

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Agenara Quattrin Guerreiro**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS CIMENTOS DE  
PRODUÇÃO MAIS SIGNIFICATIVA NO BRASIL**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**AGENARA QUATRIN GUERREIRO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS CIMENTOS DE  
PRODUÇÃO MAIS SIGNIFICATIVA NO BRASIL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Ana Paula Kirchheim**  
**Orientadora: Ana Carolina Badalotti Passuello**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**AGENARA QUATRIN GUERREIRO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS CIMENTOS DE  
PRODUÇÃO MAIS SIGNIFICATIVA NO BRASIL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelas Professoras Orientadoras e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2014.

Profa. Ana Paula Kirchheim  
Dra. pelo PPGEC/UFRGS  
Orientadora

Ana Carolina Badalotti Passuello  
Dra. pela Universidade Rovira i Virgili  
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa Ana Paula Kirchheim (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Ana Carolina Badalotti Passuello**  
Dra. pela Universidade Rovira i Virgili

**Prof. Rafael Batista Zortea (IFSUL)**  
Mestre pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Erich David Rodriguez Martinez**  
Dr. pela Universidad Del Valle

Às professoras Ana Paula Kirchheim, Ana Passuello e  
Carin Schmitt pelo apoio, convívio e compreensão durante  
o desenvolvimento deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim, principalmente aos meus pais, Agenor e Noeli, pelo amor incondicional, ao apoio que sempre pude contar e aos conselhos que eu precisava ouvir, sem mesmo antes de entender o porquê. E ao meu irmão, Maurício, que sempre me deu suporte quando precisei.

À professora orientadora Ana Paula Kirchheim que me orientou em pesquisas por mais de três anos, mostrando sempre acreditar em mim e no meu trabalho. À professora orientadora Ana Passuello pelo apoio constante durante a orientação do meu trabalho de conclusão.

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Universidade do Minho, que foram muito importantes na minha vida acadêmica. Em especial a professora Carin Schmitt que teve grande participação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao apoio e aos conselhos dos colegas e funcionários que conheci durante pesquisas realizadas no núcleo de pesquisa Norie, inclusive com participação do laboratório Lacer. Em especial Antonio Takimi, Marlon Longhi, Eugênio Bastos, Thiago Nobre, Nathalia Petry, Gilmar, Airton e Alexandre Oliveira.

Aos colegas de curso, pelo incentivo e pelo apoio constantes. Em especial a todos os colegas que entraram no semestre 2008/2 e que partilharam, praticamente, o mesmo caminho durante o decorrer do curso, Larissa, Guta, Juliana, Tamires, Anderson, Eduardo, Francisco, Zugno, Fábio Scharnberg, Fábio Oliveira e Rambo.

Aos amigos pela confiança, parceria, amizade e paciência dentro destes vários anos de graduação na Engenharia. Muriel, Luiza, Bruna, Vini, Ana Luiza, Maria Izabel, Larice, Evelyn, Thomaz Gaio e Agatha.

Aos colegas de trabalho que foram sempre compreensivos, pacientes e, principalmente, por me apoiarem no período de desenvolvimento deste trabalho. Em especial Lucas Paz, Pedro Granzotto e Alex Dias.

The day you stop racing, is the day you win the race.

*Bob Marley*

## RESUMO

O mercado de materiais de construção civil tem se desenvolvido nos últimos anos de forma a atender as demandas de países de economias emergentes. A indústria cimenteira teve destaque nesse momento pelo aumento mundial na produção e consumo de cimento Portland. Ao mesmo tempo que este setor impulsiona a economia, os impactos ambientais gerados no processo industrial ganharam grande destaque na última década. Organizações internacionais como a *World Business Council for Sustainable Development* incentivam o desenvolvimento sustentável das indústrias de cimento, através de diretrizes e metas difundidas entre as indústrias associadas, tal como a *Cement Sustainability Initiative*. Sabe-se, também, que a indústria brasileira de cimento Portland é reconhecida internacionalmente na produção de cimentos mais ambientalmente amigáveis, característica adquirida pela alta eficiência energética em sua planta industrial e pelos elevados teores de adições minerais incorporados ao processo produtivo. Além disso, relatórios publicados anualmente pelas organizações das indústrias nacionais auxiliam no acompanhamento da evolução do desenvolvimento sustentável no setor cimenteiro. Entretanto, ainda se observam limitações quanto aos dados e quantitativos relacionados aos impactos ambientais gerados pelo sistema produtivo da indústria cimenteira nacional. Portanto, têm-se como objetivo principal deste estudo avaliar os impactos ambientais do ciclo de vida do sistema produtivo do cimento Portland no Brasil. Desta forma, utilizou-se do processo de fabricação do cimento Portland tipo CP II, CP III e CP IV para a avaliação do ciclo de vida, devido à participação no mercado nacional mais significativa em relação aos demais tipos de cimento Portland produzidos. Propõe-se a aplicação da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), tal como descrito na norma NBR ISO 14044 (2009), para avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida do cimento. Para isso, foi necessário adaptar o banco de dados utilizado na ferramenta de ACV a partir de um inventário baseado nas características da indústria cimenteira nacional. Desta maneira, os impactos ambientais potenciais quantificados dos cimentos avaliados são gerados pelo elevado consumo de coque de petróleo presente na matriz energética da indústria nacional e pela produção de clínquer Portland.

Palavras-chave: Cimento Portland. Indústria do Cimento. Análise de Ciclo de Vida.  
Processo de Fabricação do Cimento Portland.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa .....	19
Figura 2 – Fábricas de cimento no Brasil .....	22
Figura 3 – Percentual de crescimento da produção de cimento e das emissões de CO <sub>2</sub> no período de 2000 a 2006, em relação ao cenário de 1990 .....	25
Figura 4 – Cinco rotas para redução das emissões de carbono até 2050 .....	26
Figura 5 – Planta industrial de uma indústria de cimento .....	34
Figura 6 – Esquema do trecho de pré-calcinador, forno rotativo e resfriamento de uma planta industrial de cimento .....	35
Figura 7 – Reações químicas geradas no forno rotativa para produção de cimento .....	36
Figura 8 – Composição química dos principais materiais cimentícios .....	37
Figura 9 – Forno com co-processamento acoplado na indústria de cimento Itambé, Brasil .....	42
Figura 10 – Equipamento para piroprocessamento .....	43
Figura 11 – Transportador de correia na Heidelberg Cement Group, Indonésia .....	43
Figura 12 – Etapa de moagem de cimento da Holcim Hermosillo .....	44
Figura 13 – Estrutura do comitê técnico ISO/TC-207 .....	45
Figura 14 – Estrutura das fases de uma ACV .....	48
Figura 15 – Sistema de produto do ACV atribucional e consequential de um estudo aplicado na utilização de biodiesel .....	51
Figura 16 – Procedimentos para análise de inventário do ciclo de vida .....	52
Figura 17 – Sistema de produto “do berço ao portão” de fabricação do cimento Portland .....	59
Figura 18 – Relação clínquer/cimento das indústrias cimenteiras participantes do estudo “ <i>Getting the numbers right</i> ” (em %) .....	63
Figura 19 – Sistema de produto do processo de fabricação de cimento Portland no software <i>OpenLCA</i> .....	64
Figura 20 – Interface do software <i>OpenLCA</i> para dados de entrada e saída dos processos do sistema de produto da ACV .....	65
Figura 21 – Interface de visualização de resultados das contribuições dos processos na avaliação dos impactos ambientais da ACV .....	66
Figura 22 – Relação entre cimentos da indústria brasileira pelos impactos ambientais resultantes .....	69
Figura 23 – Relação clínquer/cimento dos tipos de cimento avaliados na ACV .....	69
Figura 24 – Comparação dos impactos gerados de mudança climática dos cimentos da indústria brasileira e europeia (kg CO <sub>2</sub> –eq/tonelada de cimento) .....	71



Figura 25 – Comparação dos impactos gerados de acidificação dos cimentos da indústria brasileira e europeia (kg SO <sub>2</sub> –eq/tonelada de cimento) .....	71
Figura 26 – Comparação dos impactos gerados de eutrofização dos cimentos da indústria brasileira e europeia (kg PO <sub>4</sub> –eq/tonelada de cimento) .....	72
Figura 27 – Comparativo do impacto de mudança climática entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu .....	73
Figura 28 – Comparativo do impacto da depleção da camada de ozônio entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu .....	74
Figura 29 – Comparativo do impacto de oxidação fotoquímica entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu .....	74
Figura 30 – Comparativo do impacto da acidificação entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu .....	75
Figura 31 – Comparativo do impacto da eutrofização entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu .....	76
Figura 32 – Comparativo do impacto da depleção de recursos não renováveis entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu .....	76
Figura 33 – Comparativo do impacto da demanda de energia acumulada entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu .....	77
Figura 34 – Contribuição por processo relativo ao impacto de mudança climática dos cimentos da indústria brasileira (kg CO <sub>2</sub> –eq./kg de cimento) .....	78
Figura 35 – Contribuição por processo relativo ao impacto de demanda de energia acumulada (CED) dos cimentos da indústria brasileira (GJ –eq/tonelada cimento) .....	79
Figura 36 – Contribuição por processo dos cimentos da indústria brasileira para impacto de mudança climática (% para cada cimento) .....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos e especificações de cimentos Portland no Brasil .....	29
Quadro 2 – Nomenclatura abreviada dos compostos químicos do cimento Portland .....	32
Quadro 3 – Parâmetros e categorias de impactos .....	56
Quadro 4 – Elementos opcionais de avaliação de impactos do ciclo de vida .....	56
Quadro 5 – Tipos de cimento da indústria brasileira e europeia, composição e participação no mercado .....	60
Quadro 6 – Categorias de impacto aplicadas na análise de ciclo de vida da fabricação do cimento Portland .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de cimento dos principais países, período de 2006 a 2013 (em milhões de toneladas) .....	21
Tabela 2 – Produção anual de cimento Portland (em 10 <sup>3</sup> toneladas) .....	30
Tabela 3 – Composição da mistura crua do clínquer Portland .....	33
Tabela 4 – Balanço energético da indústria do cimento (em %) .....	39
Tabela 5 – Matriz de combustíveis utilizadas nas indústrias cimenteiras europeias e brasileiras (em %) .....	62
Tabela 6 – Avaliação dos impactos ambientais do processo de fabricação da indústria cimenteira brasileira e europeia .....	68
Tabela 7 – Comparativo dos impactos ambientais entre os dados da indústria brasileira e da indústria europeia por Boesch e Hellweg (2010) .....	70

## LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida

CEMBUREAU – *The European Cement Association*

CSI – *Cement Sustainability Initiative*

GRI – *Guidelines Report Initiative*

IEA – *International Energy Agency*

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

ISO – *International Organization for Standardization*

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

UE – União Europeia

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	17
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	17
<b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....	17
2.3 PRESSUPOSTO .....	18
2.4 PREMISA .....	18
2.5 DELIMITAÇÕES .....	18
2.6 LIMITAÇÕES .....	18
2.7 DELINEAMENTO .....	18
<b>3 INDÚSTRIA DO CIMENTO</b> .....	21
3.1 SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA .....	24
3.2. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA .....	27
<b>4 CIMENTO PORTLAND</b> .....	29
4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO .....	31
<b>4.1.1 Processo de fabricação</b> .....	33
<b>4.1.2 Adições minerais</b> .....	36
<b>4.1.3 Recursos energéticos</b> .....	38
<b>4.1.4 Recursos alternativos</b> .....	40
4.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO .....	42
<b>5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA</b> .....	45
5.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS .....	47
5.2 METODOLOGIA .....	48
<b>5.2.1 Definição de objetivo e escopo</b> .....	49
5.2.1.1 Conceitos sobre a aplicação de ACV atribucional e consequential .....	50
<b>5.2.2 Análise de inventário</b> .....	51
5.2.2.1 Tipos de coleta de dados .....	53
5.2.2.2 Qualidade de dados .....	53
5.2.2.3 Verificação dos resultados .....	54
<b>5.2.3 Avaliação dos impactos ambientais</b> .....	54
5.2.3.1 Seleção de categorias .....	54
5.2.3.2 Modelos de caracterização .....	55

5.2.3.3 Elementos opcionais do AICV .....	56
<b>5.2.4 Interpretação .....</b>	<b>57</b>
<b>6. APLICAÇÃO DA ACV NO SISTEMA PRODUTIVO DO CIMENTO NO BRASIL .....</b>	<b>58</b>
6.1 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO.....	58
<b>6.1.1 Unidade funcional .....</b>	<b>59</b>
<b>6.1.2 Definição do sistema de produto .....</b>	<b>59</b>
<b>6.1.3 Coleta de dados do ciclo de vida .....</b>	<b>61</b>
6.1.3.1 Produção de energia térmica e elétrica .....	62
6.1.3.2 Adições Minerais .....	63
6.1.3.3 Transporte .....	63
6.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO CIMENTO.....	64
6.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA .....	66
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>68</b>
7.1 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV) .....	68
7.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS INDÚSTRIAS NACIONAL E EUROPEIA .....	70
<b>7.2.1 Indústria cimenteira europeia por Boesch e Hellweg .....</b>	<b>70</b>
<b>7.2.2 Indústria cimenteira europeia pela base de dados .....</b>	<b>72</b>
7.2.2.1 Mudança climática .....	73
7.2.2.2 Depleção da camada de ozônio .....	73
7.2.2.3 Oxidação fotoquímica .....	74
7.2.2.4 Acidificação .....	75
7.2.2.5 Eutrofização .....	75
7.2.2.6 Depleção de recursos não renováveis .....	76
7.2.2.7 Demanda de energia acumulada (CED) .....	77
7.3 IDENTIFICAÇÃO DE <i>HOT SPOTS</i> NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND .....	77
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
REFERÊNCIAS .....	84

## 1 INTRODUÇÃO

O notável crescimento do setor da construção civil em países de economia emergente é diretamente proporcional ao crescente desenvolvimento das economias dos mesmos, são exemplos disso a China e alguns países da América Latina. Entre os materiais construtivos utilizados na indústria da construção civil cabe ressaltar o elevado consumo de cimento Portland. De acordo com dados expostos no relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2012), o crescimento do seu consumo acompanhou a retomada do crescimento econômico do Brasil nas duas últimas décadas.

Segundo Confederação Nacional da Indústria et al. (2012, p. 14), “A indústria brasileira de cimento [...] desempenha um papel importante no cenário nacional e internacional, ocupando a sétima posição entre os maiores produtores mundiais [...]”. Embora o Brasil seja integrado ao grupo de economias emergentes, a indústria brasileira de cimento é reconhecida mundialmente pelo avanço tecnológico e pela produção sustentável de cimentos, devido à redução das emissões de gases do efeito estufa emitidos durante o processo de fabricação. O relatório da *International Energy Agency* (2013) destaca as indústrias de cimento do Brasil entre as fábricas de cimento mais sustentáveis do mundo, tendo maior potencial de eficiência energética comparado com grandes indústrias como as da China e dos Estados Unidos.

Dentre as emissões causadas por processos de manufatura de indústrias, a produção de cimento se destaca por ter grande parte das emissões de gases de efeito estufa, geradas pela calcinação do calcário, principal matéria-prima do clínquer, além da energia utilizada pelo consumo de recursos energéticos. O processo a que se refere seria a etapa de calcinação, na qual “Aproximadamente 60% do total de emissões de CO<sub>2</sub> emitidos durante a produção de clínquer [matéria-prima do cimento] são gerados diretamente do processamento do calcário [para produção do clínquer no pré-calcinador acoplados ao forno rotativo].” (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, 2013b, p. 25, tradução nossa).

Projetos como a “Iniciativa para a sustentabilidade do cimento” (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2002), estão elaborando diretrizes para as empresas participantes desenvolverem a indústria cimenteira de forma mais sustentável. Este investimento se deve ao grande impacto gerado pelas indústrias, assim como a necessidade de

aprimorar a eficiência na produção e incentivar o crescimento sustentável, mitigando os danos consequentes da grande demanda de recursos naturais e energéticos.

Diante do que foi exposto, surge a necessidade de análise do processo produtivo das indústrias para identificar tecnologias mais avançadas que estejam disponíveis no setor, em que a gestão ambiental entra como uma ferramenta essencial para o desenvolvimento sustentável do cimento. A Avaliação do Ciclo de Vida, segundo a NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), se baseia no estudo de todos os processos incorporados na manufatura de um produto, tendo como objetivo a avaliação dos impactos do ciclo de vida do mesmo e podendo ser utilizada como comparação entre outros processos produtivos. Este tipo de análise pode caracterizar o produto através da construção de um perfil ambiental do mesmo, o que já vem sendo feito em muitas indústrias do continente europeu e países como Estados Unidos e Japão, com a construção de banco de dados que busca auxiliar a análise dos impactos do ciclo de vida.

Portanto, para realização desta pesquisa, coletaram-se dados a partir de relatórios publicados anualmente pelas indústrias para adaptação dos inventários disponíveis em âmbito internacional e com isso, através da avaliação do ciclo de vida, foi possível determinar o perfil ambiental do sistema produtivo do cimento Portland produzido no País. Foi feita uma comparação dos perfis ambientais dos cimentos brasileiros com os cimentos da indústria europeia considerados equivalentes, pela composição de clínquer Portland e adições minerais, para verificar os impactos decorrentes das diferenças dos processos produtivos. Por fim, pode-se analisar e quantificar os potenciais impactos ambientais no processo de fabricação das indústrias cimenteiras nacionais.



## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: adaptando-se o banco de dados com valores obtidos da indústria cimenteira nacional, quais seriam os valores dos impactos ambientais potenciais gerados no ciclo de vida do processo de fabricação de cimentos Portland no Brasil?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida dos cimentos nacionais de produção mais significativa.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) elaboração de um banco de dados com adaptações dos inventários internacionais e dados coletados de relatórios da indústria nacional publicados anualmente;
- b) construção do perfil ambiental do cimento Portland nacional e europeu através da análise de ciclo de vida;
- c) identificação de *hot spots* do processo de fabricação do cimento Portland nacional.

## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as diretrizes e estrutura utilizadas para análise de ciclo de vida do processo de fabricação do cimento Portland são válidas para a norma de gestão ambiental NBR 14040/2009.

## 2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa de que as indústrias brasileiras de cimento Portland procuram desenvolver melhorias no processo produtivo a fim de mitigar os impactos ambientais produzidos atualmente, mas, mesmo assim, ainda geram impactos ambientais significativos.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a analisar o processo de fabricação dos cimentos Portland tipo CP II, CP III e CP IV, devido a maior representação na produção e venda no mercado das indústrias cimenteiras nacionais.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho os dados coletados para análise de inventário do ciclo de vida dos processos do sistema de produto, obtidos em relatórios nacionais e adaptados do banco de dados da *Ecoinvent* versão 2.2 e 3.1.

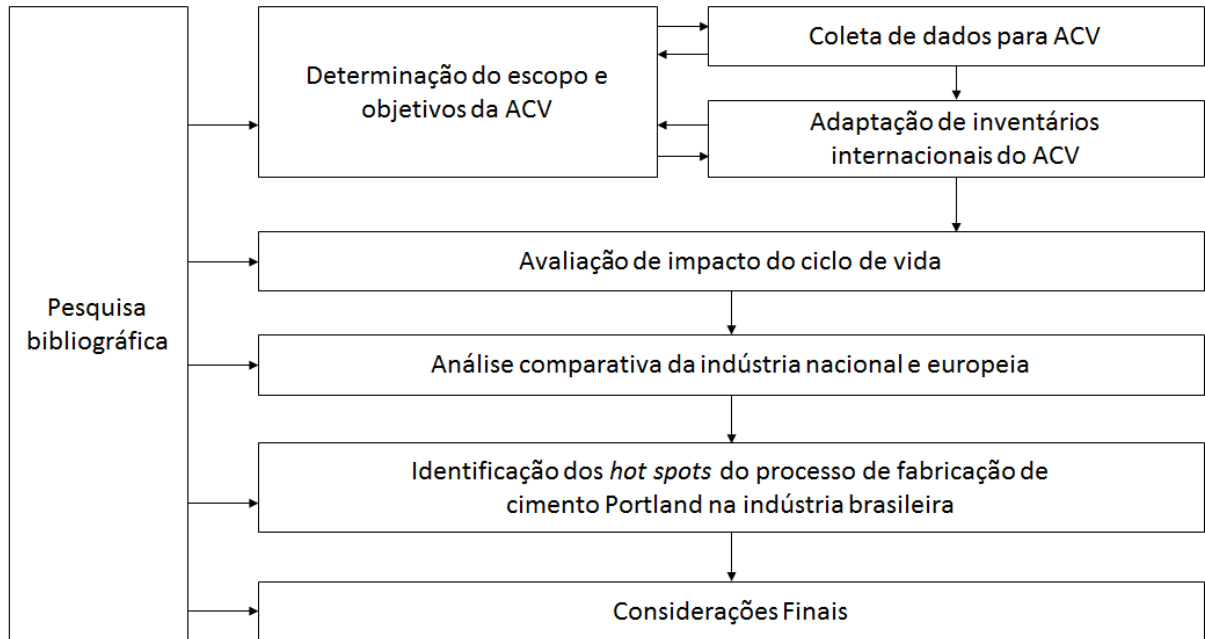
## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) determinação do escopo e objetivos da ACV;
- c) coleta de dados para ACV;
- d) adaptação de inventários internacionais de ACV;
- e) avaliação de impacto do ciclo de vida;
- g) análise comparativa da indústria nacional e europeia;

- h) identificação dos *hot spots* do processo de fabricação de cimento Portland na indústria brasileira;
- i) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

Com a **pesquisa bibliográfica**, pode-se estabelecer um conhecimento específico para os assuntos abordados nesta pesquisa, sendo essencial para compreensão da metodologia e conceitos aqui apresentados. Sendo assim, como exposto no diagrama apresentado, esta etapa influencia todas as demais, fornecendo o embasamento teórico para formulação das mesmas.

A etapa de **determinação do escopo e objetivos da ACV** teve o intuito de delimitar as fronteiras do estudo e determinar os objetivos da análise do ciclo de vida. Para isso foi fundamental o conhecimento das fases do processo de fabricação do produto analisado, no caso o cimento Portland, para restringir o alcance da análise do ciclo de vida do produto.

Após a determinação do escopo, a seguinte fase de **coleta de dados para ACV** foi feita a partir de relatórios publicados da indústria cimenteira brasileira. Partindo-se dos dados obtidos para as indústrias cimenteiras nacionais, foi necessária a **adaptação de inventários internacionais da ACV**, disponibilizados para a análise através de softwares de ACV. Para o trabalho proposto, utilizou-se o banco de dados da *Ecoinvent* versão 2.2 e versão 3.1.

Desta forma, com alcance de todos os dados para cada etapa do processo em análise, a próxima etapa foi a **avaliação de impacto do ciclo de vida**, onde foram avaliados os impactos ambientais mais relevantes para a indústria da construção civil. Através da quantificação dos impactos obteve-se a definição do perfil ambiental da indústria cimenteira analisada, podendo-se fazer uso, na etapa precedente, de uma **análise comparativa da indústria nacional e europeia** para validação dos resultados observados.

Com isto, a **identificação dos *hot spots* do processo de fabricação de cimento Portland na indústria brasileira** foi definida a partir das etapas do sistema produtivo da indústria onde a contribuição do processo é predominante em relação às demais etapas do sistema. Por fim, foram feitas as **considerações finais** relevantes para o estudo.

### 3 INDÚSTRIA DO CIMENTO

Segundo Confederação Nacional da Indústria et al. (2012), a indústria brasileira de cimento teve início em 1936 de forma a atender as demandas do setor da construção civil, sendo hoje em dia parte essencial da economia brasileira. Organizações como Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP) e o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) dedicam-se aos incentivos para o desenvolvimento das indústrias de cimento nacionais.

No início dos anos 2000, a produção de cimento no País sofreu uma queda devido às crises que atingiram a economia mundial. Em 2004, a retomada do crescimento forneceu um cenário de desenvolvimento da indústria brasileira, chegando, em 2012, à produção anual de aproximadamente 69 milhões de toneladas, tornando-se uma das principais produtoras mundiais de cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013a).

Segundo dados obtidos pela *The European Cement Association* (2013a), 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)

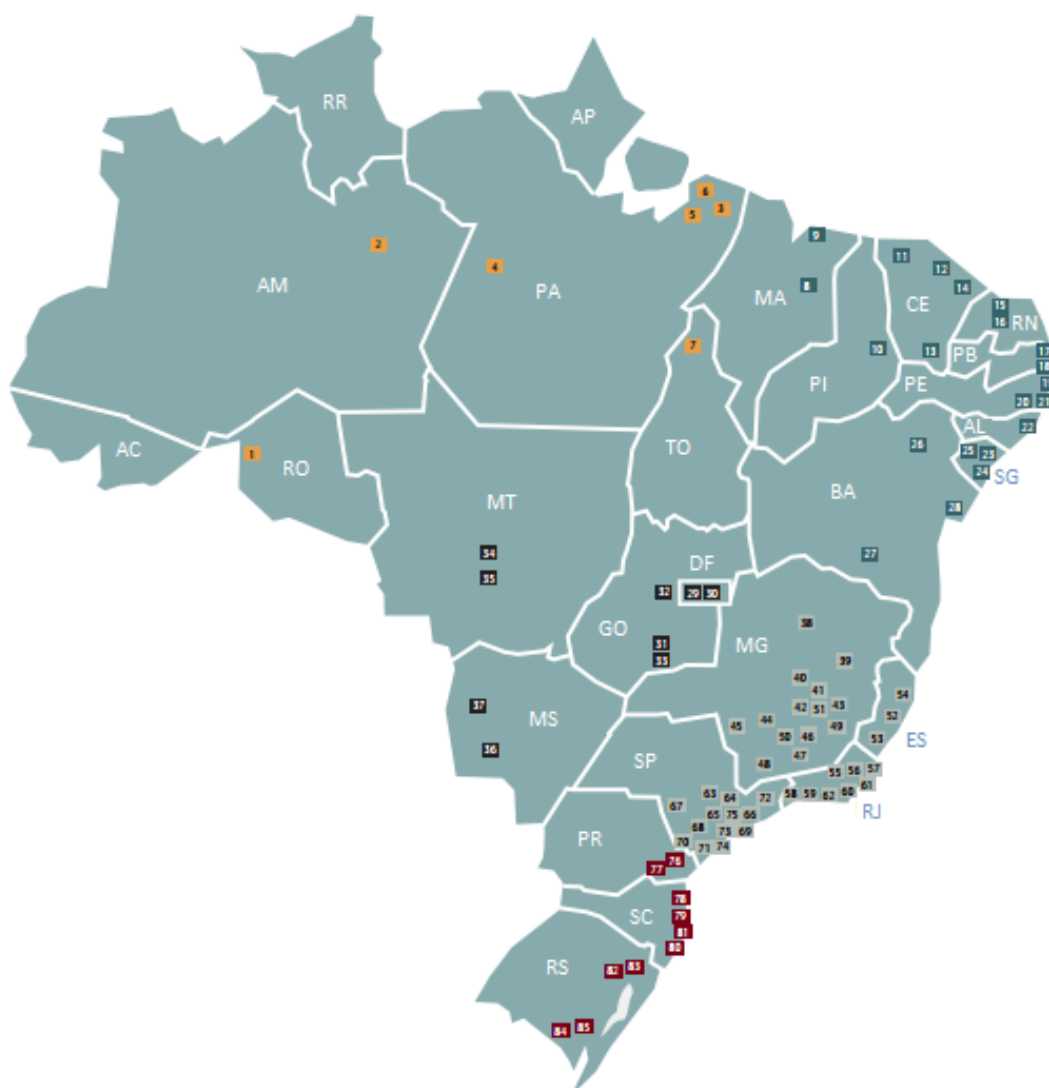
País	Produção de cimento (em milhões de toneladas)							
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013*
China	1236,8	1361,2	1388,4	1644	1881,9	2063,2	2137	2359
Índia	159.0	170.5	185.0	205.0	220.0	270.0	239.0	272.0
União Europeia	264.8	271.0	251.8	201.3	191.0	195.5	159.2	157.2
EUA	98.2	95.5	86.3	63.9	65.2	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

\*Dados provisórios

(fonte: adaptado de THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, 2013a, p. 12, tradução nossa)

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. Pela figura 2, pode-se ver a distribuição das 85 unidades instaladas em território nacional, em 2012. No último ano, 2013, mais 3 unidades foram instaladas no País, duas na região centro-oeste e uma em São Paulo (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013b).

Figura 2 – Fábricas de cimento no Brasil



(fonte: SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2012, p. 4)

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).

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.

Quanto às emissões geradas dentro do processo de fabricação do cimento, Boesch e Hellweg (2010) afirmam que a indústria cimenteira tem grande destaque na geração de poluentes industriais. Além disso, Valderrama et al. (2011) apontam que além dos impactos relacionados aos gases do efeito estufa, a indústria também tem grande impacto em relação à demanda de recursos energéticos, depleção de recursos naturais e geração de resíduos.

O consumo de energia nas indústrias é de alta intensidade devido às elevadas temperaturas que o processo de produção de clínquer Portland requer. Segundo Santi (2003), cerca de 67% do consumo de energia ocorre nesta etapa. Segundo Brasil (2013), a indústria cimenteira nacional consumiu o equivalente a 6%, em 2012, do consumo total de energia do setor industrial brasileiro.

Reconhecendo a necessidade de desenvolver tecnologias para aprimorar o setor industrial cimenteiro para se reduzir os impactos gerados, o enfoque na sustentabilidade da indústria tem se tornado recorrente entre as grandes indústrias de cimento (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2009).

### 3.1 SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA

Diante do cenário atual da indústria do cimento, devido a sua elevada produção anual e, por consequência, seu impacto considerável no meio ambiente, organizações e empresas estão desenvolvendo projetos para mitigação dos impactos ambientais gerados pela indústria.

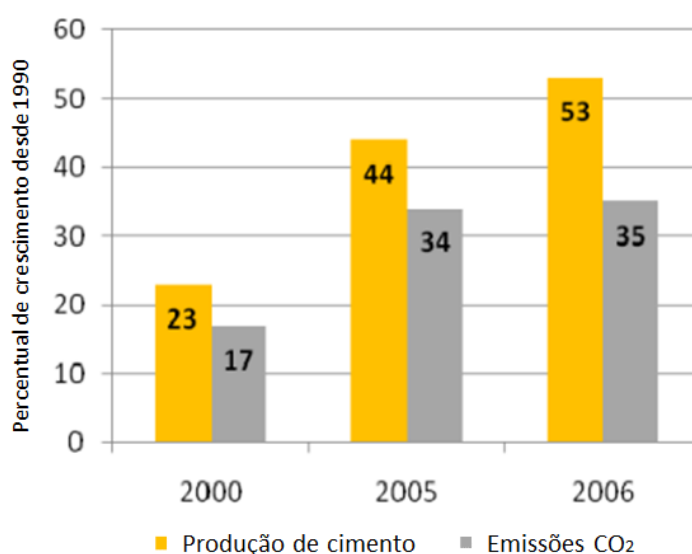
O *World Business Council for Sustainable Development* (WBSCD) é um conselho representada por diretores empresariais, que através de fóruns promovem ações e projetos para implantar diretrizes e técnicas para desenvolver conceitos da sustentabilidade nas empresas participantes. O último relatório, a agenda Visão 2050, tem como enfoque a visualização do horizonte até 2050 do cenário mundial da indústria nas três esferas da sustentabilidade: social, econômica e ambiental. De acordo com os elementos citados para a busca de um desenvolvimento sustentável, estão entre eles tópicos sobre a construção civil e a eficiência energética na produção industrial de materiais e gestão de resíduos (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2012).

Como um projeto específico do setor das industriais cimenteiras do WBSCD, a *Cement Sustainability Initiative* (CSI) desenvolveu um fórum internacional, denominado como a Iniciativa para Sustentabilidade do Cimento, criado para aprofundar os objetivos de sustentabilidade para as indústrias de cimento. De acordo com Confederação Nacional da Indústria et al., (2012, p. 15), “[...] o Brasil está representado por seis grupos cimenteiros que, somados, respondem por 75% da produção nacional.”

*Getting the numbers right*, relatório desenvolvido pela CSI, apresenta informações e uma análise do banco de dados disponibilizado pelas indústrias participantes do projeto, sendo este grupo formado por 43 multinacionais/companhias de cimento com um total de 844 instalações (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTANAIBLE DEVELOPMENT, [2009]). Este relatório dispõe de um parecer internacional das tecnologias implementadas pelas indústrias através da análise dos impactos gerados em relação à produção e à demanda de recursos utilizados. Pela figura 3, apresenta-se a taxa de crescimento da produção de cimento e emissão de CO<sub>2</sub> mundial dos anos 2000, 2005 e 2006 em relação ao cenário de 1990. Pode-se ver a desaceleração das emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela indústria em comparação com o crescimento da produção de cimento ao longo dos anos.



Figura 3 – Percentual de crescimento da produção de cimento e das emissões de CO<sub>2</sub> no período de 2000 a 2006, em relação ao cenário de 1990



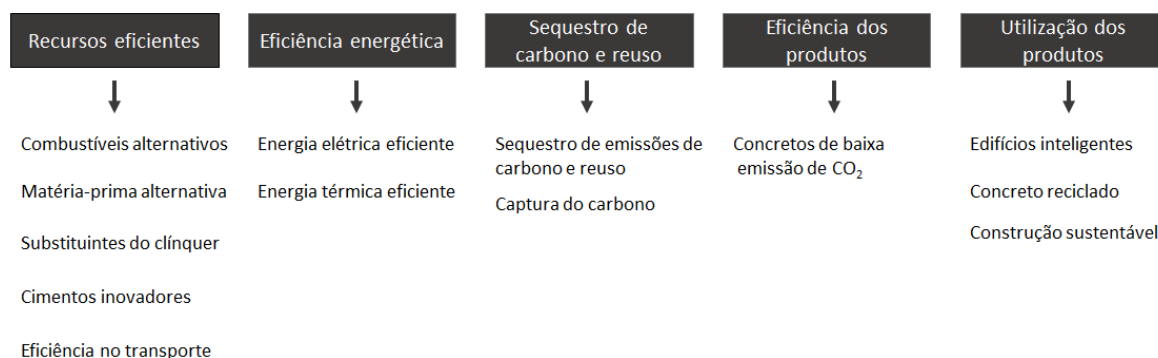
(fonte: WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, [2009], p. 13, tradução nossa)

Organizações como a *Global Reporting Initiative* desenvolveram guias que fornecem diretrizes para as empresas aprimorarem seu sistema produtivo de forma mais sustentável, através da elaboração e, se de interesse da empresa, a publicação de relatórios de sustentabilidade com dados padronizados. Um dos princípios para elaboração dos relatórios de sustentabilidade é o de reportar a contribuição ou objetivos no desenvolvimento da indústria, visando o desempenho da produção com uma análise das demandas de recursos e impactos em todas as esferas da sustentabilidade (GLOBAL REPORTING INITIATIVE, 2013).

Conforme a Confederação Nacional da Indústria (2002), algumas ações são promovidas para mitigação dos impactos gerados pelas indústrias, tais como identificação de atividades, ferramentas, políticas e medidas de monitoramento e mecanismos de avaliação, quando necessária, que envolva a análise de ciclo de vida e aumento da ecoeficiência.

A *The European Cement Association* (CEMBUREAU) organização representativa da indústria cimenteira europeia, por meio de relatórios, definiu diretrizes para a indústria do cimento desenvolver sua produção com redução nas emissões de carbono (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, 2013b). Na figura 4, 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.

Figura 4 – Cinco rotas para redução das emissões de carbono até 2050



(fonte: adaptado de THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, 2013b, p. 27, tradução nossa)

A Agenda 21, instrumento para promover a construção de uma sociedade mais sustentável, disponibiliza em um relatório setorial das indústrias brasileiras propostas para contribuição para mudança no cenário industrial analisado em 2002. Dentre os princípios citados para desenvolvimento sustentável na Agenda 21, cabe citar (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2002, p. 24);

- a) promover a efetiva participação pró-ativa do setor industrial, em conjunto com a sociedade, os parlamentares, o governo e organizações não governamentais no sentido de desenvolver e aperfeiçoar leis, regulamentos e padrões ambientais;
- b) exercer a liderança empresarial, junto à sociedade, em relação aos assuntos ambientais;
- c) incrementar a competitividade da indústria brasileira, respeitados os conceitos de desenvolvimento sustentável e o uso racional dos recursos naturais e de energia;
- d) promover a melhoria contínua e o aperfeiçoamento dos sistemas de gerenciamento ambiental, saúde e segurança do trabalho nas empresas;
- e) promover o monitoramento e a avaliação dos processos e parâmetros ambientais nas empresas. Antecipar a análise e os estudos das questões que possam causar problemas ao meio ambiente e à saúde humana, bem como implementar ações apropriadas para proteger o meio ambiente.

### 3.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A questão ambiental da gestão das indústrias cimenteiras vem adquirindo maior relevância, decorrente dos impactos gerados pelas emissões oriundas da sinterização do clínquer do cimento Portland e a queima de combustíveis utilizadas no mesmo processo. Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 733) as emissões de gases do efeito estufa que são geradas na produção de cimento representam cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> mundiais.

Ainda se prevê que a demanda por cimento no País continuará crescendo, tornando-se necessária a aplicação de modificações na planta industrial, baseadas em uma política ambiental desenvolvida para o crescimento sustentável da indústria. Eficiência da matriz energética, uso eficiente de recursos naturais e substituição de matéria-prima por materiais alternativos são exemplos de medidas que promovem a mitigação de impactos gerados no processo de fabricação do cimento (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013a).

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (2008), o Brasil se destaca pela eficiência da matriz energética em relação aos países desenvolvidos. Ao mesmo tempo, a participação da indústria na intensidade energética sofreu aumentos nos últimos anos, tornando-se essencial a utilização de fontes de energia como a biomassa e hidroelétricas para a sustentabilidade da matriz energética brasileira.

Algumas medidas foram tomadas, com base nos projetos internacionais desenvolvidos pela WBCSD e IEA, através da elaboração de um mapa estratégico do setor da indústria de cimento. A proposta deste mapa é apresentar, com a participação de 500 representantes empresariais, a definição de diretrizes para promover o crescimento e o desenvolvimento sustentável do País (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2013).

Concomitantemente aos incentivos por parte das organizações industriais quanto à eficiência na indústria cimenteira, o enfoque na gestão ambiental de processos e produtos tem se desenvolvido tanto internacionalmente quanto em território nacional. Em 2013, foi criado o comitê de compras sustentáveis (CEE-277) que visa à discussão e elaboração de normas para compras públicas e empresarias, integrando fatores de sustentabilidade ambiental e social no processo de compra de produtos e serviços para redução de impactos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Segundo a cartilha desenvolvida pelo Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão e Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI), [2010, p. 9]:

A prática de CPS [compras públicas sustentáveis] permite atender as necessidades específicas dos consumidores finais através da compra do produto que oferece o maior número de benefícios para o ambiente e para a sociedade. São também conhecidas como licitações públicas sustentáveis, eco-aquisições, compras ambientalmente amigáveis, consumo responsável e licitação positiva.

Desta forma, as diretrizes desenvolvidas para compras públicas sustentáveis impactam na Lei 8.666/1993 que se refere às licitações públicas, em que em 2010, segundo Betiol et al. (2012), foram incluídas as leis 12.349/2010 e 12.305/2010, que incentivam, respectivamente, o desenvolvimento nacional sustentável e política de resíduos sólidos. Com isso, o conceito de compras sustentáveis considera além dos fatores financeiros – preço, prazo e qualidade – os fatores sociais e ambientais. Fazendo com que a tomada de decisão seja realizada com base na “[...] avaliação do ciclo de vida dos produtos, os riscos a ele associados, as medidas de sucesso e implicações para o ambiente e para a sociedade [...]” (BETIOL et al., 2012, p. 22).

Diante do cenário atual, existe uma grande demanda e, por sua vez, oportunidade de investimentos nos setores industriais, fomentando o desenvolvimento sustentável. A gestão ambiental torna-se importante para adquirir um conhecimento aprofundado do sistema produtivo, podendo adotar, com respaldo científico e técnico, tecnologias avançadas ou modificações no processo para redução dos impactos gerados e utilização eficiente de recursos nos processos industriais.

## 4 CIMENTO PORTLAND

Cimento Portland, por definição, é um 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 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991a).

A partir do quadro 1, apresenta-se a relação dos cimentos Portland produzidos no Brasil, com exceção do cimento Portland resistente a sulfatos.

Quadro 1 – Tipos e especificações de cimentos Portland no Brasil

Componentes (% em massa)					
Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
<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-ARI	> 34	100-95		0 - 5	

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991a, 1991b, 1991c, 1991c, 1991d, 1991e)

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; MONTEIRO, 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 estimados

(fonte: adaptado de SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2013b, p. 17)

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 a 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; MONTEIRO, 2014).

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 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, quadro 1, principalmente nas proporções de cimentos com adições mineiras. Esta comparação é vista como uma oportunidade para a utilização de uma comparação dos cimentos em estudo nesta pesquisa. Através da comparação, pode-se obter, pela quantificação dos impactos, as diferenças relevantes na análise de ciclo de vida do cimento nacional e do cimento europeu. Esta análise comparativa auxilia na verificação das diferenças de recursos utilizados e também no perfil ambiental do produto final fabricado no Brasil e na UE.

#### 4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO

O sistema produtivo do cimento Portland tem diferentes e importantes processos dentro do mesmo fluxo. Para melhor discutir sobre os aspectos relevantes, foi feito um estudo quando às etapas do processo e depois descritos separadamente os recursos naturais e os recursos alternativos empregados atualmente na indústria cimenteira.

Segundo Battagin (2011, p. 188),

O principal constituinte do cimento Portland é o clínquer Portland, material resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados de modo a garantir o quimismo. Esse quimismo refere-se à certa proporção de determinados compostos químicos da mistura, dentro de limites específicos, para proporcionar a formação de compostos hidráulicos e conferir propriedade ligante do cimento Portland.

Referente à composição do clínquer do cimento Portland, Centurione (1993) descreve os principais constituintes do clínquer, estes são:

- a) alita, representa os compostos de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) presentes na formação do clínquer Portland, tendo proporções de 40 a 70% na constituição do clínquer, responsável pelo ganho de resistência mecânica e endurecimento do cimento;
- b) belita, segundo componente principal do clínquer, composta por silicatos bicálcicos ( $C_2S$ ), tendo proporção média de 20% na formação do clínquer, tendo

contribuições significativas na resistência mecânica a idades mais longas no uso do cimento;

- c) aluminato tricálcico, ( $C_3A$ ), componente variável no clínquer, entre 0 a 10%, porém tem papel importante no cimento por ser responsável pelo endurecimento inicial do mesmo;
- d) ferrita, composto de ferroaluminatos ( $C_4AF$ ), tendo proporções de 10 a 12% no clínquer, com exceção de clínquer para cimento branco, onde retira-se esta matéria-prima para sinterização do composto no processo de fabricação. Principal propriedade deste composto é conferir ao cimento resistência à corrosão química;
- e) constituintes secundários, cal livre ( $CaO$ ), componente indesejável no clínquer, proporção admitida de 1%, pois a sua presença designa problemas na sinterização do clínquer. Também cita-se o periclásio ( $MgO$ ), presente em clínqueres que utilizam matérias-primas ricas em  $MgO$ , como o calcário magnesiano. Como o periclásio é inerte, sua presença também é indesejada e limitada na proporção de até 6,5% no cimento.

De forma a auxiliar a melhor compreensão dos compostos, o quadro 2 apresenta as adaptações na nomenclatura de elementos químicos comumente utilizados na construção civil. Esta modificação tem como objetivo facilitar a designação destes elementos pela abreviação das composições.

Quadro 2 – Nomenclatura abreviada dos compostos químicos do cimento Portland

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
$CaO$	C	$3CaO.SiO_2$	$C_3S$
$SiO_2$	S	$2CaO.SiO_2$	$C_2S$
$Al_2O_3$	A	$3CaO.Al_2O_3$	$C_3A$
$Fe_2O_3$	F	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	$C_4AF$
$MgO$	M	$4CaO.3Al_2O_3.SO_3$	$C_4A_3\bar{S}$
$SO_3$	$\bar{S}$	$3CaO.2SiO_2.3H_2O$	$C_3\bar{S}_2H_3$
$H_2O$	H	$CaSO_4.2H_2O$	$C\bar{S}H_2$

(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 220)

A fabricação de clínquer Portland requer grande consumo de recursos naturais, como matérias-primas e recursos energéticos. Na tabela 3, apresenta-se um exemplo da composição de uma mistura crua de um clínquer Portland, antes de ser levado aos fornos rotativos. Com base nisso, a utilização de matérias-primas abundantes em cálcio é essencial, quando relacionada à demanda dos outros elementos minerais.



Tabela 3 – Composição da mistura crua do clínquer Portland

Componente	Composição (% kg)
CaO	41,51
SiO <sub>2</sub>	14,03
MgO	2,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,54
SO <sub>3</sub>	0,3
K <sub>2</sub> O	0,57
Na <sub>2</sub> O	0,24
Perda ao fogo	34,83

(fonte: BENHELAL et al., 2011, p. 62, tradução nossa)

A partir do que foi exposto, a utilização de matérias-primas, como sua escolha e adequação, são de suma importância para a produção do cimento. O emprego de adições minerais vem adquirindo cada vez maior espaço, devido à preocupação e dificuldades em relação aos locais para extração das matérias-primas, assim como o uso de materiais reciclados, tanto na etapa de fabricação do clínquer como na adição final ao cimento.

#### 4.1.1 Processo de fabricação

Dentro do processo de fabricação do cimento, as principais etapas do sistema são:

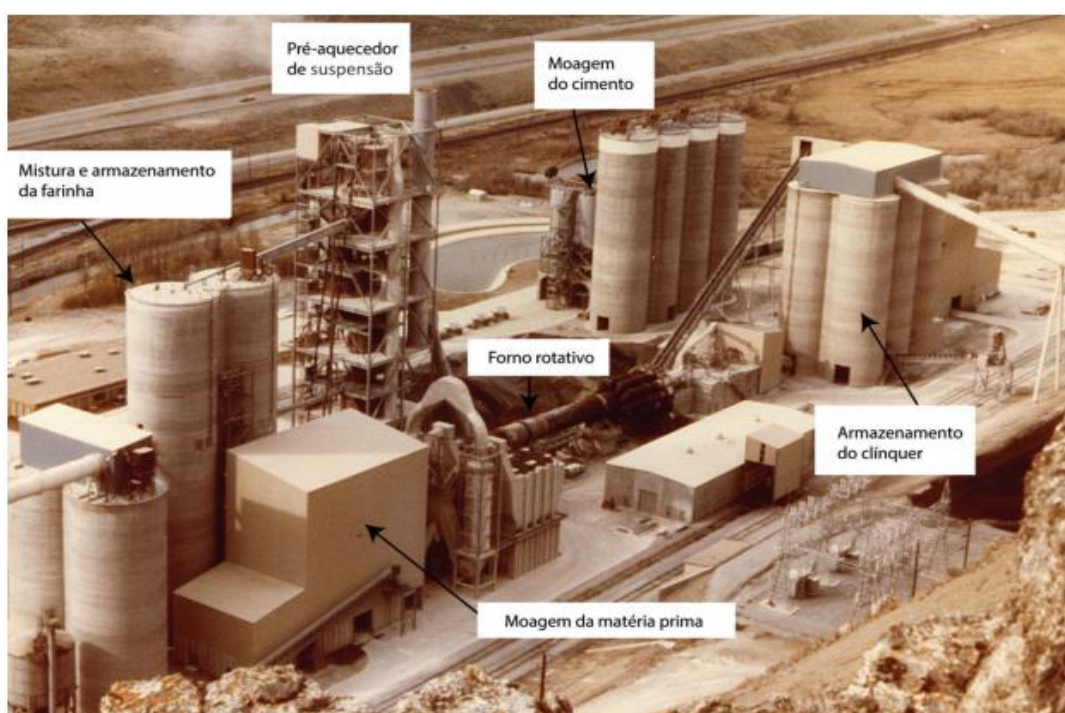
- a) extração de matérias-primas;
- b) britagem;
- c) moagem da mistura crua;
- d) homogeneização;
- e) pré-aquecimento;
- f) forno;
- g) resfriamento;
- h) moagem do cimento.

A primeira etapa do processo de fabricação é a **extração de matérias-primas**, onde a localização da indústria torna-se estratégica, pois a proximidade de pedreiras das plantas industriais é favorável para a redução de tempo e custos embutidos no transporte do material extraído para os processos procedentes.

Após extração do material das pedreiras, é necessária a **britagem** do mesmo, composto por calcário e argila e posterior adição de componentes químicos, se necessário, de acordo com a proporção adequada para formulação do cimento Portland. Os componentes químicos comumente utilizados para adição na mistura crua são: minério de ferro, bauxita e areia. (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA et al., 2012).

Com a devida dosagem dos materiais, é realizada a **moagem da mistura crua** até obter uma granulometria fina para posterior **homogeneização**, geralmente feita em silos conectados com a entrada nos fornos rotativos, como pode ser visto na figura 5.

Figura 5 – Planta de uma indústria de cimento



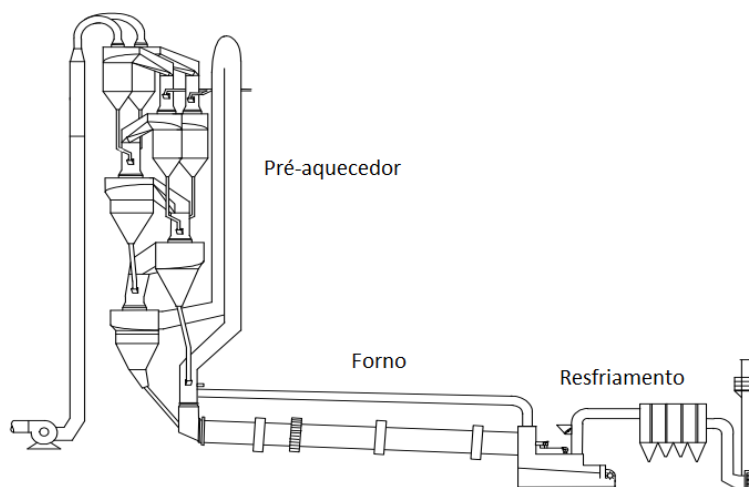
(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 219)

Inicialmente, a pré-homogeneização da farinha crua ocorria através do processo via úmida, em que esta consistia em misturar água à farinha crua distribuindo-a em locais específicos, como um tipo de bacia, executando uma agitação contínua para formar uma pasta homogênea, para posteriormente homogeneizada antes de ser introduzida ao forno. Embora haja maior precisão na composição química final do cimento produzido pelo sistema via úmida, devido a sua homogeneização, o consumo energético para evaporação da água contida na mistura é superior quando comparado ao processo via seca (AÏTCIN, 2008).

Com o constante investimento em eficiência energética nas plantas industriais do cimento, a escolha pelo sistema via seca nas indústrias cimenteiras tem se difundido mais nos últimos anos. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2012), 99% das indústrias de cimento do Brasil operam este sistema. Aïtcin (2008), afirma que, com a maior utilização do processo via seca, é necessária uma homogeneização adequada das matérias-primas antes da moagem para obtenção da farinha crua para queima nos fornos rotativos.

O **pré-aquecimento** ocorre no conjunto de ciclones entre os silos de homogeneização da mistura crua antes de ser levada a queima no maçarico principal dos fornos rotativos, aproveitando o poder calorífico oriundos da queima do forno, figura 6. O material ingressa nesta fase para a descarbonatação da mistura crua, em que permanece no pré-aquecedor com temperaturas iniciais de 50°C a 800°C, antes de ser levada aos fornos rotativos (CENTURIONE, 1993).

Figura 6 – Esquema do trecho de pré-calcinador, forno rotativo e resfriamento de uma planta industrial de cimento

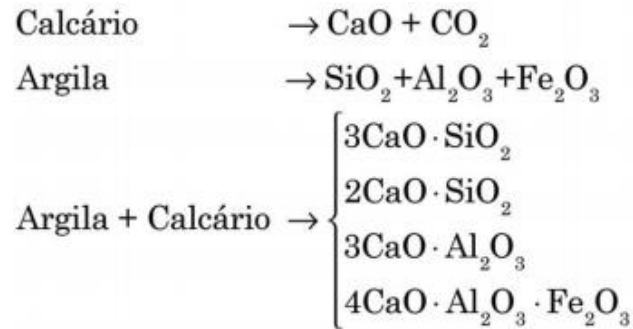


(fonte: EUROPEAN INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL BUREAU, 2013, p. 27)

Na fase de queima no **forno**, geralmente realizada com chama de combustão, majoritariamente pelo uso do coque de petróleo, ocorre a elevação das temperaturas até 1450°C. Nesta fase, o material pode passar por quatro zonas principais antes de ser resfriado, sendo elas: zona de calcinação, zona de transição, zona de fase líquida e zona de temperatura máxima (CENTURIONE, 1993).

Durante a calcinação da farinha crua no forno para produção do clínquer, emissões de dióxido de carbono são liberadas pela transformação do calcário em óxido de cálcio, um dos principais constituintes das fases alita ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) e belita ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) do cimento Portland. A figura 7 ilustra as reações básicas que constituem a composição química do clínquer Portland.

Figura 7 – Reações químicas geradas no forno rotativo para produção de cimento



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 218)

Após o processo de queima nos fornos rotativos, segundo Battagin (2011, p. 190, grifo nosso), “[...] o clínquer é resfriado rapidamente, com o objetivo de impedir que as reações de transformações mineralógicas obtidas no interior do forno sejam revertidas durante o **resfriamento**.”. Estas transformações mineralógicas são responsáveis pela formação adequada dos componentes citados anteriormente, como o  $\text{C}_2\text{S}$  e o  $\text{C}_3\text{S}$ , onde estes são os responsáveis, principalmente, pelo ganho de resistência em, por exemplo, concretos de cimento Portland.

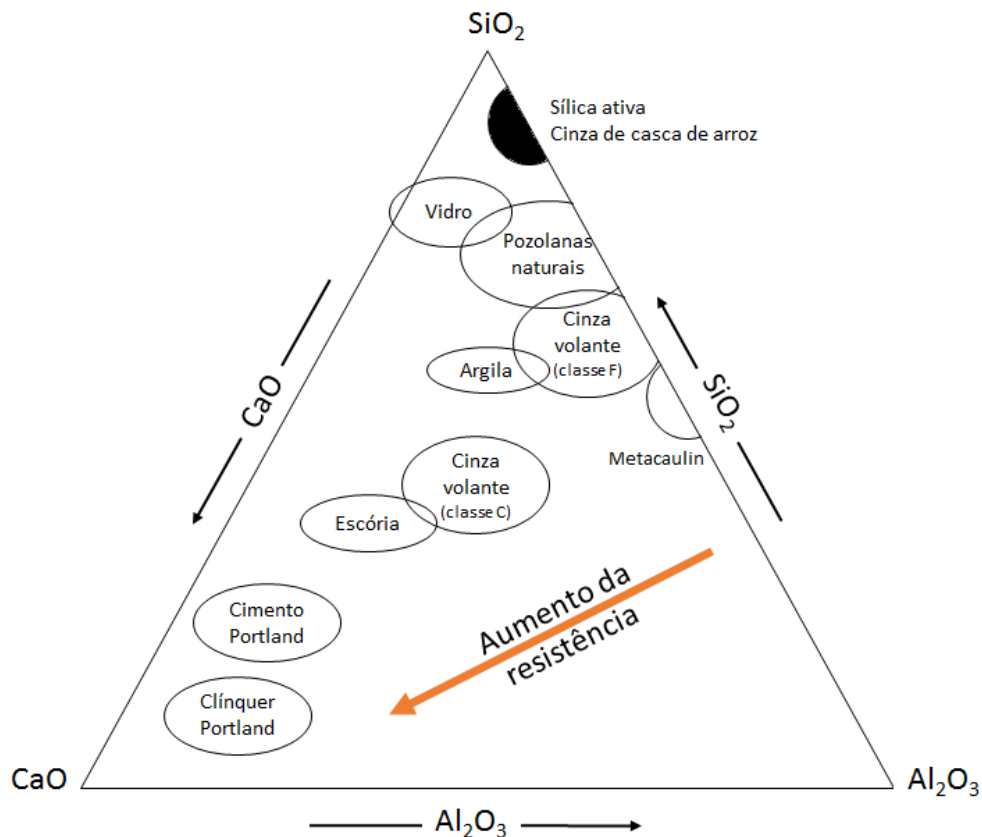
Com a fabricação do clínquer Portland finalizada, este material é armazenado em silos ou transportado diretamente para comercialização. No caso do processo de fabricação de cimento, adiciona-se ao clínquer produzido até 5% de sulfato de cálcio e é feita a **moagem do cimento**, obtendo uma farinha cinza, denominada cimento Portland comum. No caso dos cimentos CP II, CP III e CP IV, apresentados no quadro 2 do item 4.1, adições são feitas com o objetivo de diminuir o teor de clínquer em relação ao cimento Portland produzido.

#### 4.1.2 Adições minerais

Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 327) “As adições minerais são geralmente materiais silicosos finamente divididos [...]”. Pela figura 8 pode-se compreender esta afirmação, devido a composição destes materiais cimentícios, em que grande parte possui elevado teor de sílica

na sua composição química. Por outro lado escória de alto forno e cinza volante com alto teor de cálcio se destacam devido ao potencial de substituição de clínquer, visto que o componente mais demandado para produção do cimento é o cálcio (AÏTCIN, 2008).

Figura 8 – Composição química dos principais materiais cimentícios



(fonte: adaptado de WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014b, p. 6, tradução nossa)

Comparando-se a composição química da escória de alto forno com as demais adições minerais, nota-se a vantagem na sua utilização como substituinte do clínquer Portland na mistura final para produção do cimento. Devido a sua concentração de óxidos de cálcio, esta adição se tornou a mais utilizada no mercado nacional, atingindo o consumo de 44% de escória em relação ao consumo total de adições minerais utilizadas para produção de cimentos compostos (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014b).

Atualmente, a gama de adições minerais e subprodutos utilizados na produção de cimentos tem aumentado devido ao investimento em pesquisas para utilização de resíduos e reaproveitamento

de materiais na fabricação de cimento e na produção do concreto. Dentre estes, este trabalho teve mais enfoque na/o:

- a) escória de alto forno;
- b) cinza volante;
- c) material carbonático.

A **escória de alto forno** é obtida na produção de ferro fundido (ferro gusa), em que se leva a escória líquida a altas temperaturas seguidas de resfriamento brusco, por água e ar, de forma a se obter um estado amorfo da matéria, tornando-se reativa quando misturada ao cimento hidráulico com presença de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A **cinza volante** é um subproduto da combustão de carvão pulverizado em usinas termoelétricas modernas, obtida pelo resfriamento da matéria fundida no processo, tornando-se amorfa. Por ser carregada pela corrente da exaustão de gás, tem como meios de coleta a separação ciclônica, a precipitação eletrostática e a filtragem por filtros de manga (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O **material carbonático** é a percentagem de adição de fíleres de calcário no cimento, compondo os cimentos puros, com até 5% de adição de material carbonático, ou cimento compostos, que possuem mais de 5% de adição de fíler, chegando ao limite de 35% de substituição de clínquer em relação ao cimento, para normas europeias (AÏTCIN, 2008).

#### 4.1.3 Recursos energéticos

Após descritas as principais etapas do processo de fabricação do cimento, pode-se analisar a eficiência, a partir da matriz energética nacional, das tecnologias implantadas e avaliar o que está sendo modificado nas plantas industriais brasileiras a fim de melhorar a eficiência dos recursos energéticos consumidos no sistema produtivo.

O parque industrial nacional é composto, praticamente, por processos de fabricação via seca, com redução de 50% do consumo energético incorporado no sistema em comparação ao sistema via úmida. Em relação ao consumo energético na produção de cimento, a principal fonte de energia utilizada é o coque de petróleo, representado por, aproximadamente, 75% de todas as fontes de energia da matriz energética das indústrias cimenteiras nacionais (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA et al., 2012).

Na tabela 4, apresenta-se a participação de cada fonte no consumo energético das indústrias de cimento Portland do País.

Tabela 4 – Balanço energético da indústria do cimento (em %)

Fontes	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Carvão mineral	4,3	7,5	1,5	0,2	2,1	1,5	1,4	1,4	1,3	1,9	2,0
Óleo combustível	4,3	3,2	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,2	0,4	0,3
Óleo diesel	0,8	0,9	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3
Eletricidade	10,9	11,7	12,2	12,2	11,5	11,0	11,0	11,0	11,0	12,2	12,4
Carvão vegetal	6,6	8,8	10,7	8,8	8,5	6,6	6,7	1,5	1,5	3,5	3,6
Coque de petróleo	67,8	61,5	64,0	66,5	65,8	68,3	68,6	74,0	76,0	70,9	70,7
Outras	5,2	6,4	9,6	10,3	10,3	10,5	10,4	10,2	9,0	9,8	9,8
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

(fonte: BRASIL, 2013, p. 86)

Modificações na planta industrial visando maior eficiência energética podem reduzir o consumo de energia para produção de cimento. Dados apresentados quanto ao desempenho ambiental da Votorantim Cimentos, em 2012, mostram ações feitas em todos os setores energéticos. 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. Além disso, a empresa vem investindo nos últimos anos em novas tecnologias, Devido a isso concentrou processos de pré-calcinação nas fábricas novas, pois estas possibilitam aumento do uso de resíduos substituintes dos combustíveis fósseis e maior eficiência quanto ao consumo de energia elétrica durante a produção (VOTORANTIM CIMENTOS, 2013).

Como uma das cinco diretrizes para diminuição das emissões das indústrias cimenteiras, a CEMBUREAU apresenta o uso de resíduos como combustíveis alternativos (co-processamento) na produção do cimento, exemplos disso são os pneus e a biomassa. Somando-se a isso, o uso de instalações que possibilitem o co-processamento nas plantas industriais torna-se uma solução econômica comparada à implantação de local próprio para destinação de resíduos. (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, 2013b).

Dentre as dificuldades observadas para modificações na planta industrial, *The European Cement Association* (2013b) afirma que as tecnologias disponíveis para o sequestro de carbono e separadores de poeira, se aplicadas em grande escala, elevariam o consumo de energia elétrica na indústria. Embora assim, tais tecnologias reduziriam os impactos gerados pelo processo.

Essa dualidade é comum 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.

#### **4.1.4 Recursos alternativos**

Em relação ao uso de recursos alternativos na indústria cimenteira, a Confederação Nacional da Indústria et al. (2012, p. 14), 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, 2013b).

Devido às altas temperaturas de queimas nos fornos das indústrias de cimento, a instalação de plantas com co-processamento torna-se estratégico para a empresa. O co-processamento 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, p. 1), “das 51 plantas [industriais de cimento] instaladas para a produção do clínquer Portland, 36 estão licenciadas para o [co-processamento] de



resíduos.”. O licenciamento das plantas industriais brasileiras deve seguir o regulamento estabelecido pela resolução da CONAMA n. 264 em vigor desde 1999.

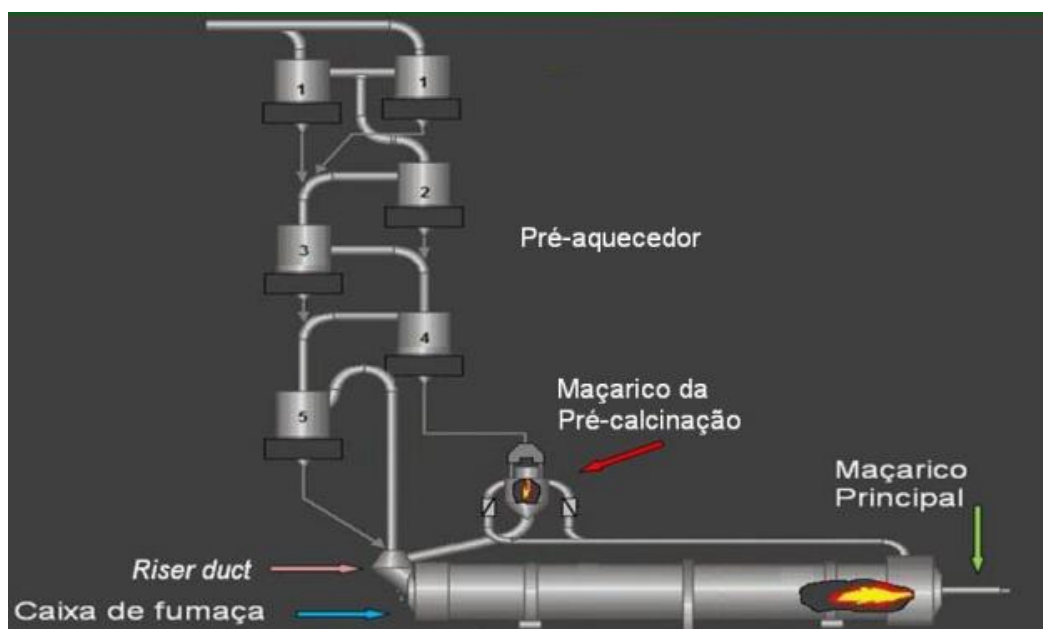
Para Mantegazza (2004), as adaptações dos fornos rotativos da indústria de cimento fornecem condições adequadas para a utilização de co-processamento de produtos. Por isso, em diversas indústrias brasileiras já está sendo usado o co-processamento para reaproveitamento de resíduos. Confederação Nacional da Indústria et al. (2012) apresentam exemplos de indústrias que já trabalham com o co-processamento 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. 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.

## 4.2 EFICIÊNCIA E INOVAÇÃO NA INDÚSTRIA

A indústria do cimento tem se desenvolvido nos últimos anos com o intuito de aumentar a sua capacidade, visando uma melhor eficiência energética e mantendo a qualidade do clínquer e do cimento produzido através da modificação das plantas com equipamentos de tecnologia de ponta, figura 9, e utilização de recursos alternativos. Como fonte de pesquisa, estes exemplos assim como outros ilustrados a seguir, foram obtidos de estudos e inovações tecnológicas implementadas em indústrias de cimento apresentados no 6º Congresso Brasileiro do Cimento, em maio de 2014.

Figura 9 – Forno com co-processamento acoplado na indústria de cimento Itambé, Brasil



(fonte: JUNIOR, 2014)

O co-processamento é uma técnica que possibilita às indústrias cimenteiras trabalharem com substituições térmicas maiores, sem afetar a qualidade do clínquer e do cimento. O exemplo de um sistema avaliado na indústria de cimento Itambé em Curitiba mostrou que no ano de operação do forno com a tecnologia de co-processamento, 18,83% da energia térmica utilizada na fabricação foi originada do processamento de resíduos (JUNIOR, 2014).

A figura 10 apresenta um modelo de reator para tratamento de resíduos. Através do aproveitamento destes, produz-se energia que pode ser utilizada no sistema de fabricação do

cimento. Tecnologias da mesma linha já foram aplicadas em algumas indústrias implantadas no Brasil, tal como plantas de cimento da Cimpor e da Votorantim.

Figura 10 – Equipamento para piroprocessamento



(fonte: ORSINI, 2014)

A figura 11 mostra um exemplo de alternativas de transporte dentro de uma planta industrial de cimento. O transporte interno entre etapas do processo ou entre local de extração de matéria-prima e silos de homogeneização tem grande enfoque na questão ambiental, devido ao consumo de combustíveis nos veículos, normalmente rodoviários, e, por consequência, na emissão de poluentes. Esta alternativa, já empregada em muitas plantas industriais, tem menor impacto ambiental no uso, tendo uma capacidade de até 10.000 ton./h (BEUMER LTDA, 2014).

Figura 11 – Transportador de correia na Heidelberg Cement Group, Indonésia



(fonte: BEUMER LTDA, 2014)

A figura 12 apresenta uma importante etapa do processo de fabricação do cimento, em que ocorrem os maiores gastos de energia elétrica, a moagem do cimento. Segundo a FIVE FCB (2014), o consumo de energia de plantas com tecnologias avançadas chega a ser 80 kWh/ton. de cimento. Em relação ao processo tradicional utilizado através dos moinhos de bolas, a economia de energia chega a 30%.

Figura 12 – Etapa de moagem de cimento da Holcim Hermosillo



(fonte: FIVES GROUP, 2014)

O investimento em tecnologia nas plantas industriais é de grande importância para o desenvolvimento sustentável da indústria do cimento. Pois implantando as melhores tecnologias disponíveis, atinge-se uma maior eficiência energética e utilização de recursos com redução nas perdas. Segundo o World Business Council for Sustainable Development (2009), foram estabelecidas metas de consumo energético, em um cenário de plantas industriais com as melhores tecnologias implantadas, tendo consumo de 3200 MJ de energia térmica para cada tonelada de clínquer produzido e 83 kWh consumidos de energia elétrica para cada tonelada de cimento produzido.

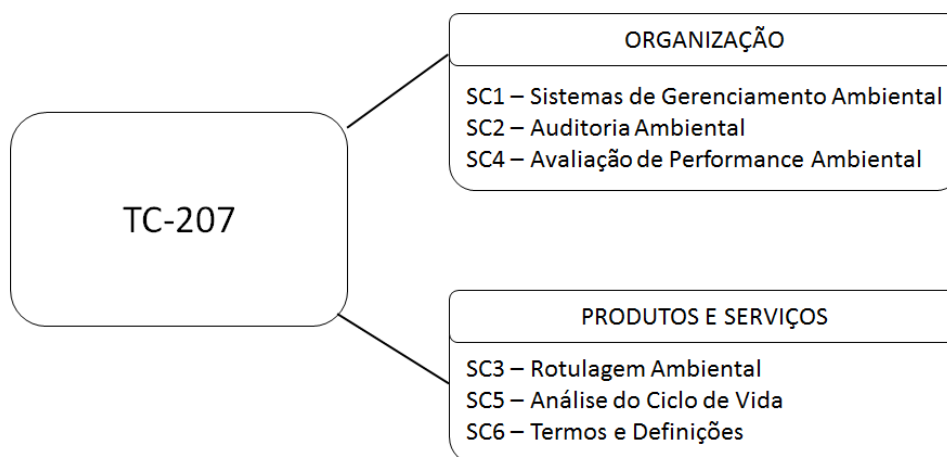
Para isso, a compreensão dos impactos gerados no processo industrial e uma análise aprofundada do sistema produtivo são necessários para aplicar os investimentos nas etapas de melhor retorno em relação a custo e economias durante operação. A gestão ambiental entra como uma aliada, permitindo análises na esfera ambiental através da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida que é apresentada no próximo capítulo.

## 5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O sistema de gestão ambiental abrange todo sistema operacional de uma empresa, integrando todos os processos de forma a fornecer ferramentas para auxiliar tanto em aspectos ambientais como econômicos. A preocupação por parte das empresas em relação às questões ambientais tem gerado esforços para desenvolver um crescimento sustentável (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

O Comitê Técnico TC-207, estabelecido em 1993, desenvolveu normas para a adoção da gestão ambiental em empresas com alcance internacional, divididas em tópicos de organização do sistema e aplicação para produtos e serviços, como apresentado na figura 13.

Figura 13 – Estrutura inicial do comitê técnico ISO/TC-207 implantado nas normas técnicas brasileiras (ABNT/CB-38)



(fonte: CHEHEBE, 1997, p. 8)

Deste modo, segundo Quazi et al. (2001), as normas ISO 14000 foram desenvolvidas para auxiliar no desenvolvimento sustentável das empresas, criando-se uma série de normas, em que inicialmente eram divididas na seguinte ordem:

- a) ISO 14001 – sistema de gestão ambiental – requisitos com orientações para uso;
- b) ISO 14004 – sistema de gestão ambiental – diretrizes gerais sobre princípios, sistemas e técnicas de apoio;
- c) ISO 14010 – diretrizes para auditoria ambiental – princípios gerais

- d) ISO 14011 – diretrizes para auditoria ambiental – procedimentos de auditoria de sistemas de gestão ambiental;
- e) ISO 14012 – diretrizes para auditoria ambiental – critérios de qualificação para auditores ambientais;
- f) ISO 14024 – rótulos e declarações ambientais – rotulagem ambiental do tipo I – princípios e procedimentos;
- g) ISO 14040 – gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura.

Posteriormente, foi criado o subcomitê específico para Mudanças Climáticas, visto a grande importância da abordagem dos impactos gerados em relação às emissões de gases de efeito estufa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Em 2007, foram estabelecidas as orientações e especificações para quantificação, monitoramento, validação e verificação pelos organismos, através da norma ISO 14064. As normas ISO 14065, 14066 e 14067 entraram em vigor nos últimos dois anos (2013-2014) para complementar as demais especificações.

Nos últimos anos parte das normas criadas já não estão mais disponíveis, tais como as ISO 14010, 14011 e 14012, canceladas e substituídas pela ISO 19011, em vigor desde 2002, tendo última versão corrigida e atualizada em 2012. Além disso, algumas normas foram desenvolvidas com o objetivo de apresentar mais informações relativas às ferramentas de gestão ambiental, como exemplo a ISO 14067 que disponibiliza as diretrizes e requisitos para estimar a pegada de carbono de um produto. Esta mesma norma tem como base as normas da família ISO 14040 para quantificação pelo método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e para comunicação segue as recomendações das normas de rotulagem e declarações, ISO 14020, 14024 e 14025 em vigor.

Ferrão (2009, p. 64), em relação aos sistemas de gestão ambiental industriais comenta que:

Na indústria, as técnicas de análise ambiental mais utilizadas são a auditoria ambiental (AA), a análise do risco (AR), a análise do impacto ambiental (AIA) e a avaliação do ciclo de vida (ACV), as quais constituem técnicas e procedimentos essenciais no âmbito de uma gestão ambiental eficaz, e desempenham papéis complementares, com objetivos e âmbitos diferenciados, tanto a nível de abrangência geográfica como temporal.

A técnica de análise do risco avalia, em relação a um ecossistema ou a uma população, os fatores que possam influenciar a exposição de seres humanos ou outras espécies agregando a estes valores características locais da região e/ou populações em estudo. Já a “[...] análise do

impacto ambiental consiste no processo de identificação e avaliação das consequências das [ações] humanas sobre o ambiente [...].” (FERRÃO, 2009, p. 67).

A ACV é uma técnica que busca avaliar os impactos ambientais do ciclo de vida de um produto ou processo, podendo ser desde seu “nascimento” até sua disposição final (*cradle-to-grave*) (FERRÃO, 2009). Para as normas regulamentadas no País, estão disponíveis as normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, que estabelecem diretrizes, metodologia, requisitos e orientações para aplicação da ACV como ferramenta da gestão ambiental da empresa ou pesquisa. Como normas complementares, também entraram em vigor em 2014 as normas NBR ISO 14045, que estabelece princípios, requisitos e orientações para avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto e a NBR ISO 14049, que ilustra exemplos de aplicação da norma NBR ISO 14044 quanto às etapas de definição de escopo e objetivos e análise de inventário do ciclo de vida.

## 5.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

De acordo com a NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, p. 7):

A ACV considera todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas, através da produção de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento de fim de vida até a disposição final. Com base em tal visão e perspectiva sistemáticas, a transferência de cargas ambientais potenciais entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada e possivelmente evitada.

A utilização da técnica da ACV pode auxiliar empresas na tomada de decisões, modificações no sistema produtivo e construção de indicadores ambientais para publicação de relatórios de sustentabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 2009a). Para este estudo, a aplicação da ACV no sistema produtivo das indústrias de cimento tem como objetivo a avaliação dos impactos ambientais dos cimentos de produção mais significativa no Brasil.

De acordo com a European Commission Joint Research Centre (2009), existe um grande enfoque gerencial da ACV no planejamento e controle dos sistemas produtivos de empresas, pois através dos inventários elaborados pode-se ter uma visão abrangente de todos os recursos utilizados nos processos. Sendo assim, pode se desenvolver o poder de decisão por parte dos consumidores dos produtos, através do auxílio da ACV, a escolha de diferentes materiais de acordo com os resultados obtidos pela avaliação dos impactos do ciclo de vida do produto e identificação de processos impactantes (hot spots) no ciclo de vida do produto avaliado.

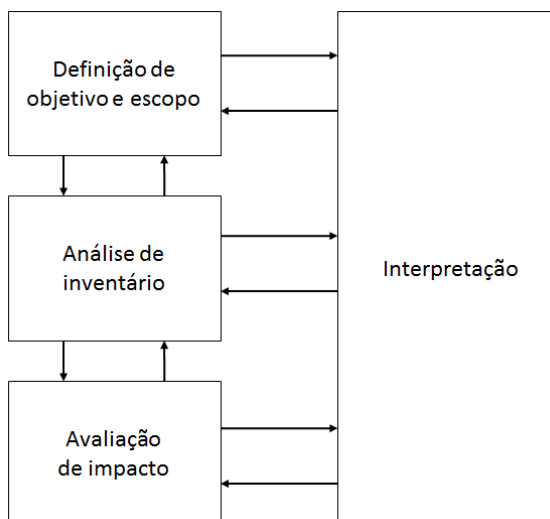
## 5.2 METODOLOGIA

Conforme a NBR 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), algumas diretrizes são definidas para padronizar a metodologia da ACV, de forma a reduzir diferenças entre estudos aplicados, principalmente em casos de publicação de resultados. Para aplicação de ACV em um estudo, definem-se quatro fases principais:

- a) definição de objetivo e escopo;
- b) análise de inventário;
- c) avaliação de impacto;
- d) interpretação.

A figura 14 apresenta o diagrama das fases de uma ACV, em que demonstra interdependência de etapas, representada assim, pois a ACV é uma técnica iterativa. Isto é, no decorrer do estudo, pode-se identificar a necessidade de outras informações ou o conhecimento de limitações que solicitem modificações no escopo da análise.

Figura 14 – Estrutura das fases de uma ACV



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, p. 8)

Nos próximos itens, são descritas estas quatro etapas, para assim analisar a metodologia da ACV e suas limitações na aplicação de um estudo.



### 5.2.1 Definição de objetivo e escopo

A primeira fase da ACV define os objetivos e o escopo do estudo. Para isto, a NBR ISO 14040 estabelece diretrizes que regularizam a metodologia aplicada.

Conforme a NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), o objetivo de um estudo da ACV deve declarar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, isto é, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo. Para Carvalho (2002), dentre os objetivos mais comuns na ACV pode-se citar a comparação de sistemas produtivos, visando tecnologias alternativas, avaliação dos impactos ambientais gerados por um processo ou produto, aplicação de selos verdes e a apresentação para o público quanto a recursos naturais utilizados e os impactos gerados para o processo de fabricação avaliado.

Em relação à definição do escopo a ACV, os principais itens para determinação são (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a):

- a) unidade de processo;
- b) sistema de produto;
- c) unidade funcional;
- d) fronteiras do sistema;
- e) nível de detalhe e qualidade dos dados.

**Unidade de processo** inclui as atividades de uma operação, normalmente interligada por fluxos de produtos. O **sistema de produto** é composto por processos elementares interligados por fluxo de produtos que percorrem os limites do sistema, das unidades de processo e de fluxos intermediários que ocorrem dentro do sistema em estudo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a). A definição dos processos que compõe o estudo é essencial para analisar os fluxos mais relevantes para a análise do ciclo de vida e alcançar os objetivos definidos nesta fase.

**Unidade funcional** representa a quantificação do desempenho característico do produto em análise, com o propósito de fornecer uma referência para a qual os dados de entrada e saída possam ser relacionados.

As **fronteiras do sistema** definidas para o ciclo da vida de um produto podem ser analisadas do “berço” ao “túmulo”, ou seja, desde a extração de matérias-primas, transportes, fabricação de produtos até o uso e disposição final. Para a situação aplicada neste estudo o sistema “do berço ao portão” seria o que representa o processo de fabricação do cimento, pois define-se como “berço” a extração das matérias-primas e o “portão” é equivalente a etapa em que o cimento está finalizado e pronto para ser comercializado, sem incluir a sua distribuição. Como exemplo, a figura 10 apresenta um sistema de produto desenvolvido para estudo e aplicação da ACV na produção de clínquer.

O **nível de detalhe** deve ser definido para alcançar os objetivos determinados, pois este limita a análise dos dados devido a sua contribuição e relevância dos fluxos elementares e dados considerados no sistema de produto avaliado. A **qualidade dos dados** representa a integridade dos resultados e sua representatividade na aplicação do estudo.

#### 5.2.1.1 Conceitos sobre a aplicação de ACV atribucional e consequential

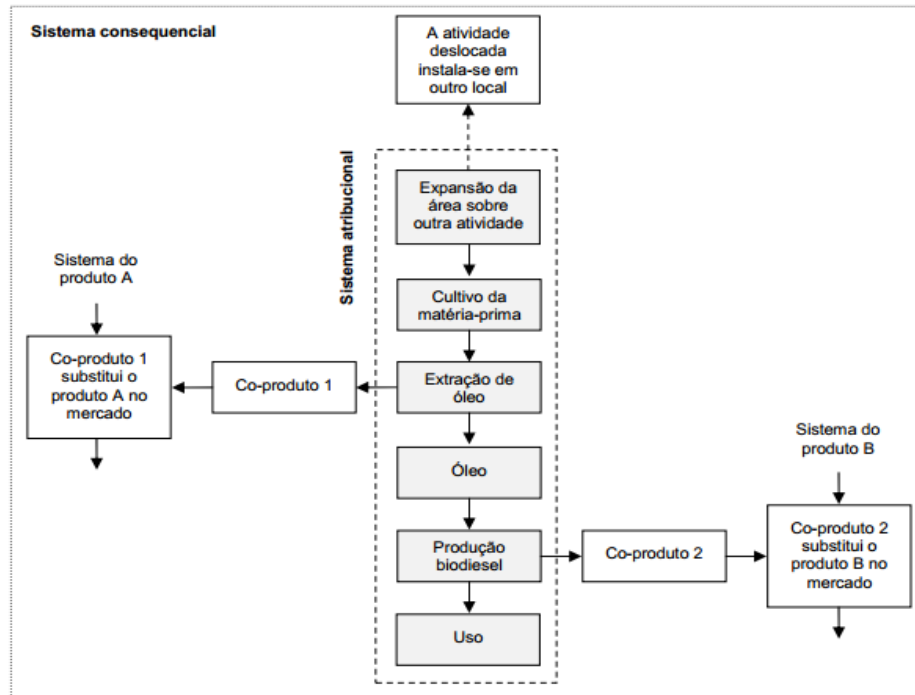
Durante a definição do escopo do estudo de uma ACV, a escolha entre o estudo de uma ACV atribucional ou consequential tem grande influência em relação aos objetivos e motivações determinados na pesquisa.

A ACV atribucional define o sistema de produto a partir de processos relacionados diretamente a um fluxo principal, considerando os recursos utilizados e matérias-primas fornecidas por uma cadeia de suprimentos ligada ao processo. Conceitualmente, define-se um produto/processo principal e identificam-se os subprocessos relacionados, como as matérias-primas utilizadas como insumo, os recursos necessários para operação do sistema e serviços, como exemplo manutenção e administração do local (EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, 2009),

No caso do estudo de uma ACV consequential, a partir de decisões tomadas para modificação do processo, o sistema de produto é construído pelos demais fluxos relacionados ao processo principal e consequências derivadas da decisão principal. EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, 2009). Na figura 15, pode ser visto o caso de um estudo aplicado a avaliar a viabilidade da produção de biodiesel como substituinte de combustíveis fósseis (NOVAK, 2013), em que se utilizou o sistema consequential, pois este analisa mais fases do

que comparado à metodologia atribucional, devido a relação causal entre previsões de mercado e tecnologia dentro do cenário em estudo.

Figura 15 – Sistema de produto do ACV atribucional e consequencial de um estudo aplicado na utilização de biodiesel



(fonte: NOVAK, 2013, p. 32)

Segundo Weidema (2003), a principal distinção entre a metodologia de ACV atribucional e consequencial, é que a primeira retrata uma retrospectiva de processos, podendo ser aplicada para identificação de pontos de impacto mais significativo (*hot-spots*) e declarações de produtos, enquanto que a segunda – consequencial – é um estudo prospectivo em que se avaliam as consequências ambientais futuras de um determinado processo.

## 5.2.2 Análise de inventário

Segundo a NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b, p. 14) sobre o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), as seguintes considerações são feitas:

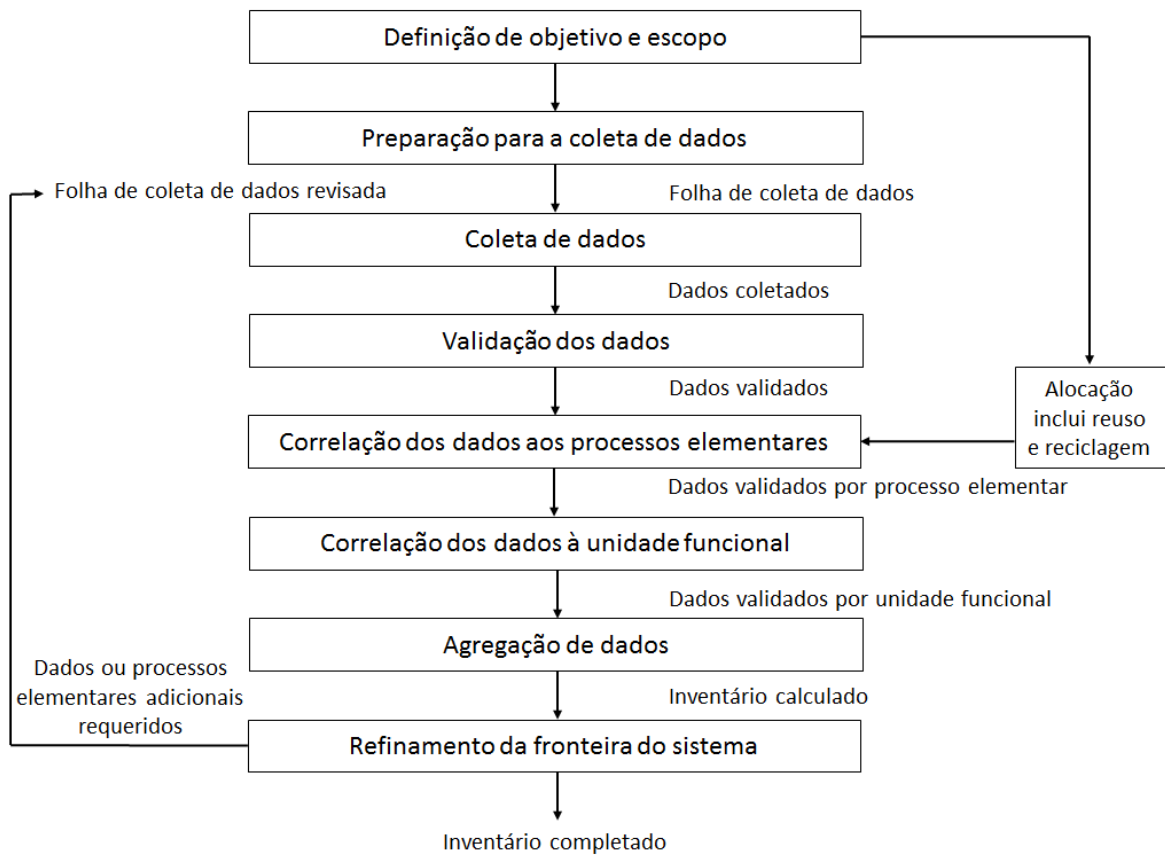
A análise de inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto.

A condução de uma análise de inventário é um processo iterativo. À medida que dados são coletados e se amplia o conhecimento sobre o sistema, novos requisitos ou limitações dos dados podem ser identificados, requerendo mudança nos

procedimentos de coleta de dados, de modo que os objetivos do estudo possam ainda ser satisfeitos. Às vezes, podem ser identificadas condições que requeiram revisões do objetivo ou do escopo do estudo.

O objetivo do ICV é o de processar os dados que são obtidos pelos processos elementares dentro dos limites da fronteira do sistema e que fornecem a análise do inventário para a avaliação de impacto do ciclo de vida. Para isto, algumas medidas devem ser tomadas para assegurar a qualidade e validação dos dados coletados. Estas ações são detalhadas no diagrama apresentado pela figura 16.

Figura 16 – Procedimentos para análise de inventário do ciclo de vida



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b, p. 13)

A coleta de dados tem como princípio obter valores dos dados de entrada e de saída das unidades de processo constituintes do sistema de produto. Esta etapa do estudo é essencial para qualidade do mesmo, visto que durante a coleta de informações pode-se verificar que “[...] alguns processos necessitam ser decompostos em subprocessos elementares” (FERRÃO, 2009, p. 148). A divisão de processos se deve também ao impacto ou importância do dado em relação a todo processo.

### 5.2.2.1 Tipos de coleta de dados

A coleta de dados, segundo a ISO 14067 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2012), pode ser classificada em função da origem onde as medições são obtidas. Para isto, divide-se em:

- a) dados primários;
- b) dados do local específico;
- c) dados secundários.

Referente a coleta de **dados primários**, esta pode ser obtida através de medições diretas ou a partir de cálculos com dados da fonte original do tipo de processo, mas não é necessariamente do sistema de produto em estudo.

Embora sejam considerados como primários, os **dados do local específico** são diferenciados, pois estes dados são mais consistentes ao sistema de produto analisado por serem obtidos diretamente do local.

Os **dados secundários** são obtidos em fontes genéricas, como bancos de dados e inventários nacionais. Com a existência de banco de dados internacionais confiáveis, a utilização de dados secundários é comum em muitas pesquisas, no entanto é importante verificar a qualidade dos mesmos.

### 5.2.2.2 Qualidade dos dados

Quando a coleta de dados ocorre no local específico da manufatura do produto em análise, para se assegurar a qualidade destes dados, deve-se planejar a coleta de forma que reporte a produção relativa ao período de um ano. Para coleta de dados primários da produção, a partir de cálculos e/ou relatórios, deve-se assegurar que estes dados tenham sido coletados há, no máximo, cinco anos e para dados secundários 10 anos (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2013). Exemplos de dados genéricos são os bancos de dados internacionais publicados para uso em softwares, como o *Ecoinvent*, da Suíça, banco de dados mais utilizado devido ao amplo fornecimento de dados e processos, grande confiabilidade e compatibilização com diferentes softwares de aplicação da ACV.

Na fase do ICV, para casos de comparação entre sistemas, é importante a definição equivalente entre sistemas e suas respectivas características, sendo estas as determinadas no escopo do

estudo. Isto se deve a que na fase de interpretação de dados e aplicação de metodologias de avaliação de impactos, pode-se obter resultados com divergências geradas pelas diferenças entre os sistemas. Quando identificadas diferenças entre as metodologias analisadas, deve ser relatada para realização de uma revisão crítica dos resultados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

#### 5.2.2.3 Verificação dos resultados

Segundo Ferrão (2009), a etapa de análise ou verificação dos resultados tem como intuito analisar o contexto geográfico, temporal e tecnológico do produto ou processo avaliado, para assim se compreender a representatividade do mesmo no universo em estudo. Tecnologias similares entre industriais e períodos de coleta de informações são exemplos das análises que devem ser feitas para se obter uma qualidade na ACV.

### 5.2.3 Avaliação dos Impactos Ambientais

A fase de AICV é composta, primordialmente, pelas etapas de seleção de categorias e modelos de caracterização que tem como produto final a avaliação dos impactos ambientais selecionados para o produto em estudo. Após estas fases, existem etapas opcionais que dependem dos objetivos da aplicação do estudo ou adequação para fase final de interpretação da ACV.

#### 5.2.3.1 Seleção de categorias

A etapa de classificação tem como objetivo a definição de categorias de impacto, que devem abranger as questões ambientais relevantes na aplicação do estudo em análise. Com isso, através de modelos de caracterização obtém-se os fatores de caracterização que estão relacionados com os processos ambientais que definem o perfil ambiental do produto.

O *Building Research Establishment* (2013) indica as seguintes metodologias de avaliação de impacto para ACVs de materiais da construção civil:

- a) mudança climática;
- b) depleção da camada de ozônio;
- c) acidificação;
- d) eutrofização;
- e) oxidação fotoquímica;

f) depleção dos recursos naturais.

**Mudança climática** determina os potenciais de impactos a partir de quantitativos de gases do efeito estufa, como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> e aerossóis

**Depleção da camada de ozônio** representa a exaustão da camada de ozônio, cujos impactos podem causar danos futuros ao meio ambiente. Já a **oxidação fotoquímica** ocorre pela formação de nevoeiro gerada pela reação de poluentes emitidos ao ar.

**Acidificação** está relacionada à formação de chuva ácida como consequência das emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre, causando danos no solo e na água. A **eutrofização** representa os potenciais de impactos referentes às emissões de nutrientes ao solo e aos corpos d'água, principalmente, de nitratos e óxidos de fósforo

**Depleção dos recursos naturais** representa a utilização de recursos naturais como matérias-primas e combustíveis fósseis, sendo medida pela quantidade extraída em relação às reservas.

Além destas categorias de impacto, a categoria de “Demanda de Energia Acumulada” (CED), tem grande importância para análises em processos com grande demanda de recursos energéticos. Através desta avaliação pode-se determinar e quantificar os recursos energéticos renováveis e não-renováveis consumidos no sistema de produto avaliado. Analisando os consumos diretos do processo, assim como os consumos indiretos ocorridos na produção de matérias-primas/insumos do sistema. (FRISCHKNECHT, 2007)

#### 5.2.3.2 Modelos de caracterização

Na etapa de caracterização, os impactos são quantificados para cada categoria de impacto selecionadas em uma medida correspondente a unidade referencial. No quadro 3, pode-se ver a definição das categorias e seus respectivos parâmetros e unidades referenciais.

Quadro 3 – Parâmetros e categorias de impactos

Categoria de Impacto	Parâmetro	Unidade
Mudança climática	Mudança climática, GWP 100a	kg CO <sub>2</sub> eq. 100 anos
Redução da camada de ozônio	Redução potencial do ozônio (camada estratosfera), ODP	kg CFC 11 eq.
Acidificação do solo e da água	Acidificação potencial do solo e água, AP	kg SO <sub>2</sub> eq.
Eutrofização	Eutrofização potencial, EP	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>-3</sup> eq.
Oxidante fotoquímicos	Formação potencial de ozônio troposférico, POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.
Depleção de recursos naturais - elementos	Depleção potencial de recursos naturais não-fósseis, ADP-elements	kg Sb eq.
Demanda de energia acumulada	Demanda dos recursos energéticos renováveis e não renováveis, CED	MJ eq.

(fonte: adaptado de BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2013, p. 30, tradução nossa; FRISCHKNECHT et al., 2007)

Sendo assim, os dados analisados na fase do ICV, após fase de classificação, são calculados para cada parâmetro, em que diferentes substâncias são convertidas em relação a sua respectiva contribuição a substância da unidade referência do impacto avaliado. Esta equivalência é denominada como a determinação dos fatores de caracterização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

### 5.2.3.3 Elementos opcionais da AICV

Com a classificação e caracterização da fase AICV, tem-se um perfil ambiental do produto em estudo. No entanto, os dados resultantes destas etapas não são de fácil compreensão, devido ao diferente referencial. Desta forma, cabe ao pesquisador avaliar a necessidade de se analisar os resultados através de técnicas opcionais da avaliação de impacto, descritas no quadro 4.

Quadro 4 – Elementos opcionais da avaliação de impactos do ciclo de vida

Elementos Opcionais	Descrição
Normalização	Cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência
Agrupamento	Agregação e possível hierarquização das categorias de impacto
Ponderação	Conversão e possível agregação dos resultados dos indicadores entre as diferentes categorias de impacto utilizando fatores numéricos baseados em escolha de valores; convém que os dados anteriores à ponderação permaneçam disponíveis

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b, p. 21)



### 5.2.4 Interpretação

Conforme a NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), os seguintes elementos devem ser estudados na fase de interpretação da ACV:

- a) identificação das questões significativas;
- b) avaliação do estudo;
- c) conclusões, limitações e recomendações.

A **identificação das questões significativas** é feita com base nos resultados obtido nas fases de ICV e AICV, sendo importante analisar se as características definidas no escopo e objetivo do estudo estão apropriadas em relação aos valores resultantes da ACV.

Para se proceder à **avaliação do estudo**, três técnicas podem ser utilizadas; verificação de completeza, sensibilidade e consistência. Ambas são ferramentas para avaliar a qualidade dos dados, respectivamente, coletados, resultantes e determinados para análise do estudo.

Por fim, a fase de **conclusões, limitações e recomendações** é relevante para o reporte ao público-alvo determinado na primeira fase de definição de objetivos da ACV. Faz-se uso de uma revisão crítica da aplicação da ferramenta de ACV, metodologia e resultados, a fim de verificar se a qualidade do trabalho é satisfatória em relação aos requisitos determinados no início do estudo.

## **6 APLICAÇÃO DA ACV NO SISTEMA PRODUTIVO DO CIMENTO NO BRASIL**

Este estudo teve como proposta a aplicação da ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida para a avaliação dos impactos ambientais dos cimentos de produção mais significativa no Brasil. Segundo a norma inglesa (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2013) para materiais construtivos, ciclos de vida de processos que não analisam o uso e disposição final do produto no sistema de produto não podem ser utilizados para comparação. Por isso, este estudo não visa comparação entre os cimentos avaliados, mas sim uma avaliação quantitativa dos mesmos.

A metodologia aqui aplicada, segue as diretrizes da ferramenta de ACV segundo norma 14040 (ABNT, 2009b), em que as quatro etapas principais do estudo – definição de objetivos e escopo, análise do inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos do ciclo de vida e interpretação – são detalhadas nos próximos itens, com exceção da etapa de interpretação que é comentada no capítulo 7.

Devido à elevada quantidade de dados gerados para a aplicação da ACV neste estudo, foi utilizado software específico para Avaliação de Ciclo de Vida de produtos/processos, possibilitando o manuseio dos dados e construção do sistema de produto específico para os processos aqui estudados. O software utilizado é o *OpenLCA*, programa desenvolvido pela empresa de consultoria alemã GreenDelta e disponibilizado gratuitamente na internet para uso de qualquer pessoa interessada na aplicação da ferramenta aqui estudada.

### **6.1 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO**

Em vista ao cenário atual, o objetivo principal deste trabalho é avaliar os impactos do ciclo de vida do processo de fabricação do cimento Portland no Brasil.

Por se tratar de um estudo focado no sistema produtivo em vigor nas indústrias cimenteiras nacionais, a ACV aplicada neste estudo é atribucional, visando apenas a caracterização e quantificação dos impactos ambientais, assim como identificação de *hot spots* no processo de fabricação dos cimentos avaliados.

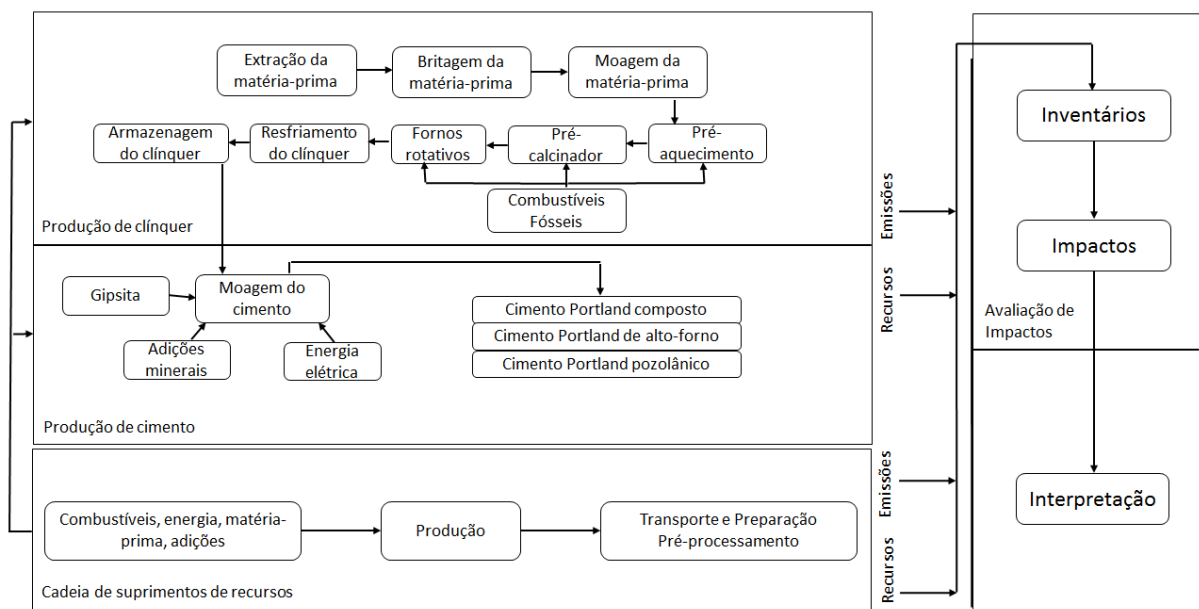
### 6.1.1 Unidade funcional

A unidade funcional deste estudo foi definida como 1 tonelada de cimento produzido, esta escolha se deve à intenção de observar todos os recursos e impactos gerados para fabricação de uma tonelada de cimento. Importante ressaltar que este estudo não tem como objetivo fazer uma comparação direta entre cimentos da mesma indústria, mas sim uma avaliação do impacto gerado dentro do sistema produtivo. Além disso, a métrica adotada pode ser utilizada como comparação a outros estudos que utilizam a mesma unidade funcional, (BOESCH; HELLWEG, 2010, FEIZ et al., 2014; VALDERRAMA et al., 2012) embora tenha que se considerar que outros cimentos analisados podem ter diferentes composições.

### 6.1.2 Definição do sistema de produto

Na figura 17, são detalhados todos os produtos/subprodutos e fluxos de processos considerados na análise de ACV.

Figura 17 – Sistema de produto “do berço ao portão” da fabricação do cimento Portland



(fonte: elaborado pela autora)

Como o estudo visa avaliar os impactos dentro do processo de fabricação da indústria cimenteira, o sistema de produto considerado neste estudo se baseia nos principais processos existentes em uma planta industrial. Desta forma, o sistema restringe-se às fases que

correspondem desde a extração de matérias-primas até obtenção final do pó de cimento Portland cinza. A distribuição do produto e comercialização do mesmo não foram consideradas.

Neste mesmo diagrama foram enfatizados os processos que possuem produção de calor devido ao consumo de recursos energéticos e maior produção de poluentes para explicitar a relevâncias das etapas dentro do sistema produtivo do cimento.

Os cimentos Portland avaliados neste estudo foram escolhidos a partir da sua participação no mercado. De acordo com os dados publicados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2013a), os cimentos Portland composto, de alto forno e pozolânico tiveram, aproximadamente, 91% de participação da produção anual da indústria cimenteira brasileira em 2012. Ao mesmo tempo, foi feita uma comparação a partir de dados publicados por Boesch e Hellweg (2010) quanto à participação de mercado europeia da produção de cimentos Portland, como pode ser visto no quadro 5.

Quadro 5 – Tipos de cimento da indústria brasileira e europeia, composição e participação no mercado

Tipo de cimento	Abreviatura	Clínquer + sulfato de cálcio (limites superior e inferior)	Adições minerais	Participação de mercado (%)	Fonte
Norma brasileira					
Cimento Portland referência	CP REF	67% <sup>1</sup>	escória de alto forno	-	WBCSD
Cimento Portland composto	CP II-E	94 - 56%/75% <sup>2</sup>	escória de alto forno	61,1%	NBR 11578
	CP II-F	94 - 90%/92% <sup>2</sup>	material carbonático		
	CP II-Z	94 - 76%/85% <sup>2</sup>	material pozolânico		
Cimento Portland de alto forno	CP III	65 - 25%/45% <sup>2</sup>	escória de alto forno	15,4%	NBR 5735
Cimento Portland pozolânico	CP IV	85 - 45%/65% <sup>2</sup>	material pozolânico	14,8%	NBR 5736
Norma europeia					
Cimento Portland composto	CEM II/B-S	94 - 65%	escória de alto forno	57%	EN 197-1
	CEM II/A-L	94-80%	material carbonático		
	CEM II/A-P	79-65%	material pozolânico		
Cimento de alto forno	CEM III/A	64-35%	escória de alto forno	5%	
Cimento pozolânico	CEM IV/A	65-89%	material pozolânico	6%	

<sup>1</sup>Cimento referência da indústria brasileira, relação clínquer/cimento de 0,67, adições minerais compostas majoritariamente por escória de alto forno (dados obtidos pelo projeto Getting the Numbers Right do WBCSD, 2014)

<sup>2</sup>Percentual médio para relação clínquer/cimento utilizados nos cimentos Portland da norma brasileira

(fonte: adaptado de BOESCH; HELLWEG, 2010; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013a; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014a)

Os processos disponíveis referentes à fabricação de cimento Portland na base de dados utilizada neste estudo – *Ecoinvent* – são caracterizados para as normas europeia (EN-197) e americana (ASTM). Como existem muitas similaridades entre os cimentos brasileiros e europeus, utilizou-se de processos dos tipos de cimentos considerados equivalentes aos cimentos nacionais

estudados. Essa consideração levou em consideração o limite de substituintes de clínquer e o tipo de adições utilizadas.

A partir dos limites definidos por norma de cada tipo de cimento, foi estabelecido o valor médio da relação clínquer/cimento para cada tipo de cimento avaliado na análise. Também é citado um cimento Portland referência, considerado pela representatividade do cimento Portland produzido pela indústria cimenteira nacional. Esta representação considera a relação clínquer/cimento da indústria brasileira (0,67), adições minerais empregadas – majoritariamente escória de alto forno – e o consumo de recursos energéticos apresentados pela publicação de dados das indústrias brasileiras pelo projeto “*Getting the Numbers Right*” (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014a).

### 6.1.3 Coleta de dados do ciclo de vida

A etapa de coleta de dados foi realizada a partir da base de dados internacional *Ecoinvent* – versão 2.2 e 3.1 – e de dados obtidos de relatórios publicados pela indústria nacional (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA et al., 2012; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013a; BRASIL, 2013) e publicados pela organização WBCSD obtidos pelas indústrias brasileiras participantes do fórum *Cement Sustainability Initiative* (CSI) (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014a).

No caso dos dados obtidos pelo banco de dados da *Ecoinvent*, por serem considerados dados secundários, teve-se a preocupação em obtê-los com no máximo 10 anos da data de publicação, de forma a se manter a qualidade nos dados de inventário do ciclo de vida. No caso dos dados obtidos para indústria cimenteira nacional, estes são considerados primários, pois são coletados das indústrias em estudo, e para confiabilidade dos dados, o ano de estudo foi o de 2012, dentro do limite de 5 anos, requerido por norma (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2013).

Estudos como de Feiz et al. (2014) comentam que os dados de recursos naturais, energéticos, resíduos e emissões foram obtidos diretamente da planta industrial analisada. Valderrama et al. (2012) também citam que o inventário dos processos de fabricação de clínquer Portland foram obtidos a partir de um banco de dados das plantas avaliadas no estudo. Ambos estudos foram elaborados com dados primários para processos elementares e utilização de banco de dados

internacional para a cadeia de fornecedores. Entretanto, como a análise deste estudo visa um panorama nacional da indústria cimenteira, a utilização de dados obtidos pelos relatórios publicados pelas organizações industriais nesta etapa é adequada.

### 6.1.3.1 Produção de energia térmica e elétrica

Através de relatórios publicados para indústria (BRASIL, 2013), referentes ao consumo de recursos energéticos no ano de 2012, pode-se obter a matriz energética da indústria cimenteira nacional. A partir disto foram estabelecidos os percentuais de participação de cada tipo de combustível, tabela 5.

Tabela 5 – Matriz de combustíveis utilizados nas indústrias cimenteiras europeias e brasileiras, em %

Combustíveis	Europa	Brasil
Carvão mineral	24%	2,3%
Carvão vegetal	5%	4,1%
Coque de petróleo	48%	81%
Gás natural	1%	0,7%
Oléo combustível	4%	0,4%
Outras não especificadas*	18%	11%
Total	100%	100%

\*Biomassa, lenha, pneus, resíduos de combustíveis fósseis

(fonte: adaptado de BOESCH; HELLWEGG, 2010; BRASIL, 2013)

Os consumos observados para a indústria brasileira têm grande distinção em relação à indústria europeia, tabela 5. Além da maior participação de coque de petróleo, a utilização de co-processamento e recursos alternativos nas plantas industriais é superior para as indústrias europeias, em relação ao cenário nacional (BOESCH; HELLWEGG, 2010).

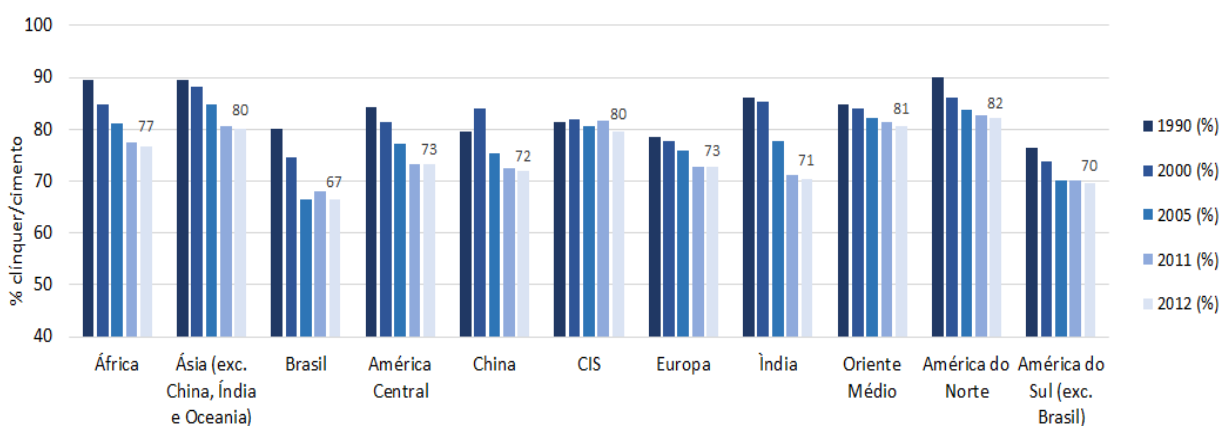
A matriz energética para produção dos cimentos avaliados foi obtida da base *Ecoinvent*, utilizando a matriz energética brasileira disponível no inventário. Demais dados que não estavam disponíveis mantiveram-se como na base, pois as tecnologias são similares nas etapas de moagem de cimento. Para o caso do cimento referência, alterou-se os dados de produção de energia elétrica com a base de dados fornecida pelo projeto “*Getting the Numbers Right*” (GNR), (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014a). De acordo com a base de dados do GNR, a indústria brasileira, em 2012, para produção de

clínquer Portland teve como consumo de energia 73 kWh/tonelada de clínquer e 103 kWh/tonelada de cimento produzida.

### 6.1.3.2 Adições minerais

A partir dos dados fornecidos para as indústrias participantes do CSI (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014a), a indústria cimenteira brasileira, em 2012, produziu cimentos com relação clínquer/cimento de 0,67. Pela figura 18, dentre as indústrias parceiras do fórum, é o menor percentual utilizado no mercado do cimento Portland.

Figura 18 – Relação clínquer/cimento das indústrias cimenteiras participantes do estudo “Getting the numbers right” (em %)



(fonte: adaptado de WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2014a)

Os impactos gerados no ciclo de vida das adições minerais utilizadas no cimento não foram considerados, pois estes são consequência dos processos indústrias dos fornecedores, como exemplo a cinza volante e a escória de alto forno, em que seus impactos são gerados, respectivamente, nas usinas termoelétricas e indústrias de alto forno para produção de ferro fundido (ou ferro gusa). Por isso, para este estudo, estas adições foram consideradas inertes em relação ao impacto gerado.

### 6.1.3.3 Transporte

Quanto aos dados de transporte considerados para o inventário do ciclo de vida do sistema produtivo do cimento Portland, foi utilizado o referencial da base de dados, pois este considerando a proporção de carga-distância (t\*km). Como o estudo avalia o cimento produzido em diferentes indústrias, situadas em regiões distintas da respectiva cadeia de fornecedores,

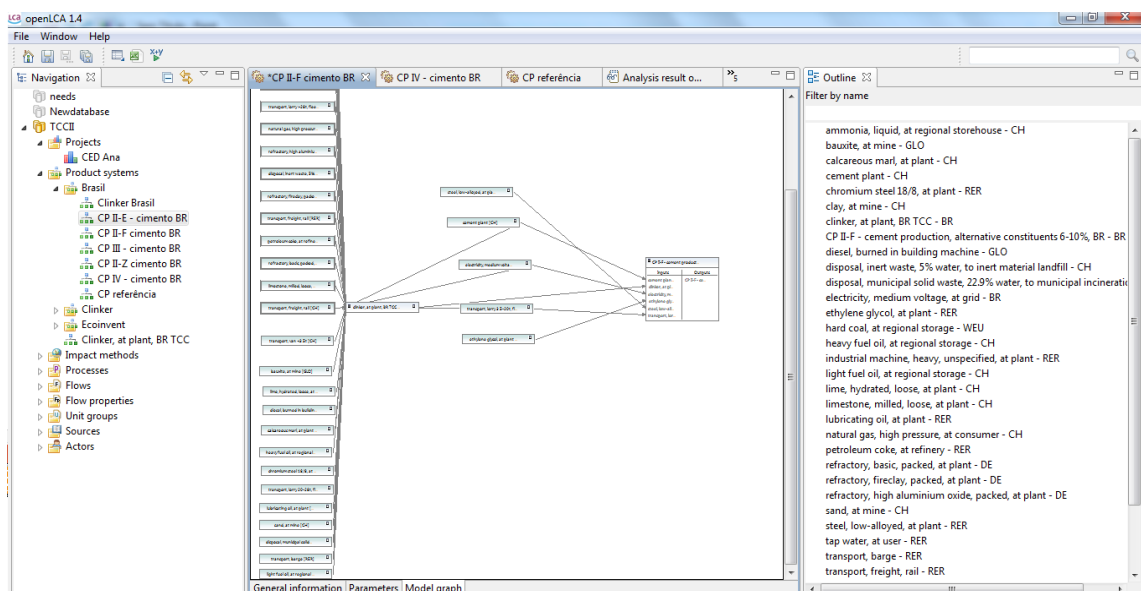
como matéria-prima, adições minerais e combustíveis, os valores foram mantidos conforme dados fornecidos pelo inventário da *Ecoinvent*.

## 6.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO CIMENTO

Após definido o escopo do estudo e coletados os dados para análise de inventário, fez-se uso do software *OpenLCA* para construção do sistema de produto e inserção da base de dados utilizada e adaptação dos dados obtidos para a indústria cimenteira nacional nos cimentos avaliados. Nesta etapa não foi considerado o uso de alocação de recursos nos processos elementares.

Na figura 19 apresenta-se o sistema de produto construído para cada tipo de cimento analisado. O processo de fabricação do clínquer foi considerado igual para todos os tipos de cimento estudados, as diferenças entre estes se encontram nos processos conectados diretamente à produção final do cimento, tal como a produção de combustíveis utilizados, produção de energia utilizada, transporte de insumos da planta industrial, recursos naturais e manutenção e operação de uma planta industrial de cimento.

Figura 19 – Sistema de produto do processo de fabricação de cimento Portland no software *OpenLCA*



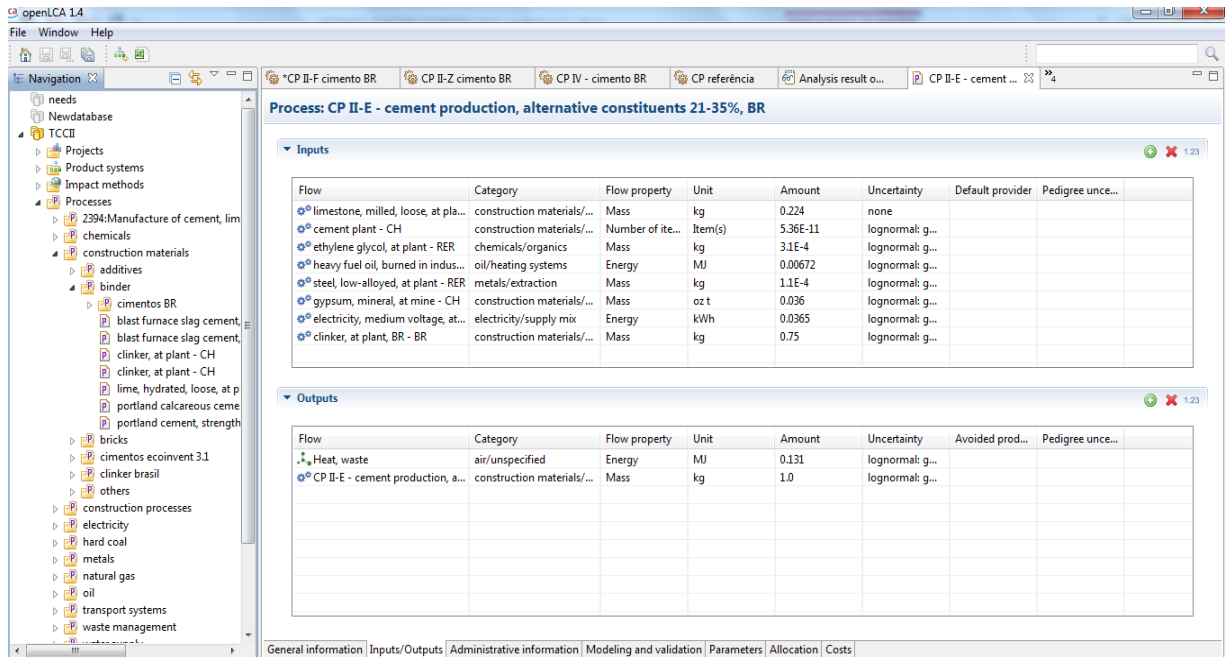
(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 20, apresenta-se a interface do software, onde pode-se visualizar todos os fluxos e dados de entrada e saída dos processos constituintes do sistema de produto da ACV. Nesta etapa



foram adaptados dados de entrada referentes aos dados coletados nas publicações realizadas pela indústria, conforme comentado no item 6.2.

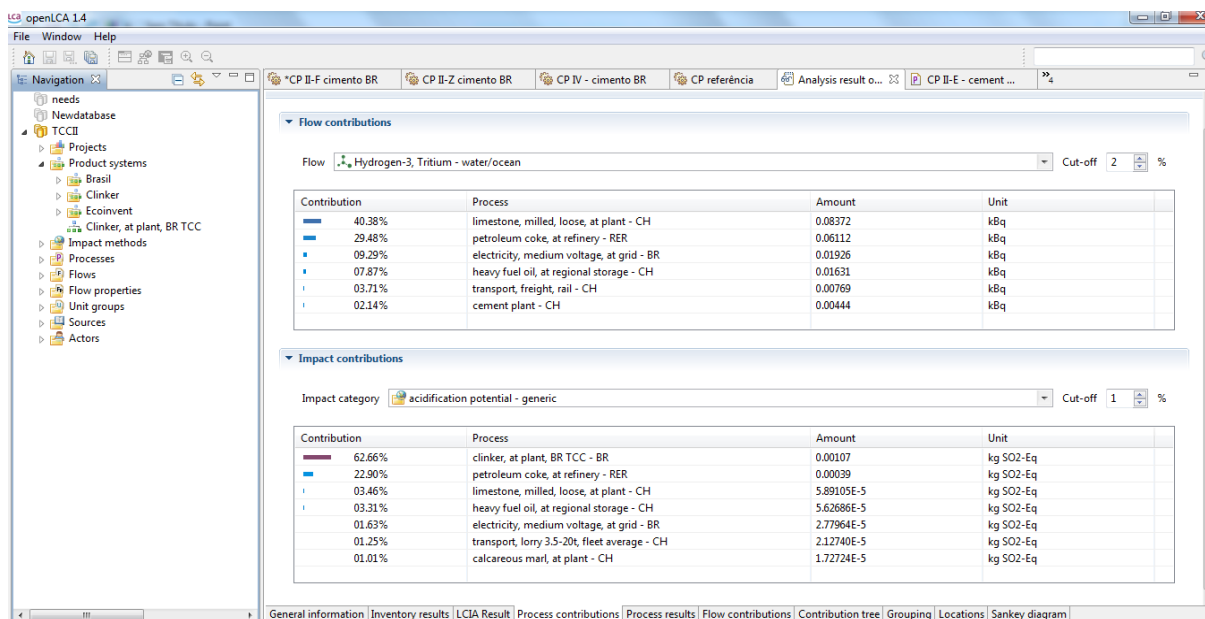
Figura 20 – Interface do software *OpenLCA* para dados de entrada e saída dos processos do sistema de produto da ACV



(fonte: elaborado pela autora)

Para a próxima etapa, a de avaliação dos impactos da ACV, o software foi uma ferramenta essencial devido à grande demanda de dados que influenciam os impactos gerados nas diferentes categorias avaliadas deste estudo. Além de fornecer os resultados dos impactos ambientais, o software também oferece a contribuição de cada fluxo elementar para geração dos impactos, figura 21.

Figura 21 – Interface de visualização de resultados das contribuições dos processos na avaliação dos impactos ambientais da ACV



(fonte: elaborado pela autora)

### 6.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA

Conforme regulamentação da norma inglesa (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2013), foram determinadas categorias de impacto ambiental relevantes para estudos de ACV em produtos utilizados na construção civil. No quadro 6, apresentam-se as categorias de impactos utilizadas para este estudo. Com exceção da mudança climática, em que este é obtido pela metodologia de cálculo proposto pelo IPCC 2007, os demais impactos são determinados pela metodologia da CML 2001. Somando-se a isso, também foi utilizada a metodologia de Demanda de Energia Acumulada (CED), que avalia os diferentes tipos de recursos energéticos renováveis e não-renováveis utilizados em todo processo avaliado.

Há uma gama de metodologias de impactos para se avaliar quando se faz uma análise do ciclo de vida, porém, para a aplicação deste estudo, os potenciais mais relevantes são os listados no quadro 6. Após a definição dos impactos avaliados deve ser feita uma caracterização em que se obtém a quantificação dos potenciais de impactos, tendo, por fim, o perfil ambiental detalhado do produto em análise.

Quadro 6 – Categorias de impacto aplicadas na análise de ciclo de vida da fabricação do cimento Portland

Categorias de Impacto	Unidade
Mudança climática (IPCC 2007)	kg CO <sub>2</sub> -eq
Redução da camada de ozônio (CML 2001)	kg CFC-11 -eq
Ozônio fotoquímico (CML 2001)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
Acidificação (CML 2001)	kg SO <sub>2</sub> -eq
Eutrofização (CML 2001)	kg PO <sub>4</sub> -eq
Depleção de recursos não renováveis - elementos (CML 2001)	kg Sb -eq
Demanda de energia acumulada - energia (CED)	MJ, -eq

(fonte: elaborado pelo autora)

As demais etapas dentro da fase de AICV, normalização e definição de ponderadores dos impactos, não serão abordadas neste estudo. Devido à disponibilidade de estudos que apresentam seus resultados com a mesma métrica utilizada nesta pesquisa, a comparação de resultados não teve necessidade de normalização. A determinação de pesos também não foi realizada, pois foi dispensável para conclusão dos resultados.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram avaliados os impactos ambientais definidos para este estudo e são apresentados a seguir os quantitativos obtidos. A partir dos resultados, avaliaram-se os processos mais impactantes durante a produção do cimento Portland, segundo a contribuição dos processos na geração dos potenciais impactos ambientais avaliados. Também foram comparados os dados para observar as diferenças consequentes das adaptações realizadas com a coleta de dados da indústria brasileira em relação à base de dados internacional da indústria europeia.

### 7.1 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV)

Na tabela 6, são apresentados os resultados obtidos da avaliação dos impactos ambientais, separados para cimentos da indústria brasileira e cimentos da base de dados europeia.

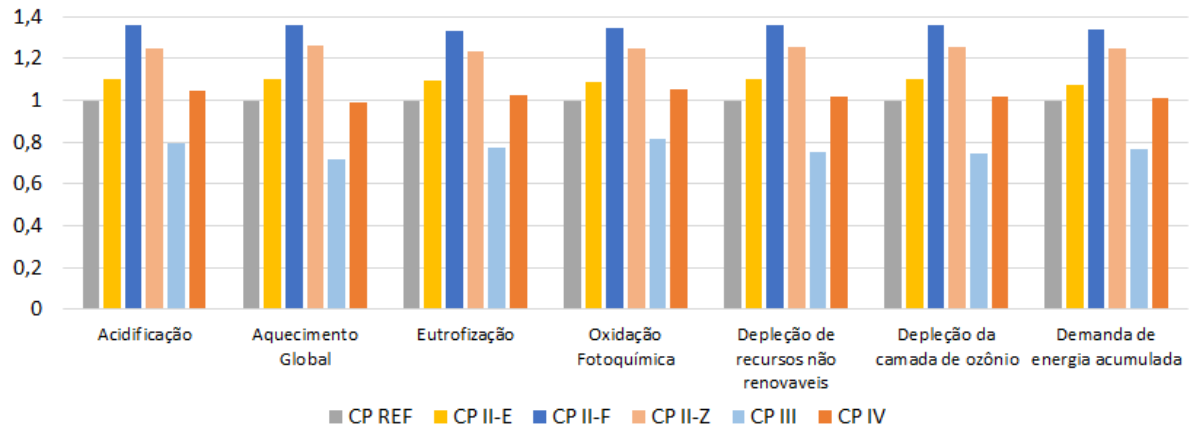
Tabela 6 – Avaliação dos impactos ambientais do processo de fabricação da indústria cimenteira brasileira e europeia

Cimento Portland	Aquecimento Global (kg CO <sub>2</sub> -eq)	Acidificação (kg SO <sub>2</sub> -eq)	Eutrofização (kg PO <sub>4</sub> -eq)	Depleção da Camada de Ozônio (kg CFC-11 -eq)	Oxidação fotoquímica (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq)	Depleção de recursos não-renováveis (kg Sb -eq)	Demanda de energia acumulada (MJ -eq)
<b>Tipos de cimento - Indústria Brasileira</b>							
CP REF	639,0	1,254	0,201	3,621E-05	4,823E-02	1,941	4,560
CP II-E	704,5	1,387	0,220	3,992E-05	5,256E-02	2,141	3,609
CP II-F	871,2	1,702	0,268	4,935E-05	6,506E-02	2,634	7,039
CP II-Z	806,7	1,570	0,248	4,556E-05	6,029E-02	2,436	3,613
CP III	456,8	0,996	0,156	2,712E-05	3,920E-02	1,466	3,465
CP IV	634,1	1,315	0,206	3,686E-05	5,065E-02	1,975	1,386
<b>Tipos de cimento - Indústria Europeia</b>							
CEM II/B-S	687,5	1,127	0,229	1,71E-05	3,68E-02	1,332	3,368
CEM II/A-L	718,9	1,172	0,234	1,78E-05	3,81E-02	1,380	3,377
CEM II/A-P	754,6	1,225	0,247	1,85E-05	3,99E-02	1,447	3,613
CEM III/A	449,3	0,840	0,154	1,29E-05	2,87E-02	0,960	3,613
CEM IV/A	683,5	1,193	0,233	1,83E-05	3,96E-02	1,386	3,426

(fonte: elaborado pela autora)

Para se visualizar a diferença dos impactos entre os cimentos da indústria brasileira, adotou-se o cimento CP REF como referência, pois foi considerado neste estudo como o cimento que representa a indústria brasileira, para os dados obtidos nos relatórios de 2012. Os valores dos impactos foram normalizados para se ter uma comparação do impacto gerado em cada tipo de cimento, figura 22.

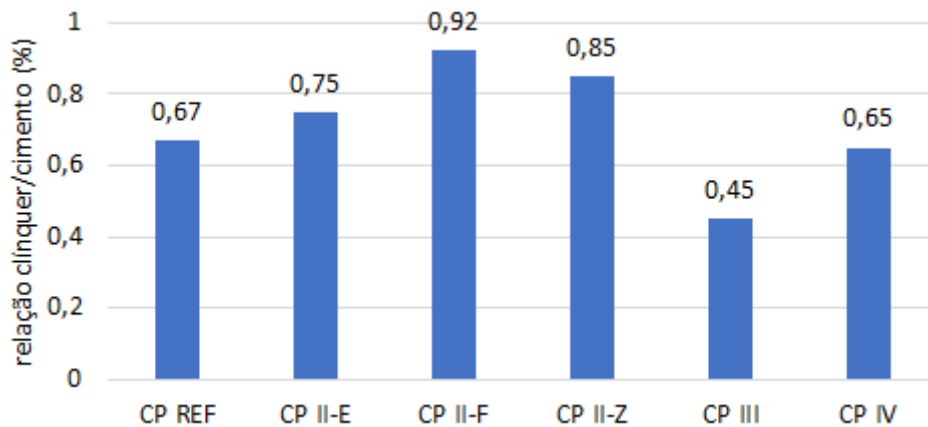
Figura 22 – Relação entre cimentos da indústria brasileira pelos impactos ambientais resultantes



(fonte: elaborado pela autora)

Observando a proporção da relação de clínquer/cimento dos cimentos avaliados, figura 23, pode-se notar que esta razão influencia os resultados obtidos. O intuito desta comparação não é de análise entre cimentos, mas sim para visualizar que os recursos utilizados na produção do clínquer influenciam proporcionalmente à razão clínquer/cimento os impactos avaliados.

Figura 23 – Relação clínquer/cimento dos tipos de cimento avaliados na ACV



(fonte: elaborado pela autora)

## 7.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS INDÚSTRIAS NACIONAL E EUROPEIA

A utilização de uma análise comparativa para este estudo serve como validação e direcionamento dos resultados, analisando o comportamento de outro cenário industrial avaliado pela mesma análise da ACV. Para validação, se fez uso do estudo elaborado por Boesch e Hellweg (2010), em que se avaliaram os impactos da produção de cimentos da indústria europeia através de um modelo de quantificação de impactos ambientais do ciclo de vida de cimentos Portland. Entre os cimentos avaliados, foram selecionados os cimentos que continham composições similares a avaliadas neste estudo.

Para direcionamento, foi feita uma análise comparativa com os cimentos da indústria europeia com o inventário da base de dados em que foi feita a adaptação com os dados da indústria nacional. Podendo-se assim compreender o impacto dos dados adaptados no inventário do ciclo de vida de fabricação do cimento Portland produzido no Brasil.

### 7.2.1 Indústria cimenteira europeia por Boesch e Hellweg

Boesch e Hellweg (2010) avaliaram os impactos de mudança climática, acidificação e eutrofização, para a indústria europeia. Na tabela 7, são apresentados os valores obtidos pelo estudo e um comparativo com o estudo aqui aplicado. Para uma comparação direta entre os cimentos, não foi considerado o cimento referência (CP REF) na tabela e gráficos citados.

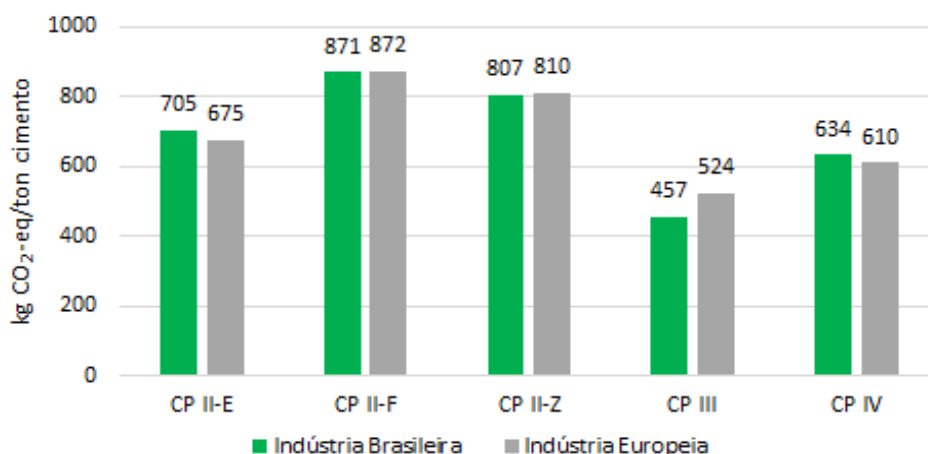
Tabela 7 – Comparativo dos impactos ambientais entre os dados da indústria brasileira e da indústria europeia por Boesch e Hellweg (2010)

Cimento Portland	Clínquer/Cimento (%)	Aquecimento Global (kg CO <sub>2</sub> -eq)	Acidificação (kg SO <sub>2</sub> -eq)	Eutrofização (kg PO <sub>4</sub> -eq)
<b>Indústria Brasileira</b>				
CP II-E	75%	705	1,386	0,220
CP II-F	92%	871	1,702	0,268
CP II-Z	85%	807	1,570	0,248
CP III	45%	457	0,996	0,156
CP IV	65%	634	1,315	0,206
<b>Indústria Europeia</b>				
CEM II/B-S	72%	675	1,720	0,223
CEM II/A-L	94%	872	2,190	0,285
CEM II/A-P	87%	810	2,040	0,265
CEM III/A	49%	524	1,420	0,334
CEM IV/A	65%	610	1,550	0,237

(fonte: elaborado pela autora e dados adaptados de BOESCH; HELLWEG, 2010)

Para ambos os estudos, o cimento Portland de escória de alto forno apresentou os menores valores de impacto ambiental devido ao percentual de clínquer/cimento na sua composição. Nas figuras 24, 25 e 26, ilustra-se a relação entre os impactos avaliados para cada tipo de cimento.

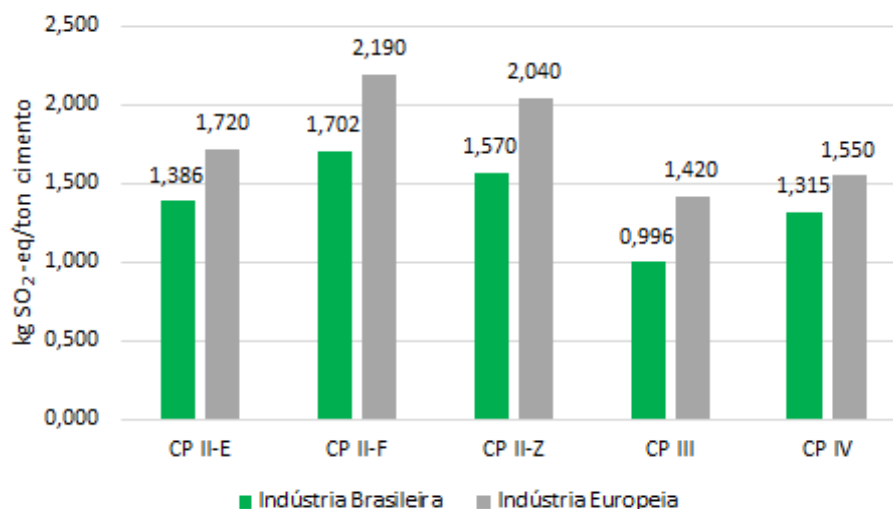
Figura 24 – Comparação dos impactos gerados de mudança global dos cimentos da indústria brasileira e europeia (kg CO<sub>2</sub>-eq./tonelada cimento)



(fonte: elaborado pela autora)

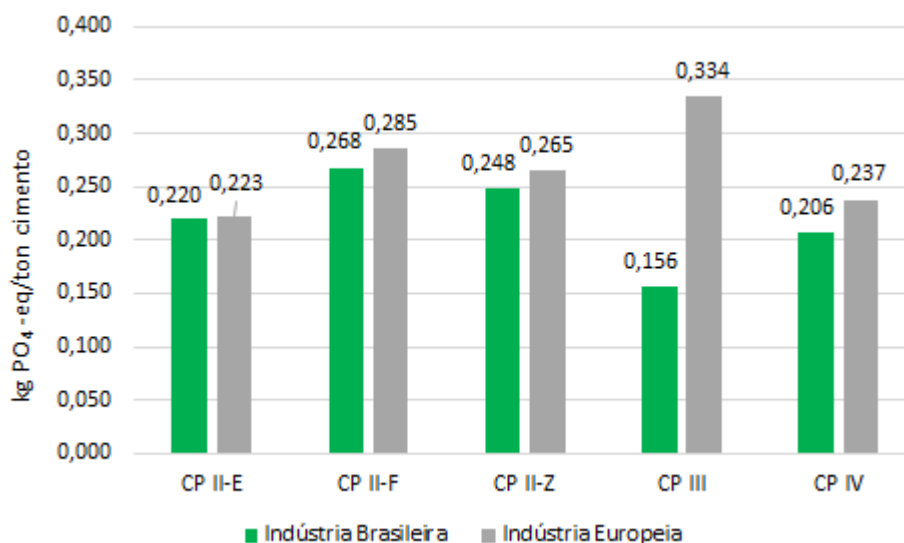
Na figura 24, os resultados observados para os cimentos de ambos estudos são similares, inclusive podendo-se observar a mesma proporção de impacto em relação a proporção de clínquer/cimento de cada tipo avaliado.

Figura 25 – Comparação dos impactos gerados de acidificação dos cimentos da indústria brasileira e europeia (kg SO<sub>2</sub>-eq./tonelada cimento)



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 26 – Comparação dos impactos gerados de eutrofização dos cimentos da indústria brasileira e europeia (kg PO<sub>4</sub>-eq./tonelada cimento)



(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 25 e 26, os resultados observados para a indústria cimenteira nacional são inferiores aos obtidos para indústria europeia. Como os dados elaborados no estudo de Boesch e Hellweg (2010), colaboraram com os dados da indústria europeia na base de dados da *Ecoinvent*, a avaliação de contribuição por processos, apresentada no próximo item, auxiliou na compreensão das causas destes valores observados.

### 7.2.2 Indústria cimenteira europeia pela base de dados

Nesta etapa da pesquisa, foi feita uma comparação com a base de dados utilizada e os dados obtidos com a base de dados adaptada ao cenário industrial nacional. Para melhor visualização da contribuição de cada processo, apresentam-se os impactos com a proporção das etapas de impacto mais significativo do processo de fabricação do cimento Portland.

Os processos com mais de 1% de contribuição para cada impacto avaliado foram considerados nos gráficos apresentados abaixo. Destes processos cabe citar e definir:

- produção de clínquer – etapa representa o impacto gerado no processo de fabricação de clínquer Portland;
- produção de combustíveis – etapa representa o impacto gerado na produção de combustíveis utilizados na fabricação do cimento, não considerando utilização de resíduos ou combustíveis alternativos;

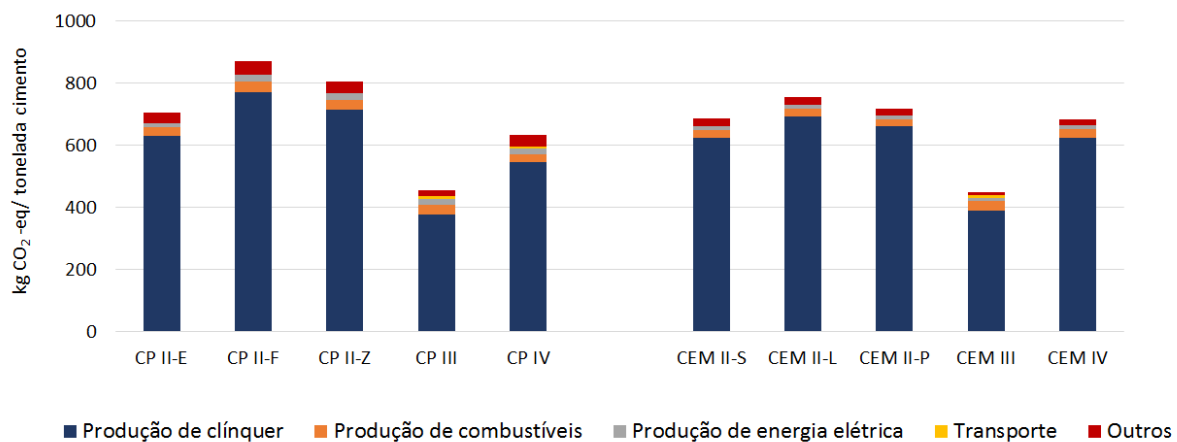


- c) produção de energia elétrica – etapa representa o impacto gerado na produção de energia elétrica consumida na fabricação do cimento;
- d) transporte – representa o impacto gerado nos transportes de recursos e subprodutos no ciclo de vida do produto;
- e) planta industrial – representa o impacto da manutenção e utilização de uma planta industrial de cimento;
- f) produção de matérias-primas – representa o impacto na produção e fornecimento de calcário e argila para produção de cimento;
- g) outros – representa o somatório de processos que tem menos de 1% de contribuição no impacto avaliado.

### 7.2.2.1 Mudança climática

O impacto de mudança climática é definido pela quantidade de kg CO<sub>2</sub> equivalente emitido para produção de 1 tonelada de cimento, figura 27.

Figura 27 – Comparativo do impacto de mudança climática entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu

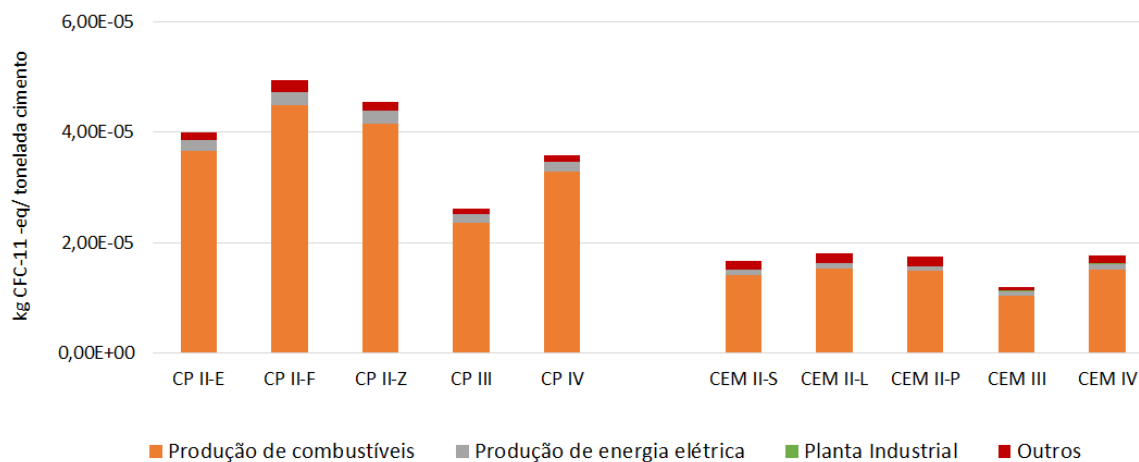


(fonte: elaborado pela autora)

### 7.2.2.2 Depleção da camada de ozônio

Na figura 28 são apresentados os valores obtidos para indústria brasileira e europeia dos impactos gerados relativos à depleção da camada de ozônio. Nota-se, neste fator, que os valores dos cimentos brasileiros são consideravelmente superiores aos valores obtidos pela base de dados da utilizada. Isto se deve ao fato de que a maior contribuição deste impacto é gerada, para os cimentos brasileiros, pelo consumo de coque de petróleo na produção, dado adaptado para indústria nacional.

Figura 28 – Comparativo do impacto da depleção da camada de ozônio entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu

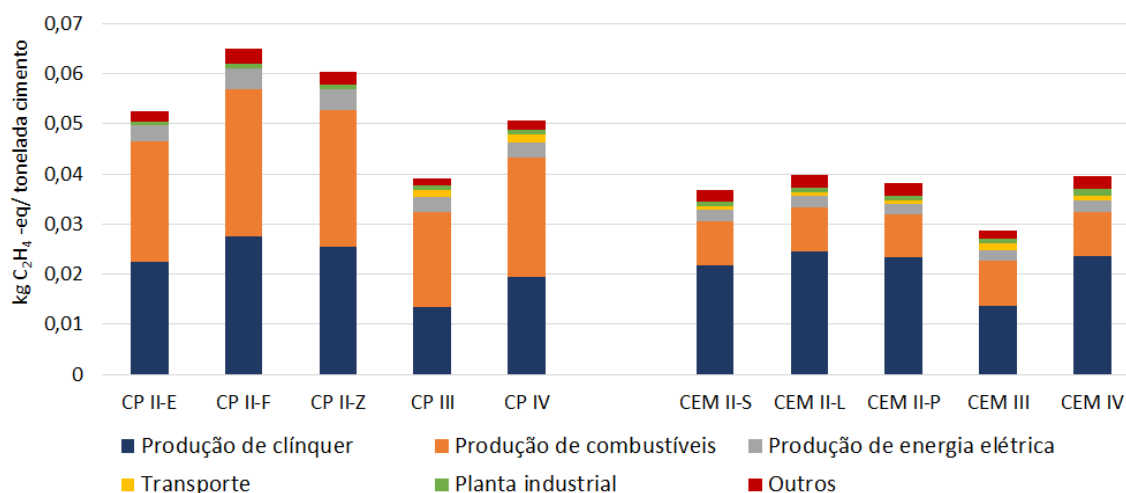


(fonte: elaborado pela autora)

### 7.2.2.3. Oxidação fotoquímica

Na figura 29 são apresentados os valores obtidos para indústria brasileira e europeia dos impactos gerados relativos à oxidação fotoquímica. A contribuição da produção do coque de petróleo elevou o impacto gerado do cimento produzido na indústria brasileira, em relação aos dados observados para a indústria europeia. Entretanto, pode-se observar também que o processo de produção de clínquer é menos impactante, em relação a oxidação fotoquímica, no caso dos cimentos nacionais.

Figura 29 – Comparativo do impacto da oxidação fotoquímica entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu

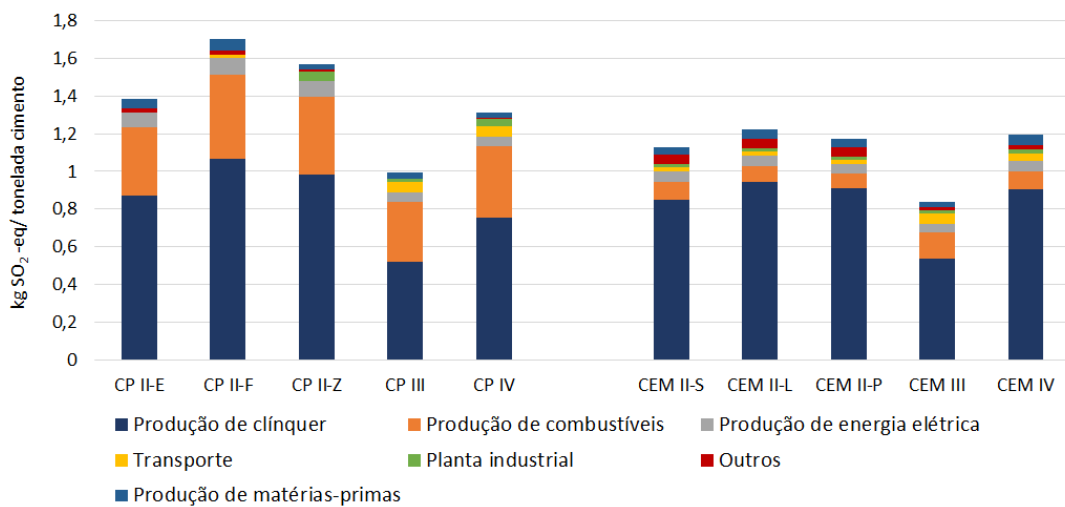


(fonte: elaborado pela autora)

#### 7.2.2.4 Acidificação

Para os valores obtidos para impactos gerados quanto à acidificação, figura 30, os cimentos avaliados na indústria brasileira tiveram valores superiores devido à utilização de coque de petróleo na matriz energética da indústria brasileira. Para os cimentos da base de dados europeia, a contribuição para este impacto é gerada principalmente pela produção do clínquer Portland.

Figura 30 – Comparativo do impacto da acidificação entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu

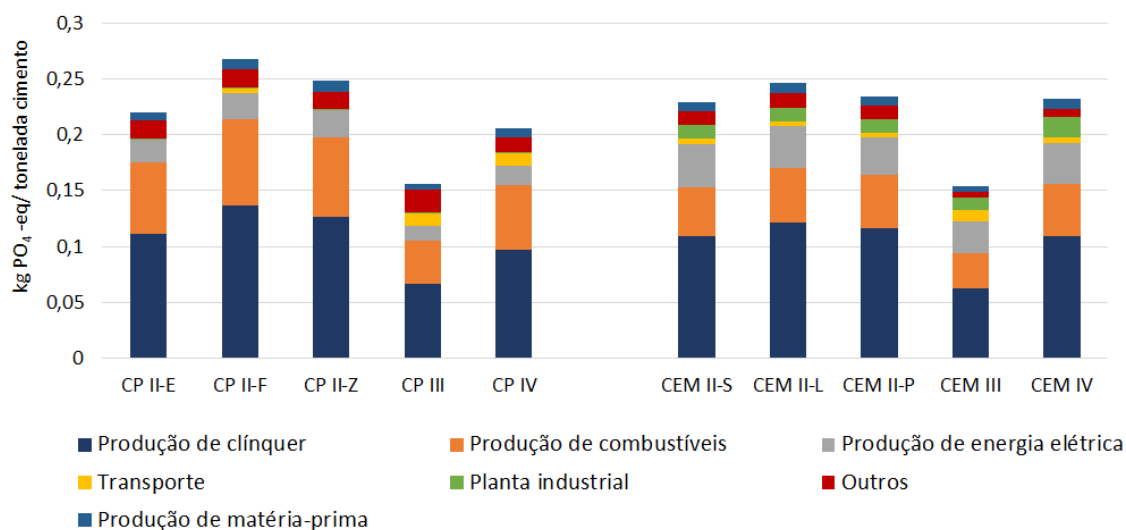


(fonte: elaborado pela autora)

#### 7.2.2.5 Eutrofização

Para avaliação dos impactos de eutrofização gerados, figura 31, pela produção de cimento Portland, a contribuição de cada etapa de processo se diferencia em relação aos outros impactos avaliados. Em relação aos cimentos avaliados neste estudo, os valores obtidos se distribuem, principalmente, entre produção do clínquer, produção de combustíveis e energia elétrica. No caso dos cimentos europeus, as contribuições entre processos se distribuem mais, resultando em um maior impacto em relação a produção de energia elétrica.

Figura 31 – Comparativo do impacto da eutrofização entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu

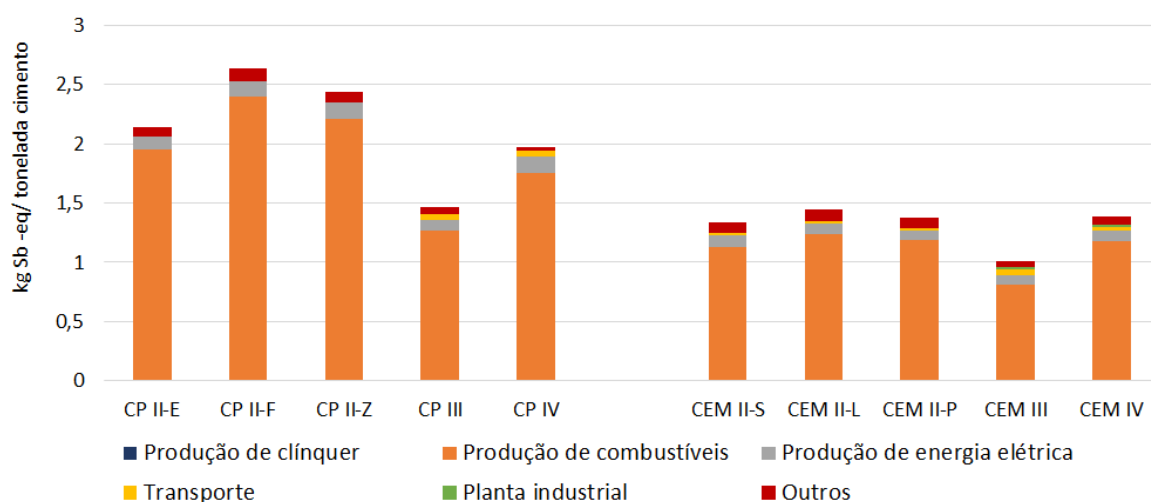


(fonte: elaborado pela autora)

#### 7.2.2.6 Depleção de recursos não renováveis

Na figura 32, apresentam-se os valores comparativos para impacto de depleção de recursos não renováveis. Devido a maior contribuição da utilização de coque de petróleo na matriz energética, em relação a matriz europeia, os valores gerados a partir da base de dados europeia são inferiores aos avaliados nesta pesquisa. Nota-se, também, uma diferenciação entre os cimentos, pois cimentos com maior relação clínquer/cimento demandam uma quantidade superior de recursos quando comparados a cimentos com grande quantidade de adições minerais.

Figura 32 – Comparativo do impacto da depleção de recursos não renováveis entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu

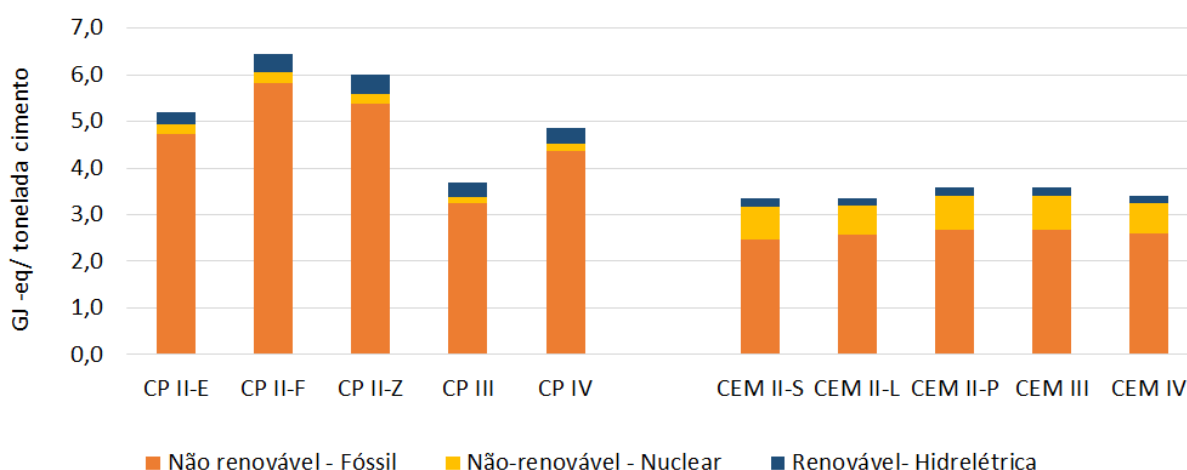


(fonte: elaborado pela autora)

### 7.2.2.7 Demanda de energia acumulada (CED)

Na figura 33, apresentam-se os resultados obtidos da demanda de energia acumulada no processo de fabricação dos cimentos avaliados. Nota-se uma grande diferença de proporção entre os tipos de energia consumidos, devido à adaptação dos dados dos recursos energéticos utilizados na indústria brasileira. Conforme já dito antes, a demanda de coque de petróleo tem grande influência no aumento dos impactos negativos. Ao mesmo tempo, a indústria brasileira não faz uso intensivo de energia nuclear, tendo impacto reduzido, como se vê nos resultados apresentados. Em contraponto, há maior participação da energia hidrelétrica, principal fonte de energia elétrica nacional.

Figura 33 – Comparativo do impacto da demanda de energia acumulada entre cimentos brasileiros e cimentos do banco de dados europeu



## 7.3 IDENTIFICAÇÃO DE *HOT SPOTS* NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

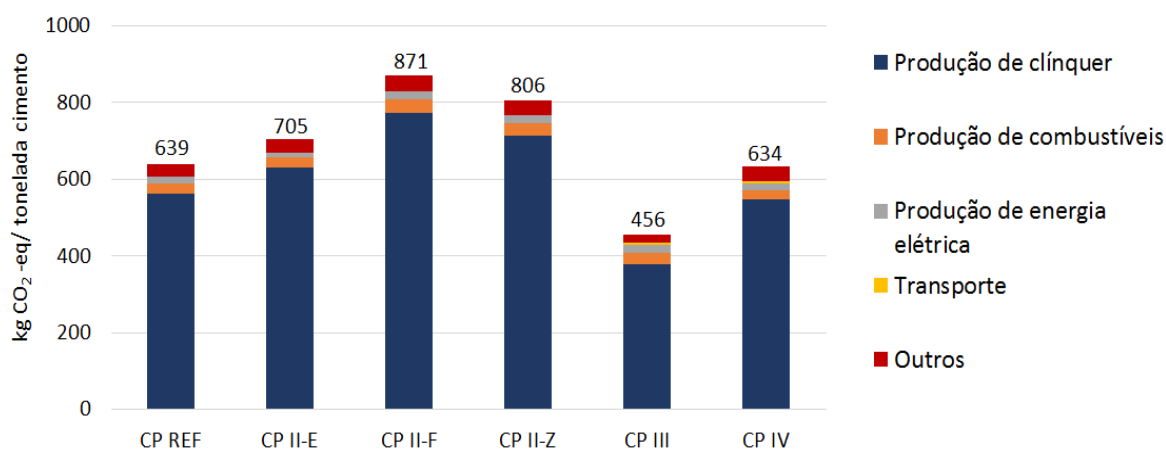
Tendo-se avaliado todos os impactos, foi feita uma análise para visualizar os diferentes processos e contribuições dos mesmos na fabricação do cimento Portland. Dentre os resultados, pode-se notar que os processos de consumo de recursos energéticos e a produção de clínquer foram os mais impactantes na produção dos cimentos avaliados. Por isso, foi feita uma análise específica nos impactos de mudança climática e demanda de energia acumulada.

O impacto ambiental referente à mudança climática detalha os processos que mais contribuem para emissão de gases do efeito estufa (em kg CO<sub>2</sub>) equivalentes durante o processo de fabricação e a demanda de energia acumulada (CED) avalia os recursos energéticos utilizados em todo processo de fabricação do cimento.

No caso de mudança climática, verifica-se, assim que a fabricação do clínquer é a fase de maior contribuição para os impactos ambientais avaliados no sistema produtivo do cimento.

Na figura 34, apresenta-se a contribuição para cada processo na fabricação de cimento, relativo aos impactos gerados em relação à mudança climática, para produção de cimento.

Figura 34 – Contribuição por processo relativo ao impacto de mudança climática dos cimentos da indústria brasileira (kg CO<sub>2</sub> –eq./tonelada de cimento)



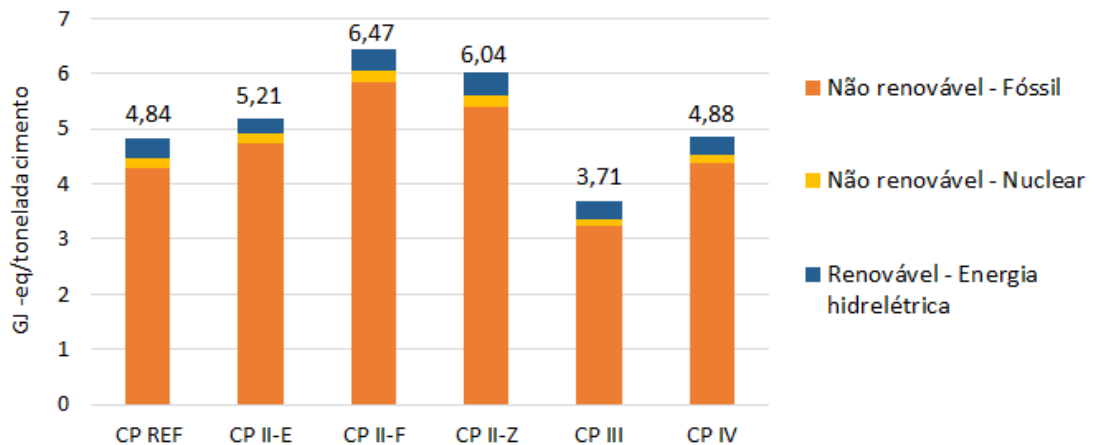
(fonte: elaborado pela autora)

Analisando o impacto da produção de clínquer, para de 1 tonelada de clínquer produzido, obteve-se o valor de 931kg CO<sub>2</sub> equivalente emitidos. Estudos como de Boesch et al. (2009), e Valderrama et al. (2012), obtiveram 937 kg CO<sub>2</sub> equivalente e 987 kg CO<sub>2</sub> equivalente, respectivamente, para produção de clínquer Portland nas indústrias avaliadas. Frente aos resultados encontrados neste estudo, a diferença do clínquer produzido no Brasil é de 2,66% e 7,59% menos impactante.

Conforme exposto pela figura 34, a produção de clínquer Portland em relação a todo processo de fabricação cimento é a mais impactante, frente aos impactos ambientais gerados, neste caso de mudança climática. Ao mesmo tempo, a figura 35 apresenta os valores observados de consumo de energia para cada tipo de cimento avaliado. Nota-se que o consumo de energia é

proporcional a relação de clínquer/cimento, devido à elevada demanda de combustíveis fósseis na etapa de produção de clínquer Portland.

Figura 35 – Contribuição por processo relativo ao impacto da demanda de energia acumulada (CED) dos cimentos da indústria brasileira (GJ –eq/tonelada cimento)

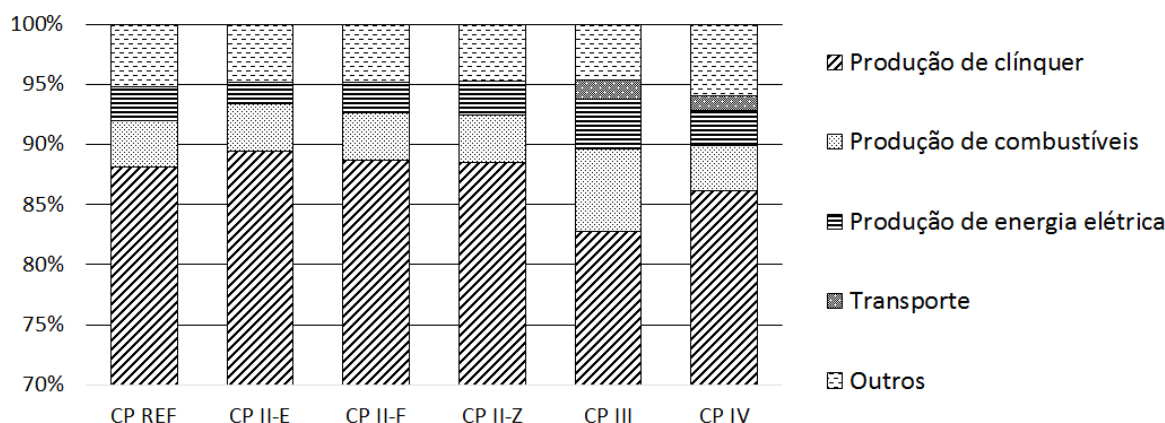


(fonte: elaborado pela autora)

Os valores observados para demanda de energia têm grande impacto gerados pelo elevado consumo de combustíveis fósseis, no caso o coque de petróleo. Como apresentado antes, a indústria europeia tem uma matriz energética caracterizada pelo uso de carvão e resíduos, somados a uso de derivados de petróleo, o que torna o impacto menor, frente aos obtidos para a matriz energética brasileira.

Pela figura 36, observa-se a contribuição percentual de cada processo em relação aos impactos gerados na produção do cimento.

Figura 36 – Contribuição por processo dos cimentos da indústria brasileira para impacto de mudança climática (% para cada cimento)



(fonte: elaborado pela autora)

Com base na proporção da contribuição por processo gerada para o impacto na geração de gases do efeito estufa, fica claro a identificação de etapas que poderiam ser feitas melhorias para aprimorar a eficiência da indústria, tanto em processo quanto consumo de recursos. Pois, pela figura 36, pode-se observar também que conforme se reduz a relação clínquer/cimento, outros processos começam a contribuir de forma mais representativa no impacto gerado. Caso do consumo energético para moagem do cimento e no preparo de adições minerais para composição dos cimentos tipo CP III e CP IV.

A adoção de medidas que contribuam para a eficiência energética e redução de consumo de recursos na fase de produção de clínquer é essencial para mitigação dos impactos gerados na indústria cimenteira atual. Investimentos em melhorias na planta industrial e implantação do co-processamento nos fornos rotativos é uma das várias oportunidades que as indústrias têm para aprimorar seu sistema de produção, uma vez que fica constatado, através dos resultados deste estudo, a pronunciada participação do processo de produção do coque de petróleo nas distintas categorias de impacto avaliadas.

O item 4.2 que comenta sobre as novas tecnologias aplicadas na indústria apresenta alguns exemplos de plantas industriais nacionais que já estão operando com maior eficiência energética. Porém, para alcançar as metas propostas, os investimentos devem abranger um maior número de unidades industriais, com o objetivo de expandir o setor industrial de forma sustentável, garantindo a qualidade do cimento produzido e capacidade para atender a demanda de mercado.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em 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.

Ao mesmo tempo, existe, por parte da sociedade, uma preocupação com os materiais utilizados e serviços contratados pelo governo, a partir da criação de cartilhas e guias como o da Lei das Compras Sustentáveis. Estes guias fornecem diretrizes para compras públicas e empresariais possam, mesmo através de licitações, utilizar opções com menor impacto ambiental considerando a Avaliação do Ciclo de Vida dos produtos, certificações e políticas de resíduos como meio de escolha, com o objetivo de incentivar a sustentabilidade nas compras do governo, que representam entre 8% a 25% do PIB nacional.

Um exemplo disto pode ser comparar a compra de cimentos importados em relação aos cimentos nacionais. Visto que no caso do produto importado, por ter uma grande distância percorrida para atender ao cliente, os impactos seriam maiores em relação aos produtos nacionais. Inclusive no caso desta pesquisa, os impactos gerados pelo transporte de recursos naturais dentro do sistema produtivo, por serem considerados próximos às indústrias, não foram impactantes em relação à contribuição gerada na produção do clínquer.

A Avaliação do Ciclo de Vida representa uma análise dos impactos gerados nos processos constituintes do sistema do produto em estudo. E além de uma descrição do produto, a ACV pode ser utilizada na tomada de decisões de empresas com modificações desde fornecedores a própria planta industrial avaliada. Somando a isto, a ferramenta também pode envolver os custos e aspectos sociais, englobando todas as esferas da sustentabilidade.

Entretanto, a existência de dados para aplicação da ACV é de grande relevância, pois como visto neste estudo, a adaptação de dados de inventário realizada com dados de literatura alterou os resultados dos impactos ambientais da ACV, comparado com os impactos gerados pelos

cimentos avaliados com o banco de dados europeu. Esta adaptação adequou o estudo à realidade local do País, possibilitando uma melhor interpretação dos impactos gerados no processo de fabricação do cimento e também favorecendo a criação de uma base de dados nacional.

Desta forma, pode-se constatar que a análise de inventário da ACV é uma das etapas mais complexas, devido à restrição de dados disponíveis para esta pesquisa serem principalmente de inventários internacionais, com reduzida representatividade local, no caso da indústria brasileira. Mesmo assim, através da base de dados da *Ecoinvent* e de relatórios da indústria nacional, pode-se obter os dados e processos suficientes para aplicação da ACV e o software utilizado, *OpenLCA*, possibilitou o desenvolvimento dos cálculos de impactos e organização do inventário de dados do processo de fabricação dos cimentos avaliados.

Em relação à metodologia utilizada neste estudo, ACV atribucional, em que se avaliou o processo existente da indústria cimenteira nacional para se identificar os *hot-spots* do processo de fabricação do cimento Portland no País. Este método foi adequado visto o objetivo principal deste estudo, citado anteriormente. Para uma análise mais aprofundada, como a aplicação de melhorias nos pontos identificados na indústria, por exemplo, a metodologia da ACV consequential pode oferecer mais assertividade e um estudo mais complexo da indústria.

Entretanto, para elaboração de uma ACV consequential deve se considerar uma previsão das consequências geradas a partir das mudanças no processo, o que torna a metodologia consequential mais restrita se não há contato com a indústria. A troca de informações entre a área científica e a área industrial é essencial para desenvolvimento e evolução desta área.

Diante do que foi exposto, pode-se avaliar que, mesmo com as limitações encontradas para o que foi proposto no estudo, os dados e ferramentas disponíveis foram adequados para conclusão do objetivo final. O resultado deste estudo, mostrando a fase de produção do clínquer e combustíveis fósseis empregados como mais significativos na geração de impactos dentro do processo de fabricação do cimento Portland, serve como motivação para estudos de processos alternativos na indústria cimenteira nacional.

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.

## REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. 2th. London: Taylor & Francis, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Panorama do coprocessamento de resíduos em fornos de cimento** – 2012 (Brasil). Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://coprocessamento.org.br/cms/wp-content/uploads/2013/12/Panorama\\_Coprocessamento\\_2012.pdf](http://coprocessamento.org.br/cms/wp-content/uploads/2013/12/Panorama_Coprocessamento_2012.pdf)> Acesso em 10 nov. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991a.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991b.

\_\_\_\_\_. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991c.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991d.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: cimento Portland composto – especificação. Rio de Janeiro, 1991e.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14001**: sistemas de gestão ambiental – requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044**: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. **CEE-277** – comissão de estudo especial de compras sustentáveis. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:

<<http://www.cbic.org.br/sites/default/files/Minuta%201a%20%20Reuni%C3%A3o%20de%20Trabalho%20CEE%20277.pdf>> Acesso em 10 nov. 2014.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto**: ciência e tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 185-232.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; HASHIM, H. A novel design for green and economical cement manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, [Philadelphia], n. 22, p. 60-66, Sept. 2011. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611003507>> Acesso em 10 jun. 2014.

BETIOL, L. S.; UEHARA, T. H. K.; LALOË, F. K.; APPUGLIESE, F. K.; ADEODATO, S.; LÍGIA R.; NETO M. P. M. **Compra sustentável**: a força do consumo público e empresarial para uma economia verde e inclusiva. São Paulo, 2012. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80063/CompraSust\\_FGV.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80063/CompraSust_FGV.pdf)> Acesso em 10 nov. 2014.

BEUMER LTDA. **Transportadores de correia Beumer: a solução mais econômica para longas distâncias.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 6., 2014, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP; SNIC, 2014. Não paginado. 1 CD-ROM.

BOESCH, M. E.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production. **Environmental Science & Technology**, [Washington], n. 43, p. 7578-7583, Aug. 2009.

BOESCH, M. E.; HELLWEG, S. Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. **Environmental Science & Technology**, [Washington], n. 44, p. 9143-9149, Oct. 2010.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional 2013: ano 2012.** Brasília, 2013. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2013.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf)> Acesso em 10 jun. 2014.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **BRE environmental profiles 2013: product category rules for type III environmental product declaration of construction products to EM 15804:2012.** [Watford], 2013. Disponível em: <[http://www.bre.co.uk/filelibrary/BRE\\_EP\\_15804\\_PCR\\_final\\_version\\_II\\_for\\_public\\_consultation.pdf](http://www.bre.co.uk/filelibrary/BRE_EP_15804_PCR_final_version_II_for_public_consultation.pdf)> Acesso em: 10 jun. 2014.

CARVALHO, J.de. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil – Estudo de caso: comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos.** 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

CENTURIONE, S. L. **Influências das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland.** 1993. 155 f. Dissertação (Mestrado em [Engenharia Civil]) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

CHEHEBE, J. R. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000.** 1 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria sustentável no Brasil: Agenda 21: cenários e perspectivas.** Brasília, 2002. Disponível em: <[http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_24/2012/09/05/243/20121126162501925570a.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/05/243/20121126162501925570a.pdf)> Acesso em: 10 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Matriz energética e emissão de gases de efeito estufa: fatos sobre o Brasil.** Brasília, 2008. Disponível em: <[http://www.cni.org.br/portal/data/files/00/8A9015D01DDE56A3011E4A2E80D84E78/Cartilha\\_Matriz\\_Energ%C3%A9gica\\_Portugu%C3%AAs\\_WEB.pdf](http://www.cni.org.br/portal/data/files/00/8A9015D01DDE56A3011E4A2E80D84E78/Cartilha_Matriz_Energ%C3%A9gica_Portugu%C3%AAs_WEB.pdf)> Acesso em: 24 mar. 2014.

\_\_\_\_\_. **Mapa estratégico da indústria 2013-2022.** Brasília, 2013. Disponível em: <[http://www.sistemaindustria.org.br/publicacao/mapa\\_estrategico/files/assets/downloads/publication.pdf](http://www.sistemaindustria.org.br/publicacao/mapa_estrategico/files/assets/downloads/publication.pdf)> Acesso em: 31 maio 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento.** Brasília, 2012.

Disponível em:

<[http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_24/2012/09/03/189/20121122172811763174i.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_24/2012/09/03/189/20121122172811763174i.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2014.

EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE. **International reference life cycle data system (ILCD) handbook**: general guidance document for life cycle assessment (LCA). [Brussels], 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 197-1**: cement – part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels, 2000.

FEIZ, R.; AMMENBERG, J.; BAAS, L.; EKLUND, M.; HELGSTRAND, A.; MARSHALL, R. Improving the CO<sub>2</sub> performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. **Journal of Cleaner Production**, [Philadelphia], n. xxx, p. 1-10, Jan. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614001139#>> Acesso em: 12 out. 2014.

FERRÃO, P. C. **Ecologia industrial**: princípios e ferramentas. 1 ed. Lisboa: IST PRESS, 2009.

FIVES GROUP. Planta de moagem com Horomill: o sistema de moagem sustentável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 6., 2014, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP; SNIC, 2014. Não paginado. 1 CD-ROM.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.-J.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; HISCHIER, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; KÖLLNER, T.; LOERINCIK, Y.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. **Implementation of life cycle impact assessment methods**: data v2.0 (2007). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007. Disponível em: <[http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03\\_LCIA-Implementation.pdf](http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03_LCIA-Implementation.pdf)> Acesso em: 12 out. 2014.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. G4 sustainability reporting guidelines: reporting principles and standard disclosures. Amsterdam. 2013. Disponível em: <<https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/GRIG4-Part1-Reporting-Principles-and-Standard-Disclosures.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking clean energy progress 2013**: IEA input to the clean energy ministerial. Paris, 2013. Disponível em: <[http://www.iea.org/publications/tcep\\_web.pdf](http://www.iea.org/publications/tcep_web.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067**: carbono footprint of products – requirements and guidelines for quantification and communication. Geneva, 2012.

JUNIOR, D. F. **A experiência da cia de cimento Itambé no coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 6., 2014, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP; SNIC, 2014. Não paginado. 1 CD-ROM.

MANTEGAZZA, E. **Aspectos ambientais do co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer no estado de São Paulo**. 2004. 360 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado**: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento. 2001. 163 f. Tese (Doutorado em [Geociências]) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO; GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. Guia de compras públicas sustentáveis para administração federal. [São Paulo], [2010]. Disponível em: <<http://cpsustentaveis.planejamento.gov.br/wp-content/uploads/2010/06/Cartilha.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

NOVAK, L. H. **Avaliação consequencial do ciclo de vida**: inventário do uso solo para produção prevista de biodiesel no Brasil em 2030. 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

ORSINI, P. M. P. S. **Projetos de cimento que maximizem o retorno do investimento**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 6., 2014, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCP; SNIC, 2014. Não paginado. 1 CD-ROM.

QUAZI, H. A.; KHOO, Y-K.; TAN, C-M.; WONG, P-S. Motivation for ISO 14000 certification: development of a predictive model. **Omega: the International Journal of Management Science**, [Philadelphia], n. 29, p. 525-542, Jun. 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048301000421#>> Acesso em: 6 jun. 2014.

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. 2003. 166 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/pdf/relatorio\\_anual\\_2012-13\\_web.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/relatorio_anual_2012-13_web.pdf)>. Acesso em: 13 abr. 2014.

\_\_\_\_\_. **Press kit 2013**: agosto. Rio de Janeiro, 2013a. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/pdf/relatorio\\_anual\\_2012-13\\_web.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/relatorio_anual_2012-13_web.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2013b. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2014.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **Activity report 2013**. Brussels, 2013a. Disponível em:

<[http://www.cembureau.eu/sites/default/files/category\\_pictures/AR2013.pdf](http://www.cembureau.eu/sites/default/files/category_pictures/AR2013.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **The role of cement in the 2050 low carbon economy**. Brussels, 2013b. Disponível em: <<http://lowcarboneyconomy.cembureau.eu/uploads/Modules/Documents/cembureau-brochure.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2014.

ESTEVES, D.; MADUREIRA, F.; MENDES, I.; CEILAN, J.; MELO, J.; GOMES, L.; LIMA, M.; AZEVEDO, P.; MOTTA, R, 2014. **BLOG CIMENTO** Portland e impactos ambientais. Belo Horizonte, Apresenta fluxogramas e informações sobre o sistema produtivo do cimento Portland. Disponível em: <<http://gestaoambientalcimento.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 20 out. 2014.

VALDERRAMA, C.; GRANADOS, 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], v. 25, p. 60-67. Dec. 2012. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S095965261100494X/1-s2.0-S095965261100494X-main.pdf?\\_tid=8e9bcd4e-f4fd-11e3-8f7a-00000aacb35e&acdnat=1402885740\\_f609f52f1c20f68ef05fb33c52c0f3ba](http://ac.els-cdn.com/S095965261100494X/1-s2.0-S095965261100494X-main.pdf?_tid=8e9bcd4e-f4fd-11e3-8f7a-00000aacb35e&acdnat=1402885740_f609f52f1c20f68ef05fb33c52c0f3ba)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Relatório integrado 2012**. São Paulo, 2013. Disponível em: <[http://www.votorantim.com.br/responsabilidade%20Social%20Corporativa/Vot\\_RA2012.pdf](http://www.votorantim.com.br/responsabilidade%20Social%20Corporativa/Vot_RA2012.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

WEIDEMA, B. P. **Market information in life cycle assessment**. Environmental Project No.863. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2003.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Iniciativa para a sustentabilidade do cimento (CSI): plano de ação**. Stevenage, 2002. Disponível em: <[http://www.wbcdcement.org/pdf/agenda\\_po.pdf](http://www.wbcdcement.org/pdf/agenda_po.pdf)>. Acesso em: 26 maio 2014.

\_\_\_\_\_. **Cement industry energy and CO<sub>2</sub> performance: “getting the numbers right”**. [Geneva], [2009]. Disponível em: <[http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI%20GMR%20Report%20final\\_updated%20Nov11\\_LR.pdf](http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI%20GMR%20Report%20final_updated%20Nov11_LR.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Cement sustainability initiative: progress report**. Geneva, 2012. Disponível em: <[http://www.csiprogess2012.org/CSI\\_ProgressReport\\_FullReport.pdf](http://www.csiprogess2012.org/CSI_ProgressReport_FullReport.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Getting the numbers right project**. [Geneva], 2014a. Apresenta dados da indústria cimenteira de todos os participantes. Disponível em: <<http://www.wbcdcement.org/GNR-2012/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2014.

\_\_\_\_\_. **Guidelines for co-processing fuels and raw materials in cement manufacturing**. Geneva, 2014b. Apresenta dados da indústria cimenteira de todos os participantes. Disponível em: <[http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI%20Guidelines%20for%20Co-Processing%20Fuels%20and%20Raw%20Materials%20in%20Cement%20Manufacturing\\_v2.pdf](http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI%20Guidelines%20for%20Co-Processing%20Fuels%20and%20Raw%20Materials%20in%20Cement%20Manufacturing_v2.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2014.



ZHANG, J.; CHENG, J. C. P.; LO, I. M. C. Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 745-757. Apr. 2014. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-013-0689-7>>. Acesso em: 10 out. 2014.