>2</sub>;

- iv. Potencial de Eutrofização (EP): é calculado sobre o aumento de nitrogênio e fósforo em ambientes aquáticos ou terrestres. O aumento desses nutrientes na água causa um crescimento acelerado de algas impedindo que a luz do Sol chegue a profundidades mais baixas, o que reduz a fotossíntese, aumenta a quantidade de material orgânico na água e, conseqüentemente, reduz a disponibilidade de oxigênio levando ao desequilíbrio do ecossistema aquático. No ambiente terrestre, o aumento da acidificação do solo torna as plantas mais suscetíveis a pragas, além do excesso dessas substâncias que pode ser depositado na água potável (JRC, 2010). A unidade de medida dessa categoria é kg equivalente de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>;
- v. Potencial de Formação de Ozônio Fotoquímico (POCP): é calculado sobre as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (VOCs). Na presença do Sol, o ozônio pode ser criado baixa atmosfera o que pode resultar em doenças respiratórias (JRC, 2010). A unidade de medida desse impacto é kg equivalente de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>;
- vi. Potencial de depleção de Recursos Abióticos fósseis e não fósseis (ADP): é a redução da disponibilidade de recursos em virtude da atividade humana comprometendo a oportunidade das gerações futuras em ter acesso a tal recurso e a capacidade de prosseguir com atividades que dependem desse recurso e acarretando em pressão aos substitutos (FERREIRA, 2004). É calculado sobre o potencial de redução dos recursos abióticos (recursos não vivos e não renováveis presentes na natureza, tais como rochas, areia, água, etc) e fósseis (JRC, 2010).

As categorias selecionadas abrangem as três áreas de proteção e as macro categorias Impacto Ambiental Globais, indicadores de uso de recursos, indicadores

de fluxo de saída e indicadores de categorias de resíduo definidas pela EN 15.804 (BSI, 2014).

#### 2.2.1.1 Método de AICV, normalização e ponderação

O método escolhido para este trabalho é o CML 2001, versão de novembro de 2010, assim como para a normalização, considerando os dados para o mundo, e a ponderação, desenvolvida pela PE-International em 2012 considerando o contexto mundial para as metodologias CML, ReCiPe e Traci.

O método CML 2001 (ou CML 01) surgiu por meio de estudos de um grupo de cientistas associados ao Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, Holanda. O grupo publicou um guia operacional para as normas ISO (GUINÉE et al, 2001b; GUINÉE et al, 2001c), nomeado Dutch Handbook on LCA (CML). A proposta geral é fornecer orientações com guias operacionais para conduzir um estudo de ACV passo a passo.

O guia relata uma diferenciação na abordagem dos impactos ambientais. A abordagem orientada ao problema (midpoint) e a orientada ao dano (endpoint) foram diferenciadas. Neste aspecto, o método holandês CML 2001 foi criado com diferentes temas ambientais (categorias de impactos) relacionados à abordagem orientada ao problema (midpoint).

Segundo Takeda (2008), o CML “Guide” fornece uma lista de categorias de avaliação de impacto, que podem ser agrupadas em:

- a) Categorias obrigatórias de impacto: São indicadores de categoria utilizados na grande maioria de ACV's;
- b) Categorias de impacto adicionais: Dizem respeito à existência de indicadores operacionais, porém não comumente inclusos em ACV's;
- c) Outras categorias de impacto: Quando não existem indicadores operacionais disponíveis, tornando-se impossível a inclusão quantitativa em estudos ACV.

As categorias de impacto obrigatórias estão disponíveis em diversos métodos de AICV, e permitem comparações de seus resultados entre diferentes

métodos. As principais categorias de impacto do CML 2001 são: Acidificação, Depleção da camada de ozônio, Depleção de recursos abióticos, Ecotoxicidade, Eutrofização, Formação fotoquímica de ozônio troposférico, Mudança Climática, Oxidação fotoquímica, Radiação ionizante, Toxicidade humana, Uso do solo (GUINÉE,2001a).

O método conta com fatores de caracterização específicos previamente quantificados para cada problema ambiental (midpoint) ou categoria de impacto. Neste sentido, as emissões relatadas na fase de ICV são convertidas em potencial de impacto ambiental por meio do produto entre sua respectiva quantidade e seu fator de caracterização na categoria de impacto conexa (GUINÉE, 2001a).

A amplitude das categorias de impacto associadas ao CML 2001 releva sua importante representatividade na comunidade científica. Alvarenga (2010) afirma que o método mais utilizado em estudos ACV's que adotam a abordagem midpoint é o CML 2001. Para os praticantes de ACV, é altamente recomendável que, quando usuários do CML 2001, consultem as referências originais (GUINÉE et al, 2001a; GUINÉE et al, 2001b; GUINÉE et al, 2001c) para o entendimento de detalhes específicos deste método de AICV.

### 2.3 ISO 50001 – Sistema de Gestão de energia

A norma ISO 50001 é uma ferramenta de gestão muito útil para a gestão energética, a ISO 50001 tem o objetivo de ser o instrumento balizador para padronização da gestão energética.

Aliada da produção, a eficiência energética reduz danos ambientais e garante maior competitividade no mercado, sendo então questão prioritária para organizações em todo o mundo. A partir dessa premissa, esse estudo apresenta a norma ISO 5001, que traz uma diretriz para implementação e manutenção de um sistema de gestão da energia com o propósito de habilitar organizações de todos os portes a buscarem a melhoria contínua de seu desempenho energético. Utilizando principalmente duas ferramentas básicas, que são o ciclo PDCA da área de qualidade e Consumo Energético da área de Termodinâmica, além de ferramentas administrativas organizacionais, ela especifica requisitos por meio de quatro grupos:

Responsabilidades; Política e Planejamento Energético; Implementação e Operação; Verificação e Controle, sendo tudo devidamente registrado e com envolvimento de todos da organização, para buscar ganhos e uma possível certificação internacional como hoje ocorre com as normas das series ISO 9000 e 14000 (U.L. Univerty, 2016).

No caso do Brasil, as diretrizes da ISO 50001 serão incorporadas ao Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) como um dos mecanismos utilizado na economia do consumo já que ele foi incorporado ao Plano Nacional de Energia 2030. A norma brasileira NBR ISO 50001:2011 foi publicada em 17 de julho de 2011, e é a correspondente nacional sobre o tema.

O propósito da norma é habilitar as organizações a estabelecerem sistemas e processos necessários para melhorar o desempenho energético, incluindo eficiência, uso e consumo de energia. Espera-se que a implementação desta norma leve a reduções das emissões de gases de efeito estufa, custo de energia e outros impactos ambientais associados por meio de gestão sistemática da energia. Esta Norma é aplicável a todos os tipos e tamanhos de organizações, independente de condições geográficas, culturais ou sociais. Sua implementação bem-sucedida depende do compromisso de todos os níveis e funções da organização, especialmente da alta direção. (Prado Filho, 2016)

A norma recomenda às organizações vários procedimentos como, por exemplo, adoção de critérios de eficiência na compra de equipamentos, estruturação e cuidados adicionais na operação e manutenção de equipamentos, conscientização e treinamento sobre os aspectos vinculados ao uso adequado da energia. As organizações deverão definir um padrão inicial de uso da energia em seus processos e atividades e adotar ações de melhoria ao longo do tempo, com foco no nível de consumo e na eficiência energética (Avelino Pereira, 2016).

A norma está baseada na estrutura de melhoria contínua do PDCA (Plan-Do-Check-Act) e incorpora a gestão da energia nas práticas organizacionais diárias melhoria da competitividade e redução de emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais relacionados. Ela é aplicável independentemente dos tipos de



necessários para produzir resultados de acordo com as oportunidades de melhoria do desempenho energético e da política energética da organização.

Fazer: implementar os planos de ação de gestão da energia.

Verificar: monitorar e mensurar os processos e as características chave de suas operações que determinem o desempenho energético contra a política energética e objetivos e relatar os resultados.

Agir: adotar ações para a melhoria contínua do desempenho energético e do SGE.

A norma destina-se a:

1. Auxiliar as organizações a fazer um melhor uso de seus bens de consumo de energia;
2. Criar transparência e facilitar a comunicação na gestão de recursos energéticos;
3. Promover as melhores práticas de gestão de energia e reforçar os bons comportamentos de gestão de energia;
4. Auxiliar as organizações na avaliação e priorização da implementação de tecnologias eficazes de energia;
5. Fornecer uma estrutura para promover a eficiência energética em toda a cadeia de fornecimento;
6. Facilitar a melhoria da gestão da energia para projetos de emissão de gases do efeito estufa;
7. Permitir a integração com outros sistemas de gestão organizacional, tais como ambiental, de saúde e segurança.

A ISO 50001 fornece uma estrutura de requisitos, permitindo que as organizações:

1. Desenvolvam uma política mais eficaz com relação ao uso de energia;
2. Estabeleçam metas e objetivos para atender a essa política;
3. Utilizem dados para compreender melhor e tomar decisões com relação ao uso e consumo de energia;

4. Façam a medição dos resultados;
5. Revisem a eficácia da sua política;
6. Obtenham melhoria contínua na gestão da energia.

A norma não determina metas para a melhoria de desempenho energético. Fica a cargo da organização ou das autoridades regulatórias. Isto significa que qualquer organização, independentemente de seu atual domínio de gestão da energia, pode implementar a ISO 50001 para estabelecer uma linha de base e melhorá-la em um ritmo adequado ao seu contexto e capacidade. Ela pode ser implementada unicamente pelos benefícios internos e externos que fornece às organizações e a seus clientes e acionistas (ABNT NBR ISO 50001, 2011).

A ISO 50001 pode ser implementada isoladamente ou de forma integrada a outras normas de sistemas de gestão, e a certificação por um auditor independente em conformidade com o sistema de gestão da energia da ISO 50001 não é uma exigência da norma. Certificar ou não certificar é uma decisão a ser tomada pelo usuário da norma, a menos que isso seja imposto por regulamentação (ABNT NBR ISO 50001, 2011).

## 2.4 Síntese

Neste capítulo apresentou-se uma sistematização da literatura pertinente ao tema, oriunda de uma extensiva prospecção e revisão da literatura. O foco foi dado aos principais conceitos para que houvesse uma nivelção de informações, bem como a explanação das principais características e os fatores que serão base dos próximos capítulos de metodologia e resultados, bem como nortearam as discussões apresentadas posteriormente.

### **3 METODOLOGIA**

Para esta dissertação, foi realizado um levantamento bibliográfico em obras da literatura acadêmica e aquelas produzidas pelo próprio setor cimenteiro, sobre o processo produtivo do cimento e sua importância para a sociedade atual.

Também foram pesquisados periódicos eletrônicos especializados com o propósito de verificar estudos feitos sobre a indústria do cimento, no mundo e no Brasil, identificando-se seu papel na economia e seus impactos no meio natural.

O enfoque foi em estudos sobre Avaliação de Ciclo de Vida, mudanças climáticas e conflitos socioambientais e econômicos, gestão e eficiência energética.

Para a parte prática, a primeira atividade compreendeu o aprendizado da norma ISO 50001 de Gestão Energética e do software SimaPro S Analyst versão 8.0.1. Em seguida fez-se o inventário de ciclo de vida com os dados de literatura e os inseriu no software. Os dados foram tratados no programa para então obter os resultados que foram passíveis de análises e interpretações. Posteriormente foram feitos os diagnósticos energético da indústria cimenteira para análise dos possíveis combustíveis alternativos a serem utilizados.

#### **3.1 Avaliação de ciclo de vida**

Para realização do ACV as fases foram realizadas como mostra a Figura 11, está é a determinação. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a ACV se divide em quatro fases, a definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação do impacto e a interpretação das três fases anteriores.

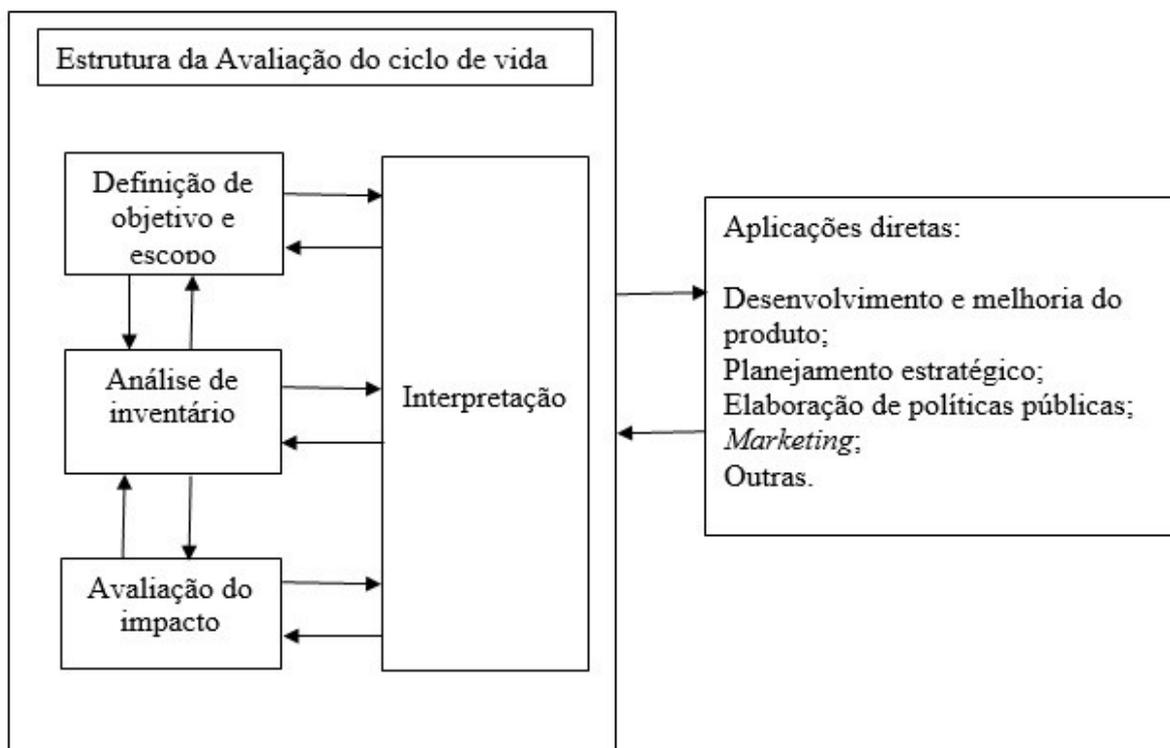


Figura 11 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte: ABNT, 2001

Na fase da definição do objetivo e escopo foi escolhida a fronteira do sistema (amplitude do estudo), a unidade funcional, quais os requisitos dos dados necessários e qual o objetivo deve ser alcançado com essa análise.

A análise de inventário foi a fase onde os dados foram coletados e dispostos nas entradas e saídas do sistema, dados qualitativos e quantitativos.

Posteriormente a essa fase de inventariado, os dados foram inseridos no software SimaPro® escolhido, descrito na sessão seguinte, pois assim finalizaríamos a etapa de avaliação do ciclo produtivo do cimento na fase de avaliação dos impactos, onde foi observado a significância dos impactos ambientais potenciais, ou seja, os que mais foram relevantes na análise baseado na referência bibliográfica realizada.

Ao final da coleta das três fases, foi feita então uma interpretação dos resultados obtidos visando alcançar conclusões e recomendações em concordância com os impactos ambientais escolhidos através do método CML 2001, que está

descrito na sessão 2.2.1.1.

#### 4.1.1 SimaPro®

O software SimaPro®, desenvolvido pela empresa Pré Consultants, tem usuários em mais de 80 países e é o mais utilizado para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). É uma ferramenta que permite coletar dados e analisar o desempenho ambiental de produtos e serviços. É possível modelar e analisar ciclos de vida complexos de uma forma sistemática e transparente, seguindo as recomendações da série ISO 14040.

Lançado em 1990, é uma ferramenta confiável e flexível usada pelas grandes indústrias, consultorias e universidades. A Figura 12 apresenta algumas funcionalidades disponíveis nas diferentes versões comercializadas.

| Licenças Educacionais                            | Faculty | Classroom | PhD     |           |
|--|---------|-----------|---------|-----------|
| Licenças Profissionais                           | Compact |           | Analyst | Developer |
| Funcionalidades disponíveis                      |         |           |         |           |
| Importação (CSV e Base de dados formato SimaPro) | ✓       | ✓         | ✓       | ✓         |
| Versão multiusuário disponível                   | ✗       | Somente   | Sim**   | ✓         |
| Licenças temporárias disponíveis                 | Sim*    | ✓         | ✓       | ✓         |
| Base de dados de ecoinvent 2 + ecoinvent 3       | ✓       | ✓         | ✓       | ✓         |
| Métodos de Avaliação do Impacto                  | ✓       | ✓         | ✓       | ✓         |
| Visualização de Árvore                           | ✓       | ✓         | ✓       | ✓         |
| Visualização de Rede                             | ✓       | ✓         | ✓       | ✓         |
| Cálculos de Monte Carlo                          | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Modelagem parametrizada/Análise de Cenário       | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Exportação (CSV e Base de dados formato SimaPro) | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Edição de bibliotecas                            | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Move dados de projetos para bibliotecas          | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Análise Avançada de Resultados                   | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Árvore de processos                              | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Importação/Exportação em formato EcoSpold        | ✗       | ✗         | ✓       | ✓         |
| Ocultagem de dados confidenciais                 | ✗       | ✗         | ✗       | ✓         |
| Exportação de dados em Matriz                    | ✗       | ✗         | ✗       | ✓         |
| 2 way COM interface                              | ✗       | ✗         | ✗       | ✓         |
| Links diretos Excel/ASP                          | ✗       | ✗         | ✗       | ✓         |

\* Somente para Faculty \*\* Somente para Analyst

Figura 12 - Funcionalidades disponíveis das diversas versões do SimaPro® comercializadas.

Fonte: ACV Brasil, 2014.

## 4.2 Norma ISO 50001 – Sistema de Gestão de Energia (SGE)

Baseado no inventário realizado para a ACV, a proposta da SGE foi explanar as melhores práticas a serem seguidas para alcançar as metas internacionais,

geralmente essa norma é aplicada a uma unidade específica de consumo energético, mas para uma explanação mais generalista nesse estudo as informações foram colocadas para se encaixar de forma geral a uma unidade “padrão” de produção de cimento, assim como descrito no escopo e nas fronteiras do ACV.

A norma possui a prática do PDCA como estrutura, portanto, o fluxo de ações que estabelecem o sistema de gestão da energia e o mantém, possibilitando a melhoria contínua do processo de gestão. A Figura 13 apresenta um diagrama onde é apresentada a distribuição dos requisitos da Norma no ciclo do PDCA, cumprindo suas etapas. A única etapa realizada por esse trabalho foi o P, planejamento. As metas estabelecidas, as melhores práticas encontradas, a política energética descrita e a revisão energética foram apresentadas para generalizar o setor cimenteiro brasileiro diante dos acordos internacionais e as metas estabelecidas para serem cumpridas. Sendo assim as etapas DCA só podem ser realizadas quando uma unidade fabril ou empresa decidir investir na implementação da Norma, pois as realidades de produção são diversas, os cenários financeiros e políticas internas empresariais mudam, além dos requisitos legais que cada empresa possui de acordo com suas qualificações e produtos fornecidos.

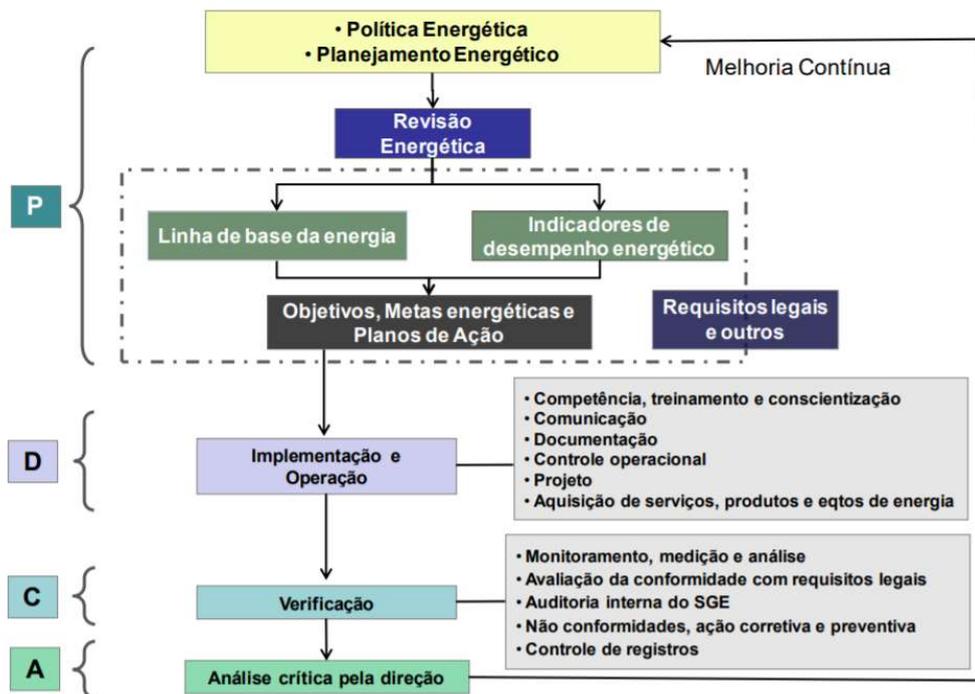


Figura 13 - Os requisitos da norma distribuídos nas ações do PDCA

Fonte: Pinto,2014

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Avaliação do ciclo de vida da indústria cimenteira

#### 6.1.1 Escopo do estudo

A fronteira do sistema define o âmbito de um ICV (Inventário de Ciclo de Vida). A fronteira do sistema baseou-se na produção do cimento Portland e de resíduos. A Figura 14 mostra os limites do sistema para a fabricação cimento Portland e de resíduos. Inclui todas as entradas e saídas associadas à produção de cimento e assim torna-se descrita entre berço e portão.

O processo de produção de cimento implantado na maioria das indústrias brasileiras é o denominado processo por via seca e é constituído, basicamente, das seguintes etapas de acordo com Santi & Sevá Filho (2004):

- 1ª. Moagem e homogeneização das matérias-primas – calcário, a argila e quantidades menores de minério de ferro e areia – para obtenção da farinha crua.
- 2ª. Clinquerização da farinha crua em fornos rotativos para obtenção do clínquer e resfriamento do clínquer.
- 3ª. Moagem do clínquer para e adição de gesso para obtenção do cimento.
- 4ª. Ensacamento e expedição do produto final.

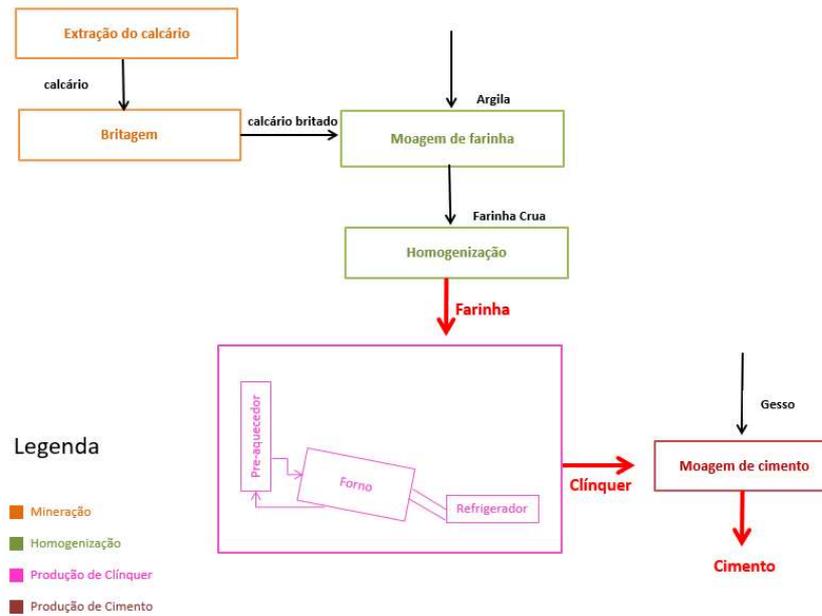


Figura 14 - Fronteira do sistema de produção do cimento.

### 6.1.2 Inventário do ciclo de vida

Para realização do inventário, definiu-se como unidade funcional 1 tonelada de cimento produzido. O balanço de energia foi descrito percentualmente pela CEMIG (1991), e o balanço de massa foi realizado como descrito pela Comissão Europeia na JRC reference reports, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and control).

### 6.1.3 Mineração e homogeneização

A Figura 15 apresenta as entradas e saídas do processo das etapas de extração do calcário, britagem e moagem de farinha.

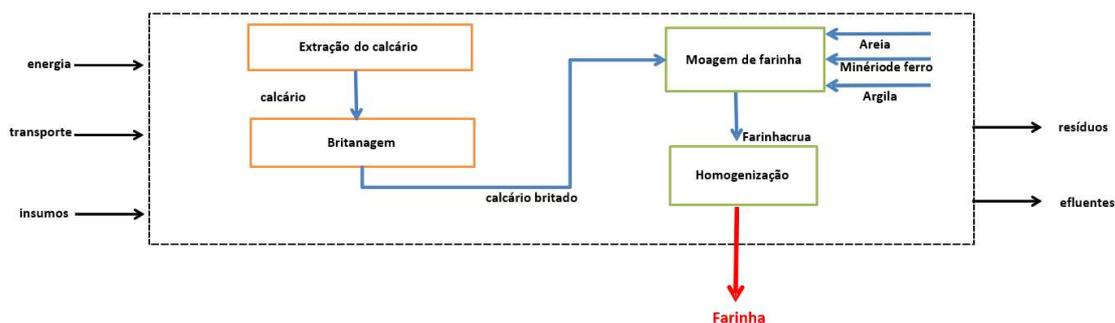


Figura 15 - Etapas da extração de calcário.

A Tabela 6 apresenta o balanço de massa e de energia das etapas referidas.

Tabela 6 - Inventário da etapa de extração do calcário.

| Extração do calcário |                  |                       |  |
|----------------------|------------------|-----------------------|--|
| ENTRADAS             |                  |                       |  |
| Materiais            | Cimento          | 1 t                   |  |
|                      | Calcário         | 1,41 t/t Cimento      |  |
| Transporte           | Caminhão -       | 120 tKm/t Cimento     | Caminhões Caçambas Basculantes da marca Ford, modelo F-12.000, com capacidade de carga de 12 toneladas de carga, e caçamba de cinco m³ de capacidade |
|                      |                  |                       |  |
| SAIDAS               |                  |                       |  |
| Materiais            | Cimento          | 1 t                   |  |
|                      | Calcário         | 1,41 t/t Cimento      |  |
|                      |                  |                       |  |
| Britagem             |                  |                       |  |
| ENTRADAS             |                  |                       |  |
| Materiais            | Cimento          | 1 t                   |  |
|                      | Calcário         | 1,41 t/t Cimento      |  |
| Energia              | Energia da rede  | 6,1116 KWh/t Cimento  | Sabendo que são gastos 110KWh/t Cimento transformando para MJ/ t Cimento seriam 396 já que 1KWh = 3,6 MJ   |
|                      |                  | 5,56%                 |  |
| SAIDAS               |                  |                       |  |
| Materiais            | Cimento          | 1 t                   |  |
|                      | Calcário Britado | 1,41 t/t Cimento      |  |
|                      |                  |                       |  |
| Moagem de farinha    |                  |                       |  |
| ENTRADAS             |                  |                       |  |
| Materiais            | Cimento          | 1 t                   |  |
|                      | Calcário Britado | 1,41 t/t Cimento      |  |
|                      | Argila           | 0,139 t/t Cimento     |  |
|                      | Areia            | 0,034 t/t Cimento     |  |
|                      | Minério de Ferro | 0,015 t/t Cimento     |  |
| Energia              | Energia da rede  | 36,6663 KWh/t Cimento |  |
|                      |                  | 33,33%                |  |
| SAIDAS               |                  |                       |  |
| Materiais            | Cimento          | 1 t                   |  |
|                      | Farinha          | 1,598 t/t Cimento     |  |
|                      |                  |                       |  |

#### 6.1.4 Produção do clínquer

A Figura 16 e Tabela 7 apresentam as entradas e saídas do processo das

etapas de transformação do clínquer, que é constituído basicamente pela etapa de pré-aquecedores, forno e refrigerador.

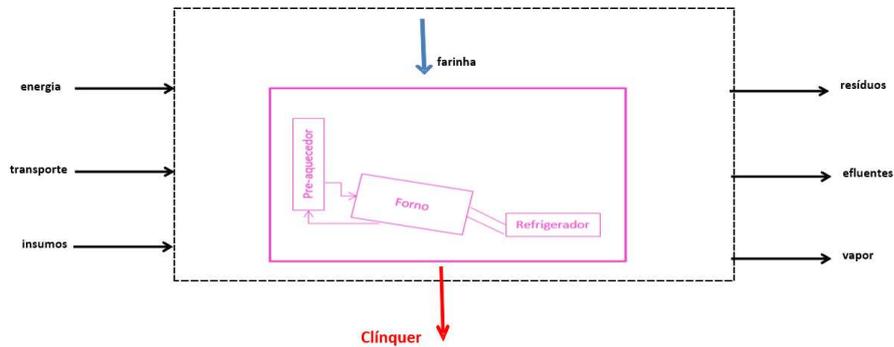


Figura 16 - Etapas de Transformação de clínquer.

Tabela 7 - Inventário da etapa de transformação de clínquer.

| Transformação de Clínquer   |                 |                        |  |  |
|-----------------------------|-----------------|------------------------|--|--|
| CASO COQUE                  |                 |                        |  |  |
| ENTRADAS                    |                 |                        |  |  |
| <b>Materiais</b>            | <b>Cimento</b>  | <b>1 t</b>             |  |  |
|                             | Farinha         | 1,598 t/t Cimento      |  | 1598   |
| <b>Materiais auxiliares</b> | Ar              | 3428,9868 Kg/t Cimento |  |  |
|                             | Água            | 93,4579 Kg/t Cimento   |  | Inclui matéria-prima, a umidade do combustível e injetado água moinho cru                    |
| <b>Energia</b>              | Energia da rede | 24,4442 KWh/t Cimento  |  | 22,22%   |
| Energia térmica             | Coque           | 3483,6137 MJ/t Cimento |  | Sabendo que o poder calorífico do coque é 33500 KJ/Kg combustível                            |
|                             |                 | 103,9884 Kg/t Cimento  |  |  |
|                             |                 |                        |  | 5224,4331  |
| SAÍDAS                      |                 |                        |  |  |
| <b>Materiais</b>            | <b>Cimento</b>  | <b>1 t</b>             |  |  |
|                             | Clínquer        | 1,01553 t/t Cimento    |  | 1015,53  |
| <b>Emissão para o ar</b>    | CO2             | 894,5601 Kg/t Cimento  |  |  |
|                             | O2              | 519,0445 Kg/t Cimento  |  |  |
|                             | N2              | 2621,7117 Kg/t Cimento |  |  |
|                             | Vapor (H2O)     | 173,7529 Kg/t Cimento  |  | Inclui a água produzida na reação química de transformação em forma de vapor                 |
|                             |                 |                        |  | 5224,5992  |
| CASO CARVÃO VEGETAL         |                 |                        |  |  |
| ENTRADAS                    |                 |                        |  |  |
| <b>Materiais</b>            | <b>Cimento</b>  | <b>1 t</b>             |  |  |
|                             | Farinha         | 1,598 t/t Cimento      |  | 1598   |
| <b>Materiais auxiliares</b> | Ar              | 755,732 Kg/t Cimento   |  |  |
|                             | Água            | 93,4579 Kg/t Cimento   |  | Inclui matéria-prima, a umidade do combustível e injetado água moinho cru                    |
| <b>Energia</b>              | Energia da rede | 24,4442 KWh/t Cimento  |  | 22,22%   |
| Energia térmica             | Carvão Vegetal  | 3483,6137 MJ/t Cimento |  | Sabendo que o poder calorífico do carvão vegetal é 7000 Kcal/Kg ou 29307,6 KJ/Kg combustível |
|                             |                 | 118,8638 Kg/t Cimento  |  |  |
|                             |                 |                        |  | 2566,0537  |
| SAÍDAS                      |                 |                        |  |  |
| <b>Materiais</b>            | <b>Cimento</b>  | <b>1 t</b>             |  |  |
|                             | Clínquer        | 1,01553 t/t Cimento    |  | 1015,53  |
| <b>Emissão para o ar</b>    | CO2             | 139,775 Kg/t Cimento   |  |  |
|                             | O2              | 519,045 Kg/t Cimento   |  |  |
|                             | N2              | 863,654 Kg/t Cimento   |  |  |
|                             | Vapor (H2O)     | 28,025 Kg/t Cimento    |  | Inclui a água produzida na reação química de transformação em forma de vapor                 |
|                             |                 |                        |  | 2566,029   |

#### 6.1.4.1 Balanços de massa

Para o balanço de massa, a equação da combustão de carvão vegetal e coque de petróleo compreende:

- Caso carvão vegetal

De acordo com o Centro de Tecnologia de Minas Gerais (CETEC, 1980) a composição do carvão vegetal é: 80,3% de C, 3,1% de H, 0,2% de N e 11,3% de O, para razões de cálculos foram desprezados todos os valores com influencia menor que 1% m/m.

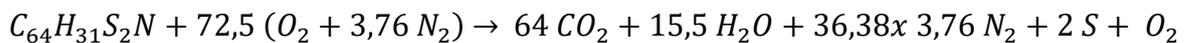
Assim:



- Caso coque de petróleo

De acordo com Santos (2007) a composição do coque é: 87,9% de C, 3,51% de H, 1,61% de N, 7,47% de S e 0,33% de cinzas, para razões de cálculos se usou o mesmo critério colocado anteriormente e desprezado todos os valores com influencia menor que 1% m/m.

Assim:



#### 6.1.5 Produção do cimento

A Figura 17 e Tabela 8 apresentam as entradas e saídas do processo das etapas de produção de cimento.

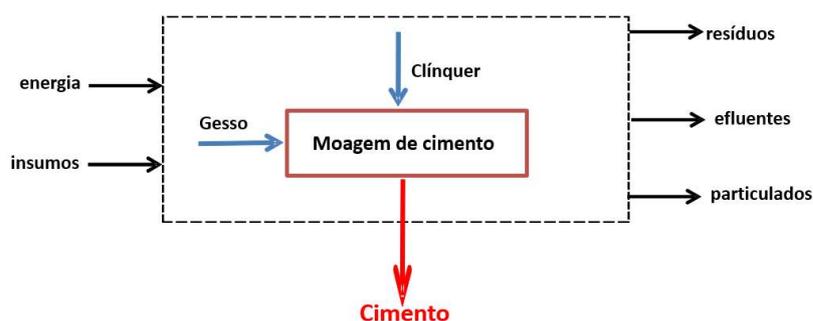


Figura 17 - Etapas de produção do cimento.

Tabela 8 - Inventário da etapa de produção do cimento

| Moagem de cimento        |  |                       |  |
|--------------------------|--|-----------------------|--|
| ENTRADAS                 |  |                       |  |
| <b>Materiais</b>         |  |                       |  |
| Cimento                  |  | 1 t                   |  |
| C clínquer               |  | 0,95 t/t Cimento      |  |
| Gesso                    |  | 0,05 t/t Cimento      |  |
| <b>Energia</b>           |  |                       |  |
| Energia da rede          |  | 42,7779 KWh/t Cimento |  |
|                          |  | 38,89%                |  |
| SAÍDAS                   |  |                       |  |
| <b>Materiais</b>         |  |                       |  |
| Cimento                  |  | 1 t                   |  |
| <b>Emissão para o ar</b> |  |                       |  |
| Particulados             |  | 0,036 t/t Cimento     |  |

## 6.2 Avaliação dos impactos

O método escolhido para a avaliação dos impactos foi o CML, 2001 V2.05 na categoria World, 1990, que é considerado um método "multifase", sendo um dos primeiros métodos de avaliação, desenvolvido e utilizado em vários países. O seu nome está relacionado com a entidade onde foi desenvolvido, o Centro de Gestão Ambiental da Universidade de Leiden, Holanda (Centrum voor Milieukunde Leiden). As principais categorias de impacto do CML 2001 são: Acidificação, Depleção da camada de ozônio, Depleção de recursos abióticos, Ecotoxicidade, Eutrofização, Formação fotoquímica de ozônio troposférico, Mudança Climática, Oxidação fotoquímica, Radiação ionizante, Toxicidade humana, Uso do solo (*Dutch Handbook on LCA* (CML), 2001), nesse contexto foi realizado o estudo apenas nas categorias de relevância para o estudo conforme segue abaixo.

### 6.4.1 Depleção abiótica

A categoria de esgotamento de recursos abióticos inclui os recursos naturais não vivos e é calculada com base nas taxas de extração de minerais e combustíveis

fósseis obtidas no inventário, onde o fator de caracterização é o potencial de depleção abiótica expresso em quilograma (kg) de antimônio equivalente por quilograma de extração (CML, 2003).

Como mostra a Figura 18, nessa categoria, o carvão vegetal apresentou melhores resultados. O que era de se esperar, já que o coque é oriundo de um recurso natural não renovável. Apesar da comparação ser coerente, deve-se observar com cautela os resultados obtidos para o carvão, pois dependendo das diversas qualificações isso pode ser alterado. Assim, em um caso de ponderação o valor agregado a essa categoria de impacto deve ser baixo, pois o processo que possui maior influência é a produção do combustível. Neste caso, o coque tem uma maior influência, elevando a soma do ACV com a utilização do mesmo, mesmo assim diferença entre os dois ciclos representa apenas 9,33%.

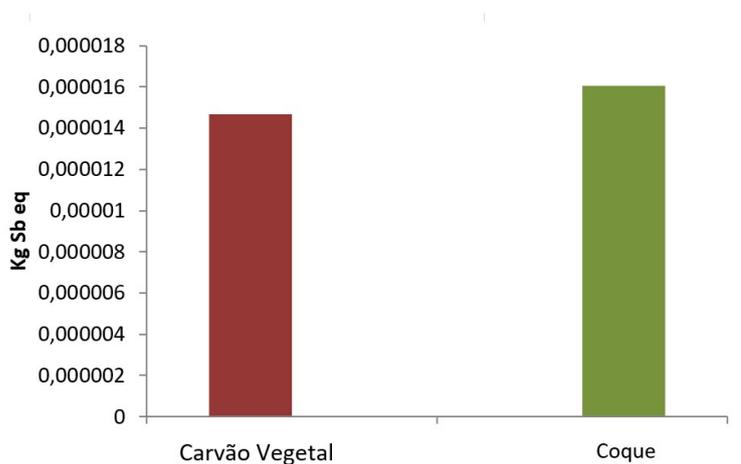


Figura 18 - Resultado de depleção abiótica.

#### 6.4.2 Aquecimento Global

A mudança climática é definida como o impacto das emissões humanas sobre a forçante radioativa da atmosfera, ou seja, a absorção de radiação de calor. A categoria de impacto de alterações climáticas é medida por meio dos resultados das emissões de gases efeito de estufa para a atmosfera, caracterizados os por unidade de dióxido de carbono equivalente (CML, 2003).

No que se refere a essa categoria pode-se observar um melhor desempenho do carvão vegetal (Figura 19), cerca de 440% menos que o coque de petróleo. Este se deve principalmente ao sequestro de carbono proveniente da etapa de cultivo de

floresta para fabricação do carvão vegetal. Fato representado no inventário como input. Os altos valores obtidos para o coque também são justificados pela metodologia de cálculo utilizada pelo software, onde o potencial de aquecimento global é calculado somente pelas saídas. Isso também justifica a questão do processo de maior influência nessa categoria ser a produção do clínquer.

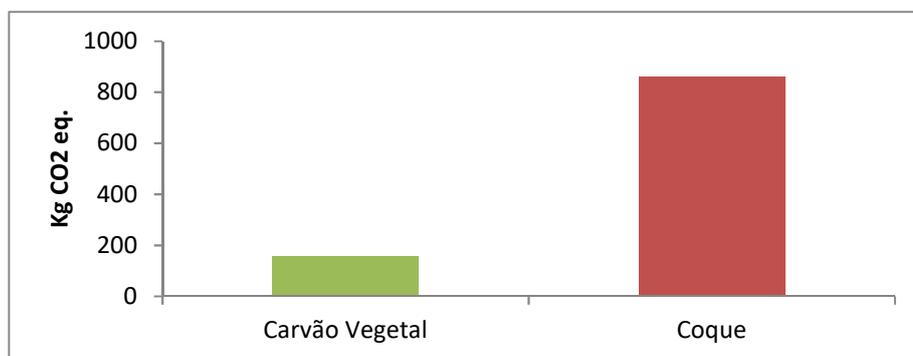


Figura 19 - Resultado de aquecimento global.

#### 6.4.3 Depleção da camada de ozônio

A diminuição da camada de ozônio refere-se ao desgaste da camada de ozônio da estratosfera como resultado das emissões antrópicas. A categoria de impacto é obtida por meio da caracterização do potencial de redução do Ozônio para diferentes gases expressa em unidade de quilogramas de CFC- 11 equivalentes (CML, 2003).

O potencial de diminuição de ozônio estratosférico apresenta valores baixos para o carvão vegetal e para o coque (Figura 20). Os resultados são justificáveis, pois os principais agentes responsáveis pela destruição da camada de ozônio são típicos de produção de solventes industriais, ar condicionado e espumas de embalagens. Como esses agentes são pouco ou nada usados pelos processos estudados, esses valores são previsivelmente baixos. Apesar disso a diferença entre os dois ciclos é de 382% menor para o carvão vegetal.

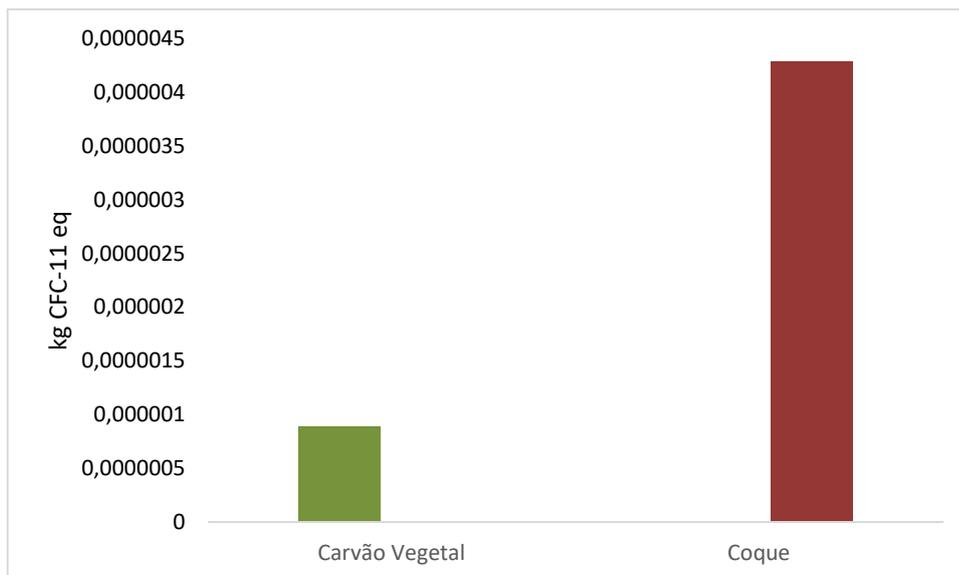


Figura 20 - Resultado de depleção da camada de ozônio.

#### 6.4.4 Acidificação

O potencial de acidificação abrange uma ampla variedade de impactos sobre o solo, as águas subterrâneas, as águas de superfície, os ecossistemas e construções. A categoria de impacto de acidificação é obtida por meio dos resultados do inventário de emissões de substâncias acidificantes para o ar (em kg), no qual os fatores de equivalência são calculados por modelos que descrevem o destino e a deposição de substâncias acidificantes levando em conta a razão entre a deposição e a carga crítica de acidificação (CML, 2003).

Os resultados são expressos em quilogramas de SO<sub>2</sub> equivalentes. Com relação a essa categoria o carvão vegetal ainda leva vantagem é 24% menor que o coque. Os resultados são justificáveis uma vez que ambos os combustíveis apresentam concentrações óxidos de nitrogênio em suas emissões atmosféricas, mas na composição do coque sua porcentagem é mais expressiva, como se observa na Figura 21.

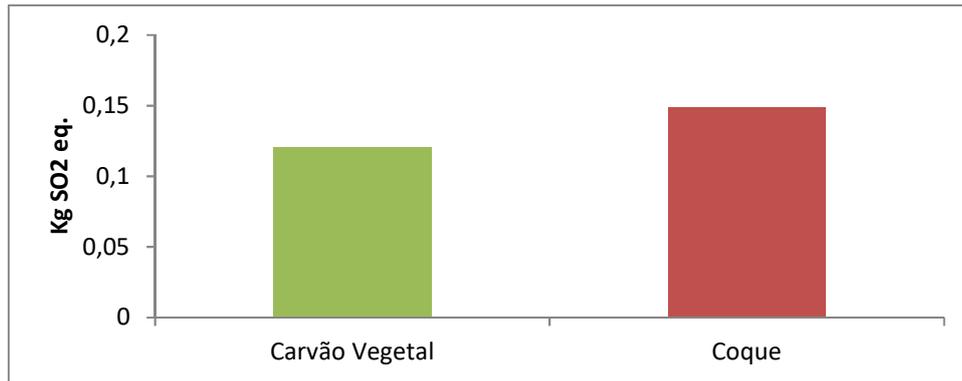


Figura 21 - Resultado de acidificação.

#### 6.4.5 Eutrofização

A eutrofização abrange todos os potenciais impactos ambientais dos elevados níveis de macronutrientes, dos quais os poluentes mais importantes são o nitrogênio (N) e o fósforo (P). Sabe-se que o excesso de nutrientes pode causar uma elevação de espécies indesejáveis e de biomassa tanto em ecossistemas aquáticos quanto terrestres. A obtenção da categoria de impacto de eutrofização é feita por meio dos fatores de equivalência expressos em quilogramas de  $PO_4$  equivalentes (CML, 2003).

Para essa categoria, a diferença entre carvão vegetal e coque é bem acentuada, cerca de 200%, mas o carvão vegetal novamente ainda leva vantagem (Figura 22). Os valores altos para o coque são justificáveis em função da presença de macronutrientes em sua composição, como nitrogênio e fósforo, e em seu processo produtivo. A produção de coque libera cerca de 3 vezes mais  $PO_4$  equivalentes que o processo produtivo do carvão vegetal.

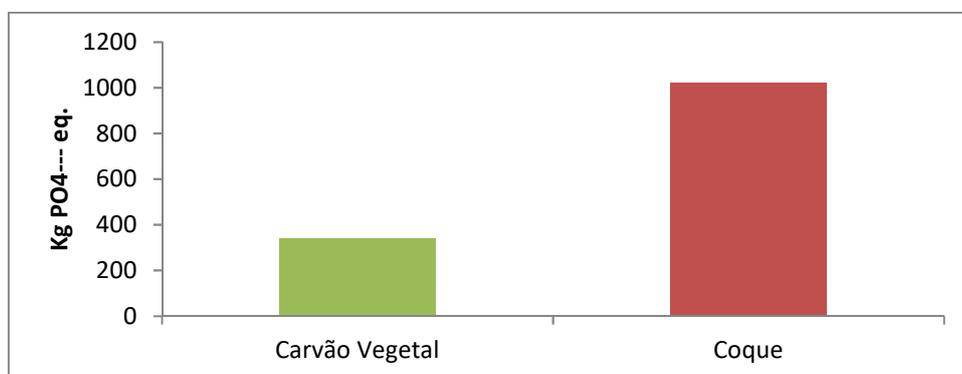


Figura 22 - Resultado de eutrofização.

## 6.5 Sistema de gestão energética

Baseado no inventário realizado para a ACV, a fronteira do sistema é do berço ao portão da fábrica. O modelo de distribuição energética é para uma fábrica padrão descrita pela CEMIG, como mostra a Figura 23.

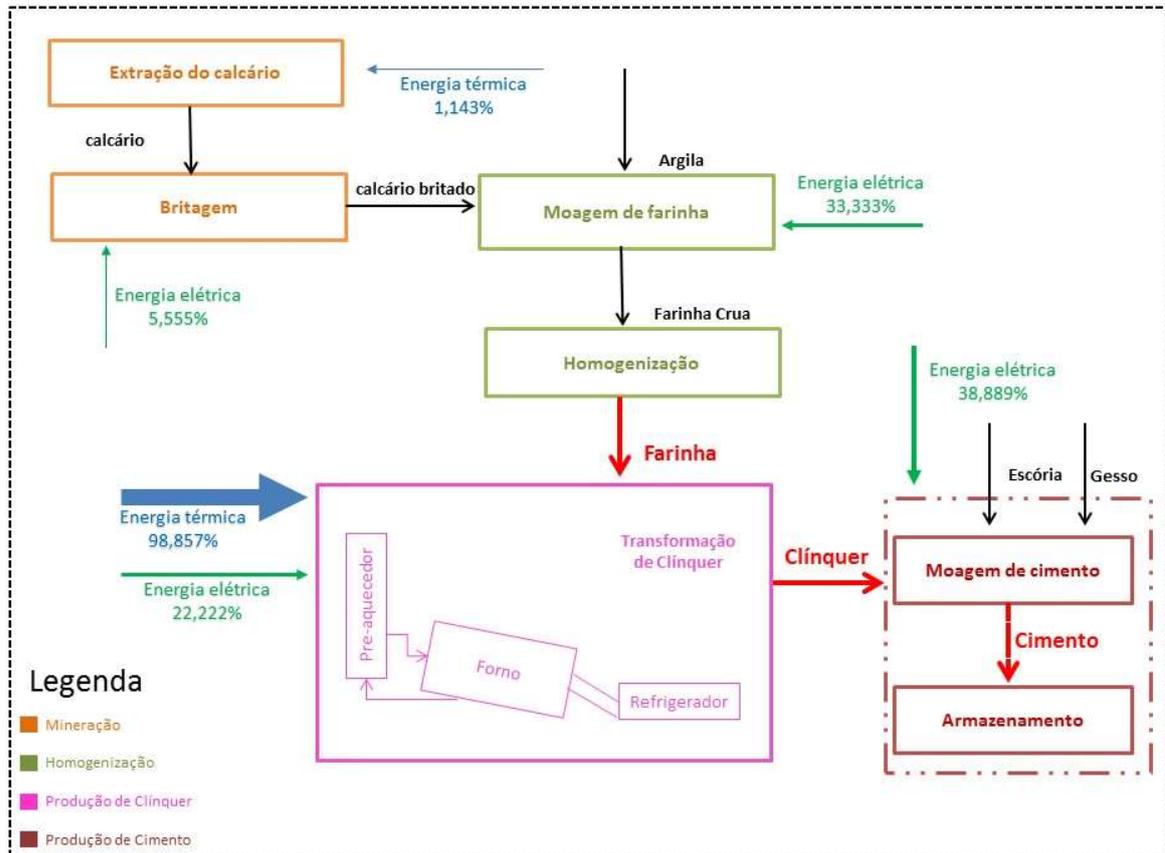


Figura 23 - Fluxograma energético da produção de cimento - Via seca.

(Fonte: adaptado CEMIG, 1991)

A adoção de estudo de caso auxilia na verificação na prática de alguns procedimentos inseridos na norma e seus impactos no consumo de energia.

Foram também utilizados dados secundários relativos a eficiência energética no Brasil e no mundo para retratar a relevância em adotar medidas ambientalmente mais eficientes.

Com base nos indicadores globais anuais de conservação de energia do setor, a política de implantação de um Sistema de Gestão de Energia foi facilitada uma vez que os objetivos e metas energéticas foram estabelecidos buscando uma redução de emissões global para a indústria de transformação de 5% sobre o cenário tendência

(Business As Usual) de emissões em 2020 (Brasil, 2016b)

A partir do determinado critérios foram traçadas as linhas de base energética baseadas na melhoria da eficiência dos processos que mais são consumidores de energia. As principais linhas de base do setor devem ser baseadas na utilização de energia térmica do forno pois é fácil analisar na figura acima que o consumo de 98% da energia utilizada em todo o processo de produção do cimento ocorre nesta etapa.

O indicador de desempenho energético mais importante para o setor diante de tudo que já foi visto até agora é a redução do consumo de combustíveis não renováveis em seus processos, para isso colocar no plano de ação a utilização de combustíveis alternativos é de extrema importância e necessidade. Outro indicador que deve ser incluído para o caso do setor industrial como um todo é a automatização dos sistemas de controle, que propicia reais benefícios mediante constantes perturbações dos processos maximizando, por exemplo, as taxas de queima de combustíveis derivados de resíduos dentro dos limites legais fixados.

#### 6.5.1 Especificações do sistema produtivo do cimento

Uma descrição geral do consumo específico de energia térmica para o processo produtivo por via seca (FIGURA GASTO ENERGÉTICO) com sistemas de pré-aquecimento e pré-calcinação de matérias-primas varia entre 3050 MJ a 3600 MJ por tonelada de clínquer produzido. A formação do clínquer a partir da farinha crua exige uma quantidade teórica de energia equivalente a 1760 KJ/Kg de clínquer produzido. O restante refere-se à energia contida nos gases de exaustão do forno e no clínquer, às perdas por radiação e convecção no pré-aquecedor, pré-calcinador e resfriador de clínquer, à umidade residual da farinha, e ao excesso de ar combustão. O consumo específico médio de energia elétrica varia entre 82 kWh e 156 kWh por tonelada de cimento produzido na planta industrial (Santi, 1997).

#### 6.5.2 Plano de ação para melhoria a gestão da energia no sistema produtivo de cimento

A política energética do setor deve ser “reduzir o índice de consumo anual de energia elétrica e térmica por tonelada de cimento produzido, aumentar a eficiência

energética dos sistemas das instalações, usar de fontes renováveis de energia e promover a mudança de hábitos de consumo de energia baseado nos compromettimentos legais, educacionais e de incentivos a práticas de uso racional de energia, visando assim contribuir com a sustentabilidade do setor”.

Baseando-se na *The European Cement Association* (CEMBUREAU), organização representativa da indústria cimenteira europeia, que por meio de relatórios definiu diretrizes para a indústria do cimento desenvolver sua produção com redução nas emissões de carbono (The European Cement Association, 2013). Na Figura 24, pode-se ver que além das propostas para desenvolvimento no processo de manufatura, também teve enfoque na etapa de utilização do cimento na construção civil. Essa pode ser colocada como ponto de partida para estudar os projetos mais factíveis ambientalmente e economicamente para as empresas do setor que desejam investir no SGE.

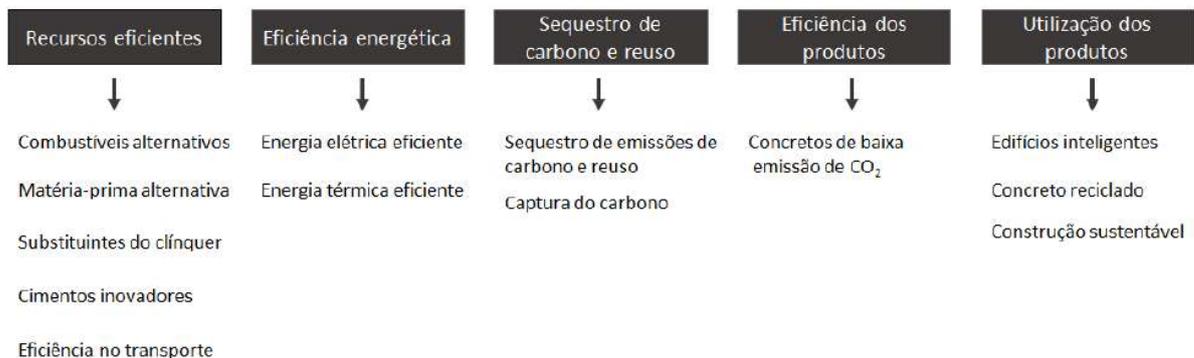


Figura 24 - Rotas de sustentabilidade para a indústria cimenteira proposta pela The European Cement Association.

(Fonte: The European Cement Association, 2013)

### 6.5.3 Exemplo de ações nortearam o SGE no setor cimenteiro

Como esse trabalho apenas se propôs a realizar o planejamento, definir e especificar como essas mudanças podem ocorrer facilita o início da implementação do SGE, por parte de empresas que se interessem pela certificação. Sendo assim abaixo serão relacionadas ações que já estão sendo realizadas por indústrias com fornos de alto desempenho para alcançar melhor desempenho ambiental, produtivo e

econômico através das mudanças em instalação e diversificação da matriz energética com combustíveis alternativos.

- Eficiência das instalações

Modificações simples nas plantas industriais visando maior eficiência energética podem reduzir o consumo de energia para produção de cimento, para isso a Votorantins vem investindo nos últimos anos em novas tecnologias no processos de pré-calцинаção, pois estas tecnologias possibilitam aumento do uso de resíduos substituintes dos combustíveis fósseis e maior eficiência quanto ao consumo de energia elétrica durante a produção.

A *The European Cement Association*, encontrou entre as dificuldades observadas para modificações na planta industrial, que já existem tecnologias disponíveis para o sequestro de carbono e separadores de poeira, se aplicadas em grande escala, elevariam o consumo de energia elétrica na indústria, mas por outro lado reduziriam os impactos gerados pelo processo, trazendo para a carga ambientais pontos positivos.

Sendo assim é notada a dualidade quando necessária a adoção de soluções diferenciadas, em relação, não só ao custo-benefício, mas às vantagens de desempenho, consumo de recursos e geração de impactos. A gestão ambiental oferece ferramentas para aplicar análises para estes casos de estudo em que há necessidade de um conhecimento aprofundado do sistema para a tomada de decisões. Então o Sistema de Gestão energética (ISO 50001 – desempenho energético), sistema de gestão de qualidade (ISO 9001 – produto) e o sistema de gestão ambiental (ISO 14001 – meio ambiente) devem estar sempre alinhados pois juntos promovem uma qualificação completa ao sistema produtivo.

- Combustíveis alternativos

Em relação a combustíveis fósseis, em 2012, 6,3% do consumo foi obtido de combustíveis alternativos de baixo carbono, como exemplo pneus e resíduos sólidos.

Em relação ao uso de recursos alternativos na indústria cimenteira, a Confederação Nacional da Indústria et al. (2012), afirmam que “[...] o cimento e seu processo de produção tem contribuído para a solução de vários problemas ambientais, ao incluir em seu processo produtivo o aproveitamento de inúmeros resíduos industriais como matéria-prima ou combustível [...]”. Isto se deve ao fato de processos de incineração de alguns resíduos nos fornos das indústrias gerarem materiais que podem ser reutilizados na fabricação do cimento.

As indústrias europeias também fazem uso de materiais alternativos às matérias-primas, oriundas de diferentes fontes, tais como resíduos e subprodutos como cinzas e escória granulada de alto-forno. Pela norma aplicada para UE, a EN-197, já existem designações quanto a substituições de clínquer Portland por adições minerais, porém é recomendada a análise de ciclo de vida para avaliar, além das propriedades adquiridas, a quantificação da potencial redução dos impactos ambientais gerados no processo (The European Cement Association, 2013).

Devido às altas temperaturas de queimas nos fornos das indústrias de cimento, a instalação de plantas com coprocessamento torna-se estratégico para a empresa. O coprocessamento se baseia na recuperação da energia disponível nos resíduos, substituindo parte daquela fornecida pelos combustíveis tradicionais ou na substituição de matérias-primas por resíduos com características químicas semelhantes às aquelas normalmente empregadas na produção do clínquer (Maringolo, 2001).

Desta forma, alia-se a necessidade de reduzir o consumo de recursos não-renováveis nas indústrias e do aproveitamento do espaço para incineração de resíduos. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2012, p. 1), “das 51 plantas [industriais de cimento] instaladas para a produção do clínquer Portland, 36 estão licenciadas para o [coprocessamento] de resíduos.”. O licenciamento das plantas industriais brasileiras deve seguir o regulamento estabelecido pela resolução

da CONAMA n. 264 em vigor desde 1999.

Para Mantegazza (2004), as adaptações dos fornos rotativos da indústria de cimento fornecem condições adequadas para a utilização de coprocessamento de produtos. Por isso, em diversas indústrias brasileiras já está sendo usado o coprocessamento para reaproveitamento de resíduos. Confederação Nacional da Indústria et al. (2012) apresentam exemplos de indústrias que já trabalham com o coprocessamento no Brasil, caso da Votorantim Cimento, Lafarge e Holcim.

A literatura permite uma gama de resíduos que podem ser coprocessados, são exemplos:

1. Óleo usado, incluindo lubrificante, resíduos oleosos (trapos, lascas de madeira, serragem, vegetação impregnada com óleo e água, ar, toalha de papel com óleo etc.), borra de óleo, óleo em emulsão, óleo sujo, graxa, resíduos de graxa utilizada, etc;
2. Solvente de fabricação de tintas;
3. Compostos de resíduos sólidos de metal não-tóxico;
4. Escória de alumínio fundido, ferro, aço e zinco;
5. Resíduos de minerais não-metálicos;
6. Resíduos de papel, papelão, plástico e materiais têxteis polimerizados;
7. Lodo de esgoto;
8. Resíduos da lavagem ácida de benzeno, proveniente da destilação do alcatrão de carvão de coque;
9. Resíduos da incineração ou tratamento térmico do solo contaminado;
10. Resíduos de destilação da produção de nitrobenzeno;
11. Solventes: emulsão asfáltica (em solvente), asfalto, solvente de tinta, solventes, solventes sujeira, solventes com água, borrões (líquidos) de percloroetileno, misturar resina com solvente, trietilenoglicol.

Diante do que foi exposto, são variadas as alternativas para aplicações de soluções que promovam um sistema produtivo sustentável nas indústrias cimenteiras. No entanto, para selecionar as modificações que consigam atender às necessidades de desempenho, custos e controle/redução dos impactos ambientais do sistema produtivo, é necessário um sistema integrado de gestão. A implementação de um

sistema de gestão ambiental integrado ao processo produtivo surge como uma ferramenta que fornece diretrizes e técnicas para o desenvolvimento sustentável das indústrias brasileiras.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações e recomendações que podem ser atingidas com o trabalho realizado. Por fim, são apresentadas as limitações e sugestões para trabalhos futuros.

A partir dos dados obtidos nos inventários e dos resultados da avaliação de ciclo de vida, pode-se observar que a utilização de carvão vegetal como combustível é visivelmente melhor em quase todas as categorias de impacto. Os altos valores da avaliação de impacto do coque são justificáveis, uma vez que a própria matéria prima, o petróleo, contém substâncias tóxicas e potencialmente poluidoras por natureza. Além disso, a própria característica de não renovabilidade do recurso já é considerada um impacto por si só. Isso se justifica ainda com mais validade quando se nota nos resultados do inventário por processos que em todas as categorias o processo de maior influência é o combustível em si.

Os resultados do trabalho indicam além da possibilidade de adoção de sistema de produção sustentável para a indústria cimenteira, a existência de benefícios ambientalmente significativos quando se trata do uso do carvão vegetal como combustível. Conclusões relevantes para a indústria cimenteira, sobretudo, no que diz respeito à viabilidade de expansão da produção e da manutenção da sua relevância econômica mundial, desta vez calcadas em processos produtivos ambientalmente corretos, em conformidade com os princípios da sustentabilidade.

Nas cinco categorias de impacto analisadas, o carvão vegetal se mostrou ambientalmente mais benéfico quando comparado ao coque de petróleo. O que pode ser explicado pelo fato do carvão vegetal representar uma fonte renovável de energia, que ao longo do seu ciclo de vida realiza inclusive o sequestro carbono (etapa de cultivo da planta), como já citado representou mais 400% de redução em relação a categoria de impacto de Aquecimento Global, 380% na categoria de depleção na camada de ozônio e 200% na eutrofização. Sendo assim baseado apenas nesses números gerais é notória a importância do estudo para que as empresas do setor cimenteiro se preocupe e se motive a fazer a substituição, mesmo que parcial, do combustível hoje utilizado em larga escala.

Embora os resultados do estudo tenham sido satisfatórios, ressalta-se a necessidade de realização de estudos complementares, mais abrangentes que contemplem questões sociais e econômicas que não são levadas em conta na ACV. A utilização do modelo “caixa preta” para a avaliação de dados, no qual as diferentes atividades são agregadas em um único processo, dificultou a discussão sobre os resultados e conseqüentemente a análise mais profunda de alternativas para mitigação dos impactos existentes. Neste sentido, sugere-se estudos que considerem o ciclo de vida também das matérias-primas iniciais e que trabalhem com as atividades de forma desagregada. O que permitirá avaliar os principais focos de poluição tanto na etapa de obtenção dos combustíveis quanto na utilização práticas nos pré-aquecedores, fornos e refrigeradores.

Em relação a norma ABNT ISO 50001 evidenciando com o apoio bibliográfico a motivação, histórico no Brasil e no mundo bem como seus principais benefícios e a arquitetura dos requisitos principais, se percebe a necessidade da gestão sistemática da energia no contexto atual e a importância da normatização, e como consequência, a proposta de construção de uma norma internacional que atende todos os tipos e tamanhos de organizações. A normalização, no entanto, não produz efeitos por si, mas permite a ordenação e a operacionalidade das ações. Evitando se perder em formalidades e exigências desnecessárias impostas por um documento, a norma procura oferecer uma metodologia útil que, utilizando o ciclo recorrente do PDCA, permite a melhoria contínua do desempenho energético e a retenção dos ganhos.

Pode-se concluir a partir da literatura que apesar de alguns autores como (Pham,2015) afirmarem que a expectativa de alta melhoria do desempenho financeiro em função da adoção da ISO 50001 ser insignificante, outros autores defendem que a implantação de um SGE proporciona ganhos econômicos para as organizações, aumentando o lucro e melhorando a competitividade (Pinto, 2014), como mostrado neste trabalho.

No intuito de verificar o processo de implantação da norma, foi adotado o estudo de geral para o setor a partir de uma generalização de etapas e uma

sistematização de ações que podem ser implementadas de forma geral em unidades fabris de cimento. Para esse fim, foram coletadas do manual de SGE as evidências do sistema de gestão de energia implantados por outras indústrias que utilizam fornos de alto gasto energético, além de apresentar medidas que podem ser desempenhadas alinhadas ao Índices de Desempenho Energético (IDEs) justificados na primeira parte dos resultados.

Frente ao cenário industrial atual, com produção crescente e elevado consumo de recursos naturais, a eficiência no sistema produtivo é essencial para tornar a indústria de cimento mais sustentável. Os insumos utilizados e os impactos gerados pelo processo de fabricação do cimento são de grande importância para muitas organizações internacionais, em que já existem diversos relatórios e guias fornecendo diretrizes para a implementação de uma gestão com enfoque ambiental, além do econômico e social.

Em vista da disponibilidade de recursos naturais, fontes de energias renováveis e espaço disponível, o Brasil é um local estratégico em desenvolvimento e já vem expandindo o número de plantas industriais de cimenteiras nos últimos anos. Mesmo assim, a eficiência energética e o desenvolvimento sustentável na indústria são essenciais para garantir o crescimento equilibrado da economia e infraestrutura do País.

Por este motivo, estudos como este visam uma melhor compreensão da realidade da indústria de cimento do Brasil, contribuindo para a melhoria na sustentabilidade da indústria cimenteira nacional, para que os objetivos estabelecidos nos acordos internacionais e nacionais sejam cumpridos.

## 7.1 Limitações e oportunidades de pesquisa

As principais limitações desta pesquisa são:

- Pesquisa de dados: (i) coleta de dados primários em parceria com empresas do setor para a aplicação do questionário in loco pode influenciar ou inibir o respondente, pois os processos e os estudos para novas tecnologias são sigilosos ou ainda estão em fase de teste e não podem ser divulgados; (ii) Dados gerais mais atualizados, pois a maior parte dos dados disponibilizados já possuem 7 a 10 anos de divulgação.
- Estudo de caso: (i) os resultados produzidos pelos casos estudados não podem ser generalizados para o universo do setor cimenteiro pois as empresas possuem tecnologias e capacidade de produção diferentes e assim algumas etapas mudam. (ii) o estudo da gestão energética não pode ser mais explorado por utilizar de dados secundários e não possuir uma fábrica como modelo e assim ter dados primários para definições mais específicas. Esta restrição é devido a que a pesquisa aborda assunto estratégico e sigiloso às empresas.

## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Dados os poucos trabalhos sobre o tema pesquisado na indústria de cimento com o viés energético, abrem-se muitos campos para investigação em profundidade de assuntos aqui abordados.

Como proposta de continuidade e desdobramento desta pesquisa, sugere-se:

- Aplicar esse estudo em outros setores que fazem parte do Plano Setorial de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação (Plano Indústria), composto por Alumínio, Cal, Cimento, Ferro-gusa e Aço, Papel e Celulose, Química, Vidro, para identificação de diferenças e semelhanças;
- Explorar a metodologia e proposições desta dissertação baseada em

dados primários para que seja determinado um cenário de referência mais próximo da realidade das unidades fabris;

- Elaboração de um modelo de referência para orientar a estruturação do sistema de gestão energética baseada em formulários gerais para facilitar a implementação do sistema por parte do setor cimenteiro em sua totalidade e não só a unidade fabril, mas compondo escritórios, refeitórios, armazéns e outras partes que fazem parte das unidades cimenteiras;

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR ISO 14040 Gestão Ambiental :Avaliação do Ciclo de Vida-Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro. 2001.
- ABNT. **NBR ISO 50001. (2011) – Sistemas de Gestão da Energia – Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011.
- Boesch, M. E.; Hellweg, S. **Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment**. Environmental Science & Technology. Washington. 2010.
- Brasil. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI. **Subsídios a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono. Caderno 3 – Nota técnica Cimento**. 2012a.
- Brasil. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional 2013: ano 2012**. Brasília, 2013.
- Brasil. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Sumário Executivo**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016a.
- Brasil. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume II**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016b.
- Bribián, A. Capilla, A. Usón. **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential**. Building and Environment 46. 2011.
- Brito, J. O., Cintra, T. C. **Madeira para energia no Brasil: realidade, visão**

- estratégica e demandas de ações.** Biomassa & Energia, Viçosa, 2004.
- Caldeira-Pires, A., Souza-Paula, M. C., Villas Boas, R. C. **Avaliação de ciclo de vida. A ISO 14040 na América Latina.** Brasília. ABIPTI. 2005.
- CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **I Encontro Setorial de Conservação de Energia - Setor Cimento/ Clientes de Transmissão. Relatório técnico.** Belo Horizonte: CEMIG, Departamento Comercial Operacional de Consumidores de Transmissão. 1991.
- CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte, 1980.
- CHEHEBE, J.R.B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos.** Qualitymark Ed. Rio de Janeiro. 1997.
- Choi, J.-K., Friley, P., e Alfstad, T. **Implications of energy policy on a product system's dynamic life-cycle environmental impact: Survey and model.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012.
- CML - Centrum voor Milieukunde Leiden. **"Scientific Background"**. 2003.
- CML - Centrum voor Milieukunde Leiden. **Guia "Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards"**. 2001.
- CML - Centrum voor Milieukunde Leiden. **Operational Annex.** 2003.
- Enciclo. **Entenda o que é a Análise do Ciclo de Vida (ACV).** 2016.
- Engin, V. Ari. **Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study.** Energy Conversion and Management 46. 2005.
- Ferreira, C. S. e Santana, L. **A auditoria ambiental como instrumento de gerenciamento para o desempenho sustentável.** Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas departamento de Ciências Contábeis. 2003.
- Ferreira, C. S. e Santana, L. **A auditoria ambiental como instrumento de gerenciamento para o desempenho sustentável.** Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas departamento de Ciências Contábeis, 2003.
- García, C. Pizarro, A. Álvarez, A. Lavín, J. Bueno. **Study of biomass combustion**

**wastes**. Fuel 148. 2015.

Haes, Helias A. Udo de. **Industrial Ecology and life cycle assessment**. In: Ayres, Robert U. e Ayres, Leslie W. A handbook of industrial ecology. Edward Elgar Publishing, Inc. Massachussets, USA. 2002.

Hémery, D., Debeir, J. C. e Deléage, J. P.. **Uma História da Energia**. Tradução de Sérgio Salvo Brito. Brasília: Editora Universidade de Brasília. 1993.

Herculano, S. C.. **Do desenvolvimento (in)suportável à Sociedade Feliz. Ecologia, Ciência e Política**. Rio de Janeiro. 1992.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Principais destaques da evolução do mercado de trabalho nas regiões metropolitanas abrangidas pela pesquisa (Recife, Salvador, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo e Porto Alegre)**. Indicadores IBGE 2003-2011. Rio de Janeiro. 2012.

IEA – International Energy Agency. **World energy outlook, executive summary**. 2009.

IPCC - Intergovernmental panel climatic changes. Fourth Assessment Report. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers**. 2007.

IPPC - Integrated Pollution Prevention and Control. **Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries**. European Commission. 2011.

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014

MAURY, M. B. C. **Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal**. Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília. Brasília. 2008.

Moretti, L. et al. **Comparative “from Cradle to Gate” Life Cycle Assessment of Hot Mix Asphalt (HMA) Materials**. Sustainability. 2017.

- Pinto, Álvaro Braga Alves. **A gestão da energia com a norma ISO 50001**. Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Energia. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. 2014.
- Ribeiro, F. S., Oliveira, S., Reis, M. M. et al. **Processo de trabalho e riscos para a saúde dos trabalhadores em uma indústria de cimento**. Cad. Saúde Pública. Rio de Janeiro. 2002.
- Santi, A. M. M. **Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer: investigação no maior pólo produtor de cimento do País, região metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais, e propostas para a segurança química**. Tese Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2003.
- Santi, A. M. M.. **Incineração de Resíduos Industriais**. Monografia. Campinas: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1995.
- Santi, A. M. M.. **Indústria de Cimento - Alternativas aos combustíveis fósseis: aspectos históricos, fatos recentes**. Monografia. Campinas: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1996.
- Santi, A. M. M.. **Meio Ambiente e Desenvolvimento: O Pacto Planetário de 92 garantirá “Nosso Futuro Comum”**. Monografia. Campinas: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1995.
- Santi, A. M. M.. **Roteiro para pesquisa sobre o consumo de combustíveis em indústrias cimenteiras sob os aspectos energético e ambiental**. Coletânea de dados. Campinas: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1997.
- Santos, A. R.. Universidade Federal de Itajubá, instituto de engenharia mecânica. **A Geração de Coque de Petróleo Devido ao Processamento de Petróleos Pesados e o Seu Uso na Produção de Clínquer de Cimento Portland**. Minas Gerais, 2007.
- SCBD - Secretariat of the convention on biological diversity. Interlink age between biological diversity and climate change. **Advice on the integration of biodiversity considerations into the implementation of the United Nations Framework Convention on Climate Change and its Kyoto Protocol**. UNEP.

- CBD. Montreal, Quebec, Canadá. 2003.
- Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio. **Sustainable cement production—present and future**. Cement and Concrete Research 41. 2011.
- SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa). **Análise das emissões de GEE Brasil e suas implicações para as políticas públicas e a contribuição para o acordo de Paris**. Brasil. 2016.
- Sevá Filho, A. O.. **Dinâmica da Produção e da Degradação nos Sítios Cimenteiros - Casos Críticos em Várias Cidades e Regiões Brasileiras**. Campinas: UNICAMP, Instituto de Geociências, 1986.
- Silva, A. G. **Panorama da Avaliação do Ciclo de Vida**. Anais do Seminário Impacto da Avaliação do Ciclo de Vida na Competitividade da Indústria Brasileira. São Paulo. 2005.
- SNIC - Sindicato Nacional da Indústria Cimenteira. **Relatório anual 2012 da indústria cimenteira**. 2012
- SNIC - Sindicato Nacional da Indústria Cimenteira. **Revista SINIC, SINIC 50 anos**. 2006.
- SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do cimento. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2013.
- SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do cimento. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2012.
- Souza, Lidiane P.. **Avaliação do ciclo de vida do sistema veículo/combustível no Brasil**. Universidade federal de Itajubá. Instituto de engenharia de energia. 2015.
- Valderrama, C.; Granador, R.; Cortina, J. L.; Gasol, C. M.; Guillem, M.; Josa, A. **Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study**. Journal of Cleaner Production. Philadelphia. 2012.
- Valderrama, R. Granados, J. L. Cortina, C. M. Gasol, M. Guillem, A. Josa. **Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study**. Journal of Cleaner Production. 2012.
- WBCSD – World business council for sustainable development. **Climate Change**.

2002.

WBCSD – World business council for sustainable development. **The cement sustainability initiative, our agenda for action.** 2002.

WBCSD – World business council for sustainable development. **Toward a sustainable cement industry. Substudy 8: climate change.** By Ken Humphreys and Maha Mahasenan. 2002.

Wigon, B.W. et al. **Life cycle assessment: inventory guidelines and principles.** Lewis Publishers. Florida. 1994

World Business Council For Sustainable Development. **Cement industry energy and CO2 performance: “getting the numbers right”.** Geneva. 2009.

Prado Filho, Hayrton R.. **Norma ISO 50001: em discussão para ser uma NBR para sistemas de gestão de energia.** 2016.

Pereira, Avelino. **ISO 50001- Sistemas de Gestão de Energia- Requisitos com orientações para uso.** FDIS. 2016.

UL UNIVERSATY. **ISO 50001 Energy Management System (EnMS) Standard – Practitioners Guide to Implementation.** 2016.

Guinée, J. **Development of a Methodology for the Environmental Life-Cycle Assessment of Products (with a case study on margarines).** Ph.D. thesis. Leiden University, Leiden, 1995.

Guinée, J. B., Gorrée, M.; Heijuns, R., et al.. **Handbook on Life Cycle Assessment. Operacional Guide to the ISO Standards.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

Guinée, J et al. **LCA - An operational guide to the ISO-standards - Part 1: LCA in perspective,** 2001.