

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA DO CIMENTO *PORTLAND*

Rafael Loques

Rio de Janeiro

Setembro de 2013

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA DO CIMENTO PORTLAND

Rafael Loques

Projeto de Graduação submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador:

Professora Elaine Garrido Vazquez

Examinada por:

Professora Elaine Garrido Vazquez, D. Sc.

Professor Wilson Wanderley da Silva

Professora Ana Catarina Jorge Evangelista, D. Sc.

Rio de Janeiro
Setembro de 2013

Loques, Rafael

Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada do Cimento Portland/Rafael Loques – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

xii, 49 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Elaine Garrido Vazquez

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p.48.

1.INTRODUÇÃO.2.CIMENTO *PORTLAND*.3.
POSSIBILIDADES DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE
VIDA.4.ESTUDO DE CASO. I. Elaine Garrido Vazquez. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica,
Curso Engenharia Civil. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este Trabalho aos meus pais, Orlando e Zélia, que sempre estiveram ao meu lado apoiando minhas escolhas e nunca mediram esforços para me proporcionar o melhor, sempre me ensinando os verdadeiros valores da vida, a lutar pelos meus ideais e a nunca desistir, me mostrando que tudo é possível nesta vida, basta querer...

À Paola Lindman, este anjo colocado por Deus em minha vida, meu eterno amor, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando nos momentos difíceis, pois sem ela nunca teria conseguido transpor esta etapa da minha vida.

À Ronuro Mazaruni, grande sogro, amigo, pai e comandante, que sempre me incentivou e que dizia que tudo ia dar certo! Eis que tudo deu certo! E estará sempre presente em meu coração e nas melhores lembranças da minha vida. Sei que estará do alto dizendo “Esse é meu garoto!”, com um sorriso enorme e orgulhoso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, aos grandes amigos conquistados na faculdade, aos amigos que me ajudaram na realização deste trabalho (Paola e Pedro), ao pessoal da xerox (Djavan, Solange, Seu Fernando e todos os outros) por me ajudarem sempre.

Agradeço à Professora e Orientadora Elaine Garrido Vazquez por ser mais do que uma professora, mas uma pessoa de grande coração que sempre esteve disposta a me ajudar.

À empresa Lafarge Brasil por ter aberto suas portas e pelos colaboradores sempre tão atenciosos e receptivos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada do cimento *Portland*

Rafael Loques

Setembro/2013

Orientador: Elaine Garrido Vazquez

Curso: Engenharia Civil

Diante dos problemas gerados pelas mudanças climáticas, causadas principalmente pelo aumento das emissões de CO₂ no planeta, o desenvolvimento sustentável na construção civil tem se tornado tema recorrente de grandes debates e tem feito a indústria de materiais de construção procurar maneiras de se tornar menos nociva ao meio ambiente.

Para acompanhar esta demanda, que aumenta dia a dia por produtos mais sustentáveis, a indústria de cimento, produto que possui grande relevância na construção, busca meios de diminuir os impactos causados durante o processo de fabricação do cimento através da redução das taxas de emissão de dióxido de carbono. Nesse contexto a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se mostra uma boa ferramenta para auxiliar os produtores de cimento a quantificar, avaliar e minimizar estas emissões.

Este trabalho apresenta o processo de fabricação do cimento *Portland* e métodos simplificados para dar embasamento para o estudo de caso. Como estudo de caso há a aplicação de um estudo de ACV simplificada para o cimento *Portland* como subsidio para a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida e a elaboração de simulações para demonstrar as alterações, que o uso de resíduos no coprocessamento e as adições minerais, geram sobre os índices de emissão de CO₂ em determinadas etapas do processo de fabricação do cimento.

Palavras-chave: Cimento *Portland*, Avaliação do Ciclo de Vida, ACV Simplificada, Coprocessamento, Adições Minerais.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

Portland Cement Streamlined Life-cycle Assessment

Rafael Loques

September/2013

Advisor: Elaine Garrido Vazquez

Course: Civil Engineer

Given the problems caused by climate change, caused mainly by the increase of CO₂ emissions, sustainable development in the construction industry has become a recurring theme. Large debates have been waged in the pursuit of materials that are less harmful to the environment.

To keep up with this increasing demand, the cement industry, a product of great relevance in civil construction, is seeking ways to reduce the impacts during the cement manufacturing process. One of the main ways to achieve this is by reducing the emission rates of carbon dioxide. In this context, the Life Cycle Assessment (LCA) is shown as a good tool to help cement producers to quantify, assess and minimize these emissions.

This paper presents the manufacture process of Portland cement and simplified methods to provide background for the case study: the application of a simplified LCA study for Portland cement as a subsidy for identifying opportunities that improves the environmental performance of products at various points in their life cycles. Also, were developed simulations to demonstrate how the use of waste coprocessing and mineral additions affects the CO₂ emission rates at certain stages of the manufacturing process of the cement.

Keywords: Portland Cement, Life-cycle Assessment, Streamlined LCA, Environmental Labeling, Coprocessing, Mineral Additions

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Gráfico de produção mundial de cimento em milhões de toneladas ..	2
Figura 2 – Gráfico de consumo per capita de cimento no mundo	2
Figura 3 – Gráfico de missões de CO ₂ por tonelada de cimento produzido.	3
Figura 4 – Fluxograma de fabricação de cimento	9
Figura 5 - Jazida de extração de calcário.....	9
Figura 6 - Estação de britagem.	10
Figura 7 - Britador de Calcário	10
Figura 8 - Baía provida de equipamento homogeneizador de matéria-prima... ..	11
Figura 9 - Moinho de cru.	11
Figura 10 - Silos de homogeneização de farinha.	12
Figura 11 - Pré- calcinador.....	13
Figura 12 – Esquema de Transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer, em função da temperatura.....	14
Figura 13 - Silo para armazenamento de clínquer.	15
Figura 14 – comparação entre as emissões geradas pela disposição de resíduos em aterros e alternativa do coprocessamento	21
Figura 15 – comparação entre as emissões geradas pela destruição de resíduos em incineradores e alternativa do coprocessamento.....	21
Figura 16 – Exemplo de matriz de ACV simplificada.....	27
Figura 17 – Estratégia para seleção de material em quatro etapas.	30
Figura 18 – Limites do estudo.	33
Figura 19 - Emissão gerada de forma indireta.	35
Figura 20 – Emissão gerada pelo combustível não utilizado pelo forno.....	35
Figura 21 – Emissão gerada pela descarbonatação do calcário.....	36
Figura 22 – Emissões provenientes do consumo de combustível pelo forno. ...	36
Figura 23 – Gráfico de emissões brutas em Kg CO ₂ / t de cimento produzido devido à variação das porcentagens de coprocessamento.....	39
Figura 24– Gráfico de emissões líquidas em Kg CO ₂ / t de cimento produzido devido à variação das porcentagens de coprocessamento.....	40
Figura 25 – Gráfico de emissões em Kg CO ₂ / t de cimento CII-F produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.	41
Figura 26 – Gráfico de emissões em Kg CO ₂ / t de cimento CII-E produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.	42

Figura 27 – Gráfico de missões brutas em Kg CO₂/t de cimento CII produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento. 44

Figura 28 – Emissões Líquidas em Kg CO₂/ t de cimento CII produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento. 45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Normas cimento Portland.....	17
Quadro 2 – Vantagens e benefícios do coprocessamento.....	22
Quadro 3 – Materiais que podem e não podem ser utilizados no coprocessamento	22
Quadro 4 - Subsídios de um ACV	24
Quadro 5– Etapas para formação de uma ACV.....	24
Quadro 6 – Exemplos de categoria de impactos ambientais.	26
Quadro 7 – Estratégias para a Eco Seleção.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – principais componentes do clínquer.	14
Tabela 2 - teores componentes dos cimentos Portland.	17
Tabela 3 - Porcentagem das emissões geradas por fonte presente no processo de fabricação de cimento	37
Tabela 4 - Emissões brutas em Kg CO ₂ / t de cimento produzido devido a variação das porcentagens de coprocessamento.	38
Tabela 5 – Emissões líquidas em Kg CO ₂ / t de cimento produzido devido à variação das porcentagens de coprocessamento.	39
Tabela 6 – Emissões em Kg CO ₂ / t de cimento CII-F produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.....	41
Tabela 7 – Emissões em Kg CO ₂ / t de cimento CII-E produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.....	42
Tabela 8 – Emissões brutas em Kg CO ₂ /t de cimento CII produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento.	43
Tabela 9 – Emissões líquidas em Kg CO ₂ / t de cimento CII produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento.	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação do Tema	1
1.2. Objetivo	4
1.3. Justificativa	4
1.4. Metodologia	4
1.5. Descrição dos capítulos.....	5
2. CIMENTO PORTLAND	7
2.1. Histórico	7
2.2. Processo Produtivo do Cimento.....	8
2.3. Adições Minerais	15
2.3.1. Escória de alto-forno.....	17
2.3.2. Materiais Pozolânicos.....	18
2.3.3. <i>Filler</i> /Material carbonático.....	19
2.4. Coprocessamento.....	20
3. POSSIBILIDADES DE ACV	23
3.1. Avaliação do ciclo de vida.....	23
3.2. Avaliação do ciclo de vida simplificada	25
3.3. Análise Qualitativa: O Método da Matriz	27
3.4. Análise Quantitativa: Método da Eco Seleção	28
3.4.1. Eco Auditoria	29
3.4.2. Seleção	29
4. ESTUDO DE CASO	31
4.1. A Empresa.....	31
4.2. Produção de cimento na fábrica de Cantagalo.	32
4.3. Avaliação do Ciclo de Vida do Cimento Portland na fábrica de Cantagalo....	32
4.3.1. Objetivo do estudo.....	32
4.3.2. Escopo do estudo.....	32

4.3.3. Inventário do ciclo de vida	34
4.4. Impactos gerados nas taxas de emissão de CO ₂ pelas alterações nas percentagens de resíduos coprocessados e adições minerais.....	37
4.4.1. Coprocessamento	38
.....	38
4.4.2. Adições minerais.	40
4.4.3. Coprocessamento e adições minerais.	43
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do Tema

O aumento da preocupação com as questões ambientais gera uma procura cada vez maior, por parte da indústria da construção civil de todo o mundo, de novas tecnologias que consigam tornar seu produto e processo mais sustentável.

Acompanhando a tendência mundial a indústria do cimento, um dos materiais mais utilizados mundialmente devido ao seu grande emprego na construção civil, vem procurando meios de tornar o seu produto e seu processo produtivo menos prejudicial ao meio ambiente. Uma das maneiras encontradas de minimizar esses impactos é a redução das emissões de CO₂, o principal responsável pelo efeito estufa.

No ano de 1999, dez das maiores companhias de cimento mundiais, em parceria com o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), criaram um grupo para promover o desenvolvimento sustentável da indústria cimenteira, a *Cement Sustainability Initiative* (CSI). Foi o primeiro setor da indústria filiado ao WBCSD a adotar iniciativas para diminuir a emissão de CO₂ no planeta. Três anos depois da formação do grupo, foi elaborada uma agenda de objetivos e compromissos, a serem atingidos no prazo de vinte anos, para compensar e mitigar os impactos ao meio ambiente gerados pela indústria do cimento (<http://www.vcimentos.com.br>, 2013).

Dentro dos projetos de redução de emissões de dióxido de carbono criados pela CSI, destaca-se o desenvolvimento de um Protocolo de Emissões de CO₂ com o objetivo de criar uma metodologia unificada para a elaboração de relatórios anuais para a indústria de cimento.

No mundo, no ano de 2010, foram produzidos aproximadamente 3.300 milhões de toneladas de cimento (Figura 1), cerca de 490 quilos por habitante conforme observado na Figura 2, correspondendo de 5% a 7% das emissões de CO₂ mundial (<http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br>, 2013).

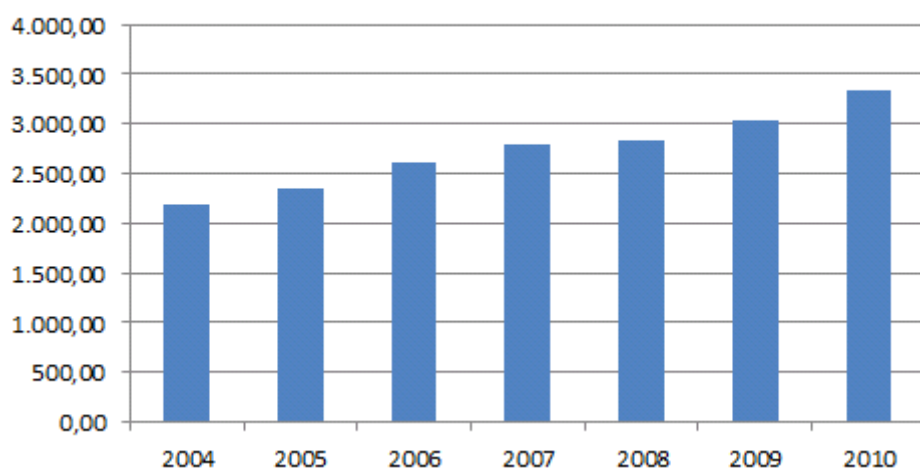


Figura 1– Gráfico de produção mundial de cimento em milhões de toneladas

(Fonte: <http://www.snic.org.br>, 2013)

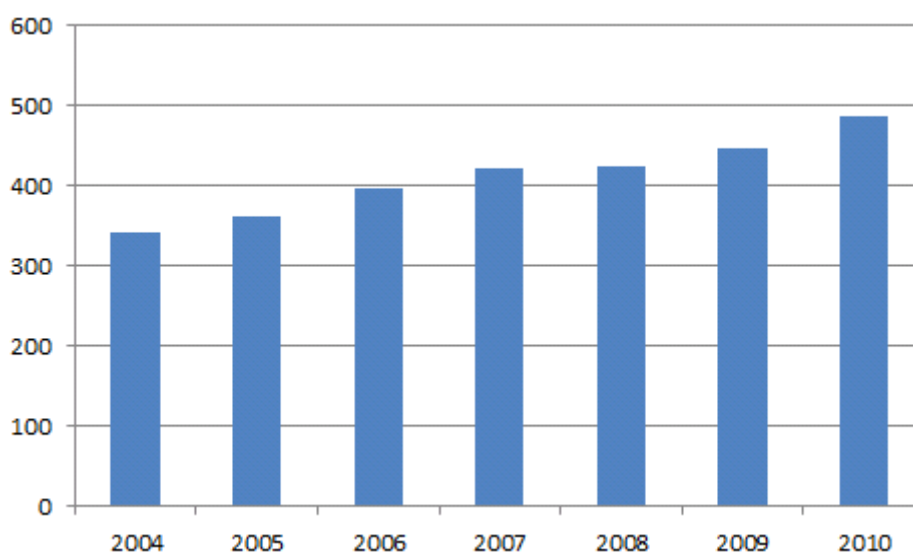


Figura 2 – Gráfico de consumo per capita de cimento no mundo

(Fonte: <http://www.snic.org.br>, 2013)

Buscando atender aos objetivos e compromissos fixados em 2012 pelo CSI, a indústria cimenteira mundial, consequentemente a brasileira uma das que possui menor emissão de CO₂ / tonelada de cimento produzido como pode ser verificado na Figura 3 e que produziu aproximadamente 68,8 milhões de toneladas de cimento em 2012 (<http://www.snic.org.br>, 2013), vem adotando medidas para reduzir sua contribuição nas emissões de dióxido de carbono.

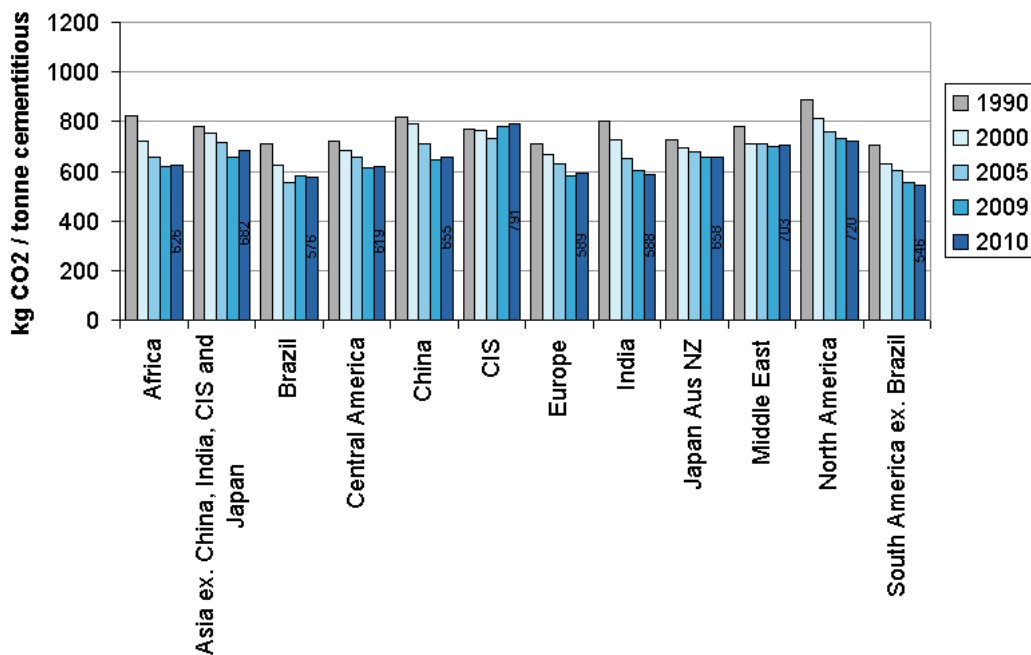


Figura 3 – Gráfico de missões de CO2 por tonelada de cimento produzido.

(Fonte: GNR PROJECT disponível em: <http://www.wbcdcement.org>, 2013).

Uma alternativa que se mostrou eficiente para promover esta redução foi a substituição de parte do cimento Portland por uma ou mais adições minerais, em sua maioria rejeitos industriais como a escória de alto forno, cinzas volantes e pozolanas.

A utilização desses subprodutos industriais traz benefícios econômicos, técnicos e principalmente ambientais, conseguindo reduzir tanto o consumo de energia, quanto a liberação de gás carbônico para o meio ambiente. Com as adições, torna-se possível reduzir a quantidade de clínquer¹ na fabricação de cimento, conseqüentemente, diminuindo a quantidade de combustível necessária para a fabricação do cimento.

Outra técnica que a indústria do cimento utiliza para reduzir suas emissões de gás carbônico é o coprocessamento que substitui parte do combustível e matérias-primas necessários para a produção do clínquer por resíduos urbanos ou industriais como papéis, borrachas, resíduos oleosos e pneus usados, impedindo que estes se tornem passivos ambientais quando dispostos ou destruídos de forma inadequada.

¹ Clínquer: Componente básico do cimento, constituído principalmente de silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico (RESOLUÇÃO CONAMA nº 264, 1999).

1.2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a realização de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da indústria cimenteira através de um método simplificado considerando apenas as emissões de CO₂ ao longo das etapas de produção, procurando demonstrar de forma quantitativa as alternativas utilizadas pelo setor para tornar a produção mais sustentável.

1.3. Justificativa

Levando em consideração o panorama mundial em relação às questões ambientais e às alternativas que a indústria cimenteira vem tomando para minimizar seu impacto ao meio ambiente, justifica-se um estudo que consiga mensurar as alterações nas emissões de CO₂ promovidas por medidas que substituem parte do clínquer por subprodutos industriais e utilizam resíduos como fonte de energia (para os fornos rotativos) e matéria-prima (para a fabricação do clínquer).

1.4. Metodologia

Neste estudo será feita a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) simplificada realizando apenas algumas etapas descritas nas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044 tendo como foco as emissões de dióxido de carbono (CO₂) do cimento Portland durante seu processo de fabricação.

Em primeiro lugar será necessário definir o objetivo e o escopo do estudo. O objetivo consiste em declarar a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo e o público alvo, já no escopo serão expostos: o sistema de produto a ser estudado; os tipos e fontes de dados que serão selecionados de acordo com o objetivo e escopo do estudo; as funções do sistema de produto; a unidade funcional que fornecerá uma referência para a normalização dos dados de entrada e saída; a fronteira do sistema que determinará quais processos elementares serão incluídos na ACV; e limitações (ABNT NBR ISO 14044: 2009).

Tendo terminado a primeira etapa se dará início a Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) que compreende as fases de: coleta de dados onde serão coletados os dados quantitativos a serem incluídos no inventário para cada processo elementar que foi colocado na fronteira do sistema; procedimentos de cálculos o qual documentará de forma explícita os métodos de cálculos e os pressupostos utilizados devidamente declarados e justificados; e alocação que consiste na disposição das entradas e saídas de acordo com os critérios estabelecidos (ABNT NBR ISO 14044: 2009).

Após a definição do objetivo e escopo e a elaboração da ICV, vão ser apresentados os dados obtidos referentes às emissões de CO₂ geradas na fabricação do produto para cada processo elementar.

A análise dos resultados permitirá a identificar as etapas do processo que são responsáveis pelas maiores taxas de emissão, então, serão realizados testes simulados para mostrar as mudanças que algumas alternativas geram nas taxas de emissão de CO₂ do processo de fabricação do produto.

1.5. Descrição dos capítulos

O presente capítulo apresenta uma rápida introdução ao tema, o objetivo, a justificativa, a metodologia e a descrição dos capítulos.

No segundo capítulo *se encontram itens referentes ao cimento Portland*, iniciando por sua história, passando pelas etapas e características do processo de fabricação englobando da retirada da matéria-prima até a distribuição do produto.

São demonstradas ainda nesta parte as possibilidades e normas regulamentadoras referentes às iniciativas que a indústria cimenteira vem adotando para reduzir suas emissões de CO₂ como: adições minerais para substituir parte do clínquer na fabricação do cimento e o coprocessamento que consiste na utilização de resíduos como combustível para o forno ou matéria-prima para o clínquer.

Já no terceiro capítulo são apresentadas as diferentes formas de se realizar uma ACV, demonstrando desde a forma mais complexas (metodologia apresentada pelas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044) que considera todas as entradas e saídas em cada etapa do ciclo de vida do produto até as formas simplificadas de ACV.

Para ACV simplificada, são demonstradas duas formas, a Análise Quantitativa – Método da Matriz – e a Análise Quantitativa – Eco seleção, ambas levam em consideração um simplificado e reduzido inventário, o que facilita sua execução.

O quarto capítulo apresenta o estudo de caso sobre a aplicação da metodologia da ACV de forma simplificada levando apenas como referência as saídas de CO₂ durante a fabricação do cimento *Portland*. Esse capítulo também procura demonstrar através de simulações as alterações que as adições minerais e o coprocessamento geram sobre as taxas de emissão de dióxido de carbono do processo.

No quinto capítulo, apresentam-se conclusões e considerações finais do trabalho, assim como as limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2. CIMENTO PORTLAND

2.1. Histórico

É difícil precisar quando foi feita a primeira construção usando material de caráter cimentício como elemento de ligação (PASSUELO et al, 2005). Porém, os egípcios já faziam uso de uma liga formada por uma mistura de gesso calcinado para construir seus imponentes monumentos (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

O Panteão e o Coliseu, grandes obras gregas e romanas, utilizaram em sua construção solos de origem vulcânica provenientes da ilha grega de Santorini e das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, rochas estas que quando em contato água endureciam (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

O grande avanço para o desenvolvimento do cimento ocorreu em 1756, quando o inglês John Smeaton obteve através da calcinação de calcários moles um produto que possuía alta resistência. Já no ano de 1818, o francês Vicat, considerado o inventor do cimento artificial, obteve pela mistura e queima de calcário e argila resultados semelhantes aos de Smeaton (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

Baseado em seus antecessores, em 1824, Joseph Aspdin um construtor inglês, percebeu que queimando conjuntamente pedras calcárias e argila e posteriormente transformando seu produto em um pó fino, obteria uma mistura que, após seco, não se dissolvia em contato com a água e tornava-se tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções da época (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

Aspdin obteve a patente no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que foi denominada assim por possuir cor, durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha de Portland (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

No Brasil, no ano de 1888, ocorreram aparentemente as primeiras tentativas de aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Potland, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho, em Sorocaba - SP, se empenhou em implantar uma fábrica na fazenda Santo Antônio (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

Nessa época, foram feitas inúmeras ensaios de fabricação de cimento no país, um exemplo foi a instalação, de uma pequena unidade produtora na ilha de Tiriri na Paraíba, realizada pelo engenheiro Louis Felipe Alves de Nóbrega (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

Entretanto, essa iniciativa permaneceu em funcionamento por apenas três meses, pois o cimento produzido em Tiriri não conseguia competir com os importados da época, não devido à qualidade do cimento produzido, mas pelo fato da instalação ter uma pequena capacidade de produção e sua distância dos grandes centros consumidores ser muito grande (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

Por razões que compreendem desde a deficiência técnica até as condições econômicas adversas, todas essas iniciativas não passaram de meras tentativas que no ano 1924, culminaram com a implantação de uma fábrica em Perus, estado de São Paulo, considerada marco da indústria brasileira de cimento, cuja construção foi realizada pela Companhia Brasileira de Cimento Portland (<http://www.abcp.org.br>, 2013/por ARNALDO FORTI BATTGIN).

Desde então a indústria de cimento no Brasil vem se desenvolvendo, passando por períodos de crises e crescimento associados à conjuntura econômica do país. Hoje, existem atuando no Brasil dezenove grupos empresariais responsáveis pela operação de 57 fábricas com fornos e outras 30 que realizam apenas o processo de moagem, espalhadas por todo o território nacional que produziram segundo o SNIC 68,8 milhões de toneladas de cimento no ano 2012.

2.2. Processo Produtivo do Cimento

O cimento *Portland* tem como seu principal constituinte o clínquer, material este sinterizado e peletizado, decorrente do processo de calcinação a cerca de 1450 °C de uma mistura de calcário e argila e caso necessário corretivos químicos de natureza ferrífera, silicosa ou aluminosa (PASSUELO et al, 2005).

A Figura 4 apresenta de forma simplificada o processo de fabricação do cimento *Portland* e suas etapas, e estas serão apresentadas de forma mais detalhada.

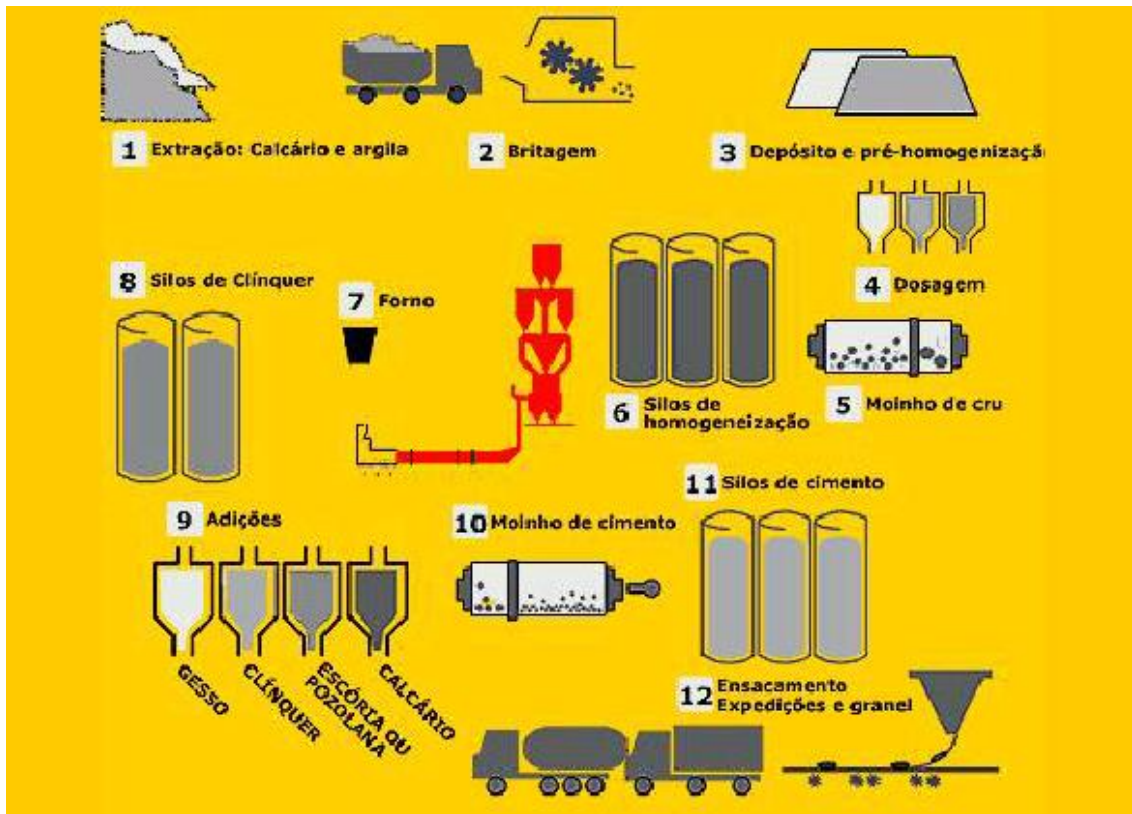


Figura 4 – Fluxograma de fabricação de cimento

(Fonte: <http://www.abcp.org.br>, 2013)

A primeira etapa do processo de fabricação consiste na extração do calcário e da argila que acontece em jazidas (**Figura 5**) subterrâneas ou a céu aberto (circunstância mais corriqueira no Brasil). Para a extração, são utilizados explosivos para o desmonte da rocha (<http://www.abcp.org.br>, 2013).



Figura 5 - Jazida de extração de calcário.

(Fonte: Fotos retiradas pelo autor)

O calcário extraído é então transportado por meio de caminhões até a instalação responsável pela britagem (Figura 6), onde é reduzido a dimensões apropriadas, pelo britador (Figura 7), para se realizar o processamento industrial e a maior parte das impurezas existentes no calcário é retirada. Por ser mole, a argila não passa pelo processo de britagem (<http://www.abcp.org.br>, 2013).



Figura 6 - Estação de britagem.
(Fonte: Fotos retiradas pelo autor)



Figura 7 - Britador de Calcário
(Fonte: Fotos retiradas pelo autor)

Após a etapa de britagem, o calcário e a argila são estocados (separadamente ou juntos dependendo da fábrica e características das jazidas) em baias providas de equipamento responsável por misturar o material (Figura 8) para garantir uma pré-

homogeneização. Neste momento são realizados inúmeros ensaios, garantindo assim a qualidade das matérias-primas (<http://www.abcp.org.br>, 2013).



Figura 8 - Baía provida de equipamento homogeneizador de matéria-prima.
(Fonte: Fotos retiradas pelo autor)

Para ser fragmentada a mistura de calcário e argila é dosada obedecendo a diversos parâmetros químicos previamente estabelecidos. Então, a combinação é submetida à moagem realizada no moinho de cru² (Figura 9), onde ocorre a homogeneização e a pulverização da matéria prima (<http://www.abcp.org.br>, 2013).



Figura 9 - Moinho de cru.
(Fonte: Fotos retiradas pelo autor)

² Esse moinho pode ser de bolas, rolo ou barras.

Esta mistura crua de calcário e argila proveniente do moinho, denominada farinha³, é colocada em silos verticais de grande porte (Figura 10) chamados de silos de homogeneização. Nesses silos ocorre uma perfeita homogeneização, realizada pelos processos pneumáticos e por gravidade para que ocorra uma adequada fusão dos elementos geradores do clínquer (<http://www.abcp.org.br>, 2013).



Figura 10 - Silos de homogeneização de farinha.

(Fonte: Fotos retiradas pelo autor)

Vinda dos silos de homogeneização a farinha entra na etapa mais importante da fabricação do cimento, onde é inserida no forno rotativo, sendo passada antes em pré-aquecedores/pré-calcinadores (Figura 11), equipamentos que utilizam o calor derivado dos gases do forno para promover um pré-aquecimento do material (<http://www.abcp.org.br>, 2013). É neste momento que, ocorre a maior parte da calcinação/descarbonatação do material calcário apresentada na Equação 1 e são inseridos no sistema através dos queimadores secundários os resíduos do coprocessamento .

³ Farinha: Produto intermediário para a produção de clínquer, composto basicamente de carbonato de cálcio, sílica, alumina e óxido de ferro, obtidos a partir de matérias primas tais como, calcário, argila e outras (RESOLUÇÃO CONAMA nº 264, 1999).

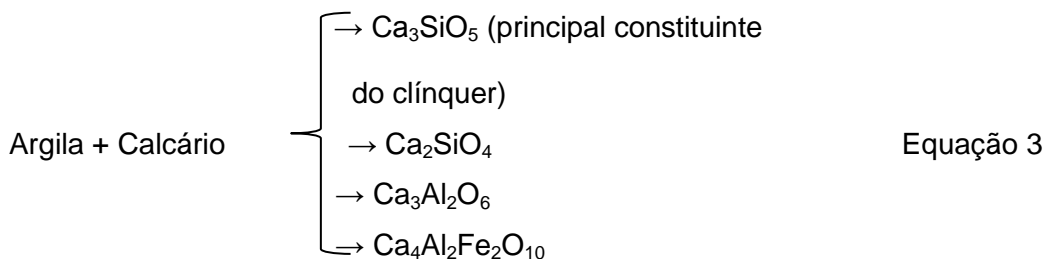


Figura 11 - Pré- calcinador.

No interior do forno rotativo, formado de um cilindro de aço de 50m a 150m de comprimento e diâmetro de 6m revestido por tijolos refratários e uma biqueira (queimador primário), a farinha sofre o processo de calcinação até a temperatura 1450 °C, formando um produto com aparência de bolas escuras, o clínquer (<http://www.abcp.org.br>, 2013).

Os processos físico-químicos ocorrerem de forma contínua durante o cozimento, a Figura 12 mostra as transformações mineralógicas no interior do forno rotativo de cimento.

Estão expressas a seguir as principais reações químicas que ocorrem no forno rotativo de cimento:



(Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2008).

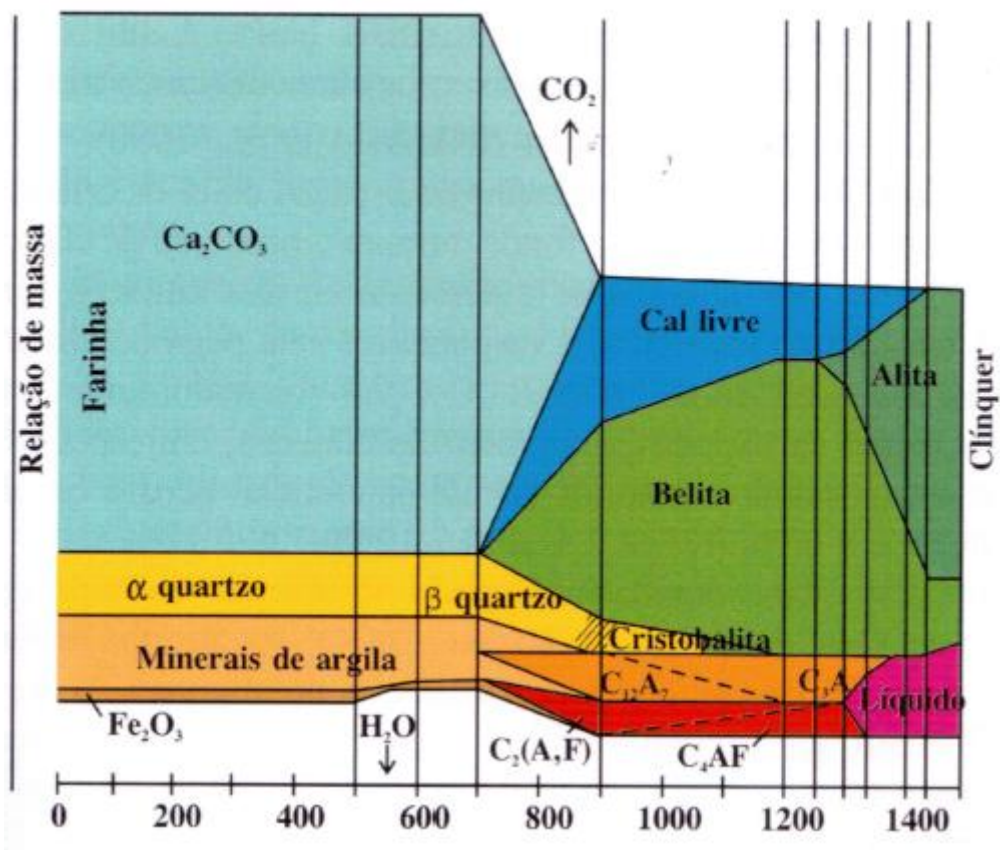


Figura 12 – Esquema de Transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer, em função da temperatura.

(Fonte: PASSUELO et al., 2005 adaptado de WOLTER, 1985)

As principais componentes do clínquer estão apresentadas na Tabela 1 abaixo e todos nela presente têm a propriedade de desenvolver resistência durante a hidratação.

Tabela 1 – principais componentes do clínquer.

Símbolo	Fórmula	Nome	%
C ₃ S	Ca ₃ SiO ₅	Silicato tricálcico ou alita	40 a 70%
C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄	Silicato bicálcico ou belita	10 a 20%
C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	Aluminato tricálcico ou celita	15 a 20%
C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	Ferro-aluminato tetracálcico	

(Fonte: KIHARA et al., 1990 *apud* PASSUELO et al., 2005)

Após passar pelo forno o clínquer passa pelo resfriador, responsável por reduzir a temperatura para aproximadamente 80°C. Nesta fase se conclui a clínquerização e acontece uma série de reações químicas que irão influenciar diversas características do concreto em que o cimento for empregado (<http://www.abcp.org.br>, 2013).

Já resfriado, o clínquer é armazenado em silos (Figura 13) e ficará esperando pela próxima etapa do processo. O clínquer é submetido então ao processo de moagem final, onde é adicionado ao gesso ou outras adições dando resultado ao cimento (<http://www.abcp.org.br>, 2013).



Figura 13 - Silo para armazenamento de clínquer.

Finalizando todo o processo, este cimento resultante da moagem é conduzido pneumaticamente e mecanicamente para silos, onde será estocado e passará por diversos ensaios que irão garantir a qualidade do produto, o cimento é então enviado para a expedição. A remessa do cimento para o mercado é feita de duas formas: em sacos (50 Kg ou 25 Kg) fabricados em papel *kraft* ou a granel (<http://www.abcp.org.br>, 2013).

2.3. Adições Mineraias

Atualmente, as adições mais comuns são os resíduos originários de outras indústrias, resíduos estes que seriam descartados, causando uma série problemas e danos ao meio ambiente.

Dessa maneira, a utilização de adições mineraias na fabricação do cimento, substituindo parte do clínquer, não apenas diminui os impactos ambientais gerados

pelos resíduos industriais quando descartados de forma inadequada, mas também diminui a extração de matérias-primas, o consumo de energia e a emissão de CO₂ da indústria cimenteira.

A redução das emissões de CO₂ com a substituição de parte do clínquer por adições minerais ocorre de duas maneiras, primeiro devido a diminuição da quantidade de combustível queimado no forno para a produção do clínquer e segundo pela redução do processo representado pela (Equação 1), onde o calcário quando aquecido se transforma em cal livre (CaO) e dióxido de carbono. Essa fragmentação do calcário é denominada descarbonatação e é a principal responsável pelas emissões de CO₂ de uma fábrica de cimento.

Estas adições podem ser classificadas de duas maneiras, ativas e inativas. As adições ativas se caracterizam por terem propriedades pozolânicas⁴, como as cinzas volantes e as pozolanas, ou propriedades hidráulicas, como as escórias.

Por outro lado, são consideradas adições inativas ou inertes, por não possuírem propriedades hidráulicas ou pozolânicas, os fillers, calcários ou silicosos. Essas adições, sobretudo devido a uma granulometria adequada, atuam em algumas características do cimento, melhorando a trabalhabilidade, reduzindo a fissurabilidade e diminuindo a permeabilidade e capilaridade.

Os tipos de cimento apresentados na Tabela - 2 diferenciam-se de acordo com as adições que lhe são incorporadas. Quando misturado com água e agregados, esses cimentos dão origem a concretos e a argamassas que possuem características e propriedades conforme o tipo e as proporções de cada material adicionado.

Serão apresentadas no Quadro 1 as normas existentes no Brasil que fixam parâmetros, características, porcentagens de adição e designação que os cimentos devem respeitar levando em consideração os tipos de adição utilizados.

⁴ Produto que em contato com a água e na presença de cal são capazes de fixar a cal e gerar compostos hidráulicos

Tabela 2 - teores componentes dos cimentos Portland.

COMPONENTES (% EM MASSA)						
CIMENTO	Classe de Resistência	Clinker + Gesso	Escória	Pozolana	Material Carbonático	Fonte:
CPI	25 - 32 - 40	100	0			NBR 5732
CPI-S	25 - 32 - 40	95 - 99	1 - 5			
CPII-E	25 - 32 - 40	56 - 94	6 - 34	0	0 - 10	NBR 11578
CPII-Z	25 - 32 - 40	76 - 94	0	6 - 14	0 - 10	
CPII-F	25 - 32 - 40	90 - 94	0	0	6 - 10	
CPIII	25 - 32 - 40	25 - 65	35 - 70	0	0 - 5	NBR 5735
CPIV	25 - 32	45 - 84	0	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
CPV-ARI	n.a.	95 - 100	0	0	0 - 5	NRB 5733

Quadro 1 - Normas cimento Portland

Normas	
NBR 5732	Cimento Portland comum.
NBR 11578	Cimento Portland Composto.
NBR 5735	Cimento Portland de Alto Forno.
NBR 5736	Cimento Portland pozolânico.
NBR 5733	Cimento Portland Com alta resistência Inicial.

(Fonte: ABNT NBR 5732: 1991; NBR 11578: 1991; NBR 5735: 1991; NBR 5736: 1991; e NBR 5733: 1991)

2.3.1. Escória de alto-forno

A escória é obtida quando o resíduo silicoso que se forma na fusão de minerais de ferro no alto-forno da indústria siderúrgica sofre um resfriamento rápido. Nessa redução repentina, causada pelo contato da escória líquida que se encontra a uma alta temperatura com água ou uma mistura de ar e água, ocasiona a formação de um

estado vítreo que é indispensável para o desenvolvimento das propriedades hidráulicas do material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O resultado do resfriamento causado pela água é denominado escória granulada devido às partículas terem dimensões semelhantes a da areia. Já o material resfriado abruptamente pelo ar e com quantidade limitada de água fica no formato de pelotas e é denominado escória peletizada (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Normalmente, a escória granulada possui uma quantidade maior de vidro, porém, quando moído a 400 até 500 m²/kg de finura Blaine⁵, os dois produtos desenvolvem propriedades cimentantes aceitáveis (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A composição química da escória de alto-forno representa um fator de grande relevância, pois influencia no grau de vitrificação e solubilidade, características essas que estão diretamente ligadas a reatividade do material ao longo da hidratação.

2.3.2. Materiais Pozolânicos

A NBR 12653/1992 define materiais pozolânicos como:

“Materiais silicosos ou silico-amumínicos que por si sós possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias”.

As pozolanas são divididas em dois grupos, pozolanas naturais quando de origem vulcânica e sedimentar, ou pozolanas artificiais que são materiais provenientes de tratamentos térmicos ou resultantes de processos industriais.

2.3.2.1. Pozolanas naturais

A maior parte das pozolanas naturais é proveniente de rochas e minerais vulcânicos. Enquanto ocorre a erupção vulcânica, o magma, que é constituído principalmente de aluminossilicatos se resfria rapidamente, resultando na formação de fases vítreas ou vidro com uma estrutura desordenada (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

⁵ Grau de finura obtido em aparelho de permeabilidade do ar do tipo Blaine.

Durante a solidificação do magma, devido à evolução simultânea dos gases dissolvidos, a matéria solidificada adquire uma textura porosa e uma alta área superficial específica que eleva sua reatividade química (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Esses fenômenos geram aluminossilicatos com estrutura desordenada que não são estáveis quando expostos a soluções alcalinas, por esse motivo os vidros vulcânicos possuem atividade pozolânica quando em contato com o calcário e o cimento em meio aquoso (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.3.2.2. Cinzas volantes

As cinzas volantes se formam em usinas termoelétricas durante a combustão do carvão pulverizado, no momento em que o carvão é submetido a uma alta-temperatura, o carbono e a matéria volátil são queimados ao mesmo tempo em que grande parte das impurezas minerais, como quartzo, argilas e feldspatos, se fundem (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ao ser conduzida rapidamente para zonas de baixa temperatura, a matéria fundida se solidifica e assume formato de partículas esférica de vidro.

Um montante desse minerais se acumula, dando origem a cinza de grelha; porém a maior parte das partículas, por serem finas são carregadas pela corrente de exaustão do gás, passando a ser camada cinzas volantes. Essas partículas são captadas, no gás, por precipitação eletrostática, filtragem e separação ciclônica (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.3.3. *Filler* /Material carbonático

O *filler* é uma rocha de calcário moída finamente que não possui propriedades hidráulicas nem pozolânicas. Entretanto pelo fato de ser um material que apresenta elevada finura, o *filler* quando adicionado ao cimento atua em diversas de suas características.

2.4. Coprocessamento

Com o crescimento populacional e a crescente procura por produto, há conseqüentemente um aumento na produção de resíduos, gerando uma procura por formas adequadas para sua gestão. O coprocessamento representa uma alternativa para dar um destino sustentável e adequado para estes resíduos, pois concilia de maneira segura os materiais descartados com o processo de fabricação do cimento (<http://coprocessamento.org.br>, 2013).

Já utilizado de forma ampla na Europa, Estados Unidos e Japão há aproximadamente 40 anos, o coprocessamento chegou ao Brasil no início da década de 90. Essa solução utiliza resíduos para substituir parte da matéria prima utilizada na fabricação do cimento e do combustível do forno responsável por transformar calcário e argila em clínquer (<http://coprocessamento.org.br>, 2013).

Vários fatores como a elevada temperatura da chama, o tempo de residência dos gases, a turbulência no interior do forno dentre outros, a incorporação dos subprodutos da queima dos resíduos ao clínquer, geram condições ideais e até superiores aos padrões exigidos para a destruição ambientalmente segura de grande volume de resíduos nos fornos de cimento (<http://coprocessamento.org.br>, 2013).

O coprocessamento é também uma possibilidade bastante competitiva se comparado com a disposição dos resíduos em aterros sem recuperação de gases ou a incineração, pois ao contrário dessas alternativas, consome grandes quantidades de resíduos sem gerar novos passivos ambientais (<http://coprocessamento.org.br>, 2013).

Considerando que caso os resíduos não fossem utilizados no coprocessamento eles seriam dispostos em aterros ou incinerados gerando assim emissões correspondentes a cada uma dessas destinações. O coprocessamento promove uma redução relativa nessas emissões de CO₂ Figura 14 e Figura 15, uma vez que utilizando esses resíduos as emissões geradas por parte do combustível tradicional utilizado pelos fornos rotativos de cimento são substituídas pelas emissões provenientes dos resíduos e estas por sua vez não são geradas pelas outras destinações.

Vale também lembrar, que mesmo com a incorporação no clínquer das cinzas geradas pela incineração dos resíduos o cimento produzido usando a técnica de coprocessamento possui a mesma qualidade do produzido com a utilização de combustíveis tradicionais, ou seja, o coprocessamento não altera em nada as características do cimento.

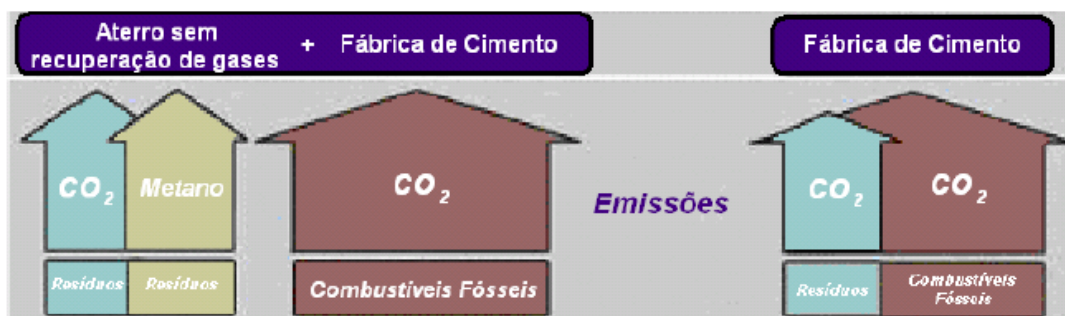


Figura 14 – comparação entre as emissões geradas pela disposição de resíduos em aterros e alternativa do coprocessamento

(Fonte – Apresentação Yushiro Kihara prof. Dep. Geociência – USP e Gerente de Tecnologia ABCP, disponível em <http://www.cbcs.org.br>, 2013).

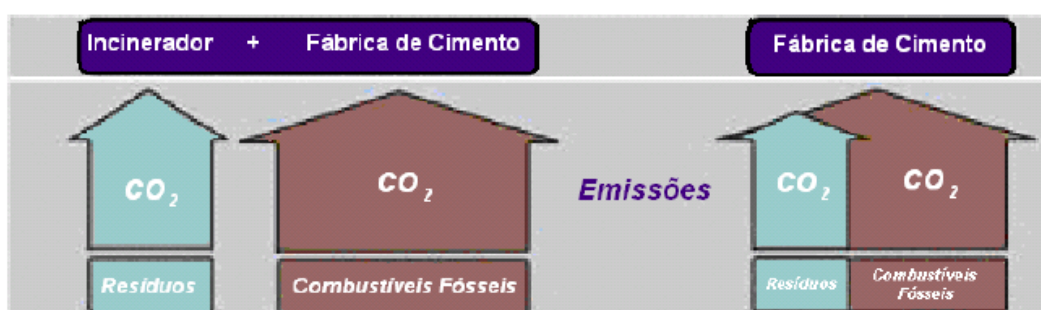


Figura 15 – comparação entre as emissões geradas pela destruição de resíduos em incineradores e alternativa do coprocessamento

(Fonte – Apresentação Yushiro Kihara prof. Dep. Geociência – USP e Gerente de Tecnologia ABCP, disponível em <http://www.cbcs.org.br>, 2013).

O Quadro 2 apresenta algumas vantagens e benefícios ao meio ambiente gerados pelo coprocessamento.

Apenas os materiais que não podem ser reciclados são utilizados no coprocessamento. Porém, nem todos os resíduos podem ser submetidos ao processo do coprocessamento, pois necessitam de tratamentos especiais. O Quadro 3 apresenta materiais que podem e não podem ser submetidos ao coprocessamento

O coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer deverá atender a Resolução CONAMA nº 264 de 1999-Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos, salvo a disposição sobre dioxinas e furanos, que deverá obedecer a Resolução CONAMA nº 316 de 2002-Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos (CONAMA nº 264 , 1999 CONAMA nº 316, 2002).

Quadro 2 – Vantagens e benefícios do coprocessamento.

Coprocessamento	
1	Promove a eliminação dos resíduos de forma segura e definitiva uma vez que os subprodutos destes materiais gerados pela queima são incorporados ao clínquer e utiliza esses resíduos como fonte de energia.
2	Não gera passivos ambientais.
3	Proporciona uma redução na utilização de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a emissão de CO ₂ .
4	Prolonga a vida de jazidas de calcário, visto que parte dos resíduos é utilizada como substituto para a matéria-prima do cimento.
5	Demanda um controle em tempo integral das operações e emissões do forno.
6	Diminui o emprego de recursos naturais não renováveis como combustíveis e matérias-primas minerais

(Fonte: <http://www.holcim.com.br>, 2013)

.Quadro 3 – Materiais que podem e não podem ser utilizados no coprocessamento

Materiais	
Podem ser utilizados	Não pode ser utilizados
borras oleosas, graxas, serragens, plásticos, pneus, papéis, embalagens, lixo doméstico classificado, entre outros.	resíduos hospitalares, materiais radiativos, pilhas, baterias, pesticidas, lixo doméstico não-classificado, entre outros.

(Fonte: <http://www.holcim.com.br>, 2013)

As resoluções estabelecem procedimentos operacionais, limites de emissão e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes, permitindo um melhor controle do processo de tratamento térmico de resíduos, de forma a diminuir os impactos ambientais resultantes destas atividades (CONAMA nº 264, 1999 CONAMA nº 316, 2002).

Todos os sistemas de tratamento térmico de resíduos deverão atender aos critérios técnicos fixados nestas Resoluções CONOMA, complementados, sempre que julgado necessário, pelos órgãos ambientais das regiões onde se encontram os sistemas, com a finalidade de atender às características regionais e locais.

3. POSSIBILIDADES DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), presente em uma série de normas da ISO 1400 emitidas pela *International Standards Organization*, que define normas de sistemas de gestão ambiental e tem o objetivo de apresentar prática uniforme e dar objetividade na realização de uma ACV (LINDMAN, 2012).

Métodos de Avaliação do Ciclo de Vida apareceram após diversas reuniões de iniciativa da *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC). Essas reuniões acarretaram, a partir de 1997, no desenvolvimento de uma série de normas (ISO 14040 e suas subseções 14041, 14042 e 14043) que forneciam diretrizes de como se conduzir uma ACV (ASHBY, 2009).

Hoje, no Brasil as normas referentes à Avaliação do Ciclo de Vida são: ABNT NBR ISO 14040:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura e a ABNT NBR ISO 14044:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações, que cancelam e substituem as ABNT NBR ISO 14041:2004, ABNT NBR ISO 14042:2004 e ABNT NBR ISO 14043:2005. Esta segunda edição da ABNT NBR ISO 14040:2009 também cancela e substitui sua edição anterior a ABNT NBR ISO 14040:2001 (ABNT NBR ISO 14040: 2009 e ABNT NBR ISO 14044: 2009).

3.1. Avaliação do Ciclo de Vida

Tendo em vista o aumento da percepção da relevância da proteção ambiental a Avaliação do Ciclo de Vida é uma das técnicas que vem sendo desenvolvida com a finalidade de facilitar a compreensão dos possíveis impactos ligados aos produtos, levando em consideração todas as etapas de seu ciclo, desde a obtenção das matérias-primas até a disposição final (ABNT NBR ISO 14040: 2009 e ABNT NBR ISO 14044: 2009).

No Quadro 4 estão apresentados os itens presentes da introdução da ABNT NBR ISO 14040: 2009 e ABNT NBR ISO 14044: 2009 que podem ser subsidiados por um ACV.

Também, conforme apresentado nas ABNT NBR ISO 14040: 2009 e ABNT NBR ISO 14044: 2009, uma ACV é constituída pelas etapas presentes no Quadro 5, etapas estas de extrema importância para um estudo de Avaliação do Ciclo de vida.

Quadro 4 - Subsídios de um ACV

	Possibilidades
1	A identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida
2	O nível de informação dos tomadores de decisão na indústria e nas organizações governamentais ou não governamentais (visando, por exemplo, ao planejamento estratégico, à definição de prioridades ou ao projeto ou reprojeto de produtos ou processos)
3	A seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo técnicas de medição.
4	O marketing (por exemplo, na implementação de um esquema de rotulagem ambiental, na apresentação de uma reivindicação ambiental ou na elaboração de uma declaração ambiental de produto).

(Fonte: ABNT NBR ISO 14040: 2009 e ABNT NBR ISO 14044: 2009 *apud* LINDMAN, 2012)

Quadro 5– Etapas para formação de uma ACV.

	Etapas de uma ACV
1	Definição de objetivo e escopo. O escopo de uma ACV precisa incluir a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, dependendo do objetivo e do uso pretendido do estudo. A profundidade e a abrangência da ACV variam consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo.
2	Análise de inventário do ciclo de vida (ICV). Consiste em um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo. Esta etapa engloba a recolhe dados necessários para alcance das finalidades do estudo.
3	Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV). A finalidade da AICV é fornecer informações adicionais para amparar na avaliação do ICV de um sistema de produtos, procurando a melhor compreensão de sua relevância ambiental.
4	Interpretação do ciclo de vida. Representa a ultima etapa do estudo de ACV, momento onde os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, são sumarizados e debatidos como base para considerações finais, recomendações e tomadas de decisão conforme definido no objetivo e escopo.

(Fonte: ABNT NBR ISO 14040: 2009 e ABNT NBR ISO 14044: 2009 *apud* LINDMAN, 2012)

3.2. Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada

De acordo com Ashby (2009) realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida através do método convencional pode ser tornar muitas vezes impraticável devido a sua alta complexidade.

Em sua maioria essas avaliações são realizadas utilizando inventários de emissões públicas ou comerciais existentes, onde esses dados não foram mensurados pelo fabricante ou fornecedor ou, utilizam dados provenientes de bancos de dados do exterior gerando assim uma ACV que não reflete a realidade do país. Tendo em vista as mudanças ocorridas nos insumos, combustíveis e processos produtivos, torna-se difícil um controle diário e a declaração dos impactos ambientais de um produto (AGOPYAN E JOHN, 2011 *apud* LINDMAN,2012).

Segundo Agopyan e John (2011), a única maneira de popularizar a avaliação do ciclo de vida é a criação de modelos simplificados. Modelos estes que irão quantificar as entradas de insumos e energia, as saídas de rejeitos e produtos, permitindo a obtenção desses dados de forma contínua e automática. Desta maneira, será mais fácil realizar o acompanhamento ambiental possibilitando à empresa a tomada de decisões (AGOPYAN E JOHN, 2011 *apud* LINDMAN,2012).

Levado pela complexidade de se realizar uma avaliação do ciclo de vida o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) propôs uma simplificação da metodologia focando apenas nos impactos considerados de maior relevância. Estes impactos são os cinco primeiros presentes no Quadro 6 que apresenta exemplos de categoria de impactos ambientais (AGOPYAN E JOHN, 2011 *apud* LINDMAN,2012).

Assim, a confecção da ACV se faz, para diversas finalidades, inexecutável. A dificuldade dessa execução tem estimulado a criação de duas linhas: a ACV simplificada - método simplificado que enfatiza as entradas mais relevantes e deixa de lado aquelas consideradas secundárias; e a utilização de *software* que proporcionam ferramentas que tornam mais fácil a realização de uma ACV (LINDMAN, 2012).

A ACV simplificada aceita um grau de aproximação suficiente para manter uma precisão satisfatória de forma a orientar a tomada de decisões mesmo tendo como referência um reduzido e simplificado inventário de recursos. A realização de uma ACV simplificado pode ser realizada fazendo uma Análise Quantitativa ou através de uma Análise Qualitativa (ASHBY, 2009).

Quadro 6 – Exemplos de categoria de impactos ambientais.

Impacto	Descrição
Mudanças Climáticas	Emissões de gases como CO ₂ , CH ₄ , NO _x , HCFC que diminuem a capacidade de emissão de energia de onda longa do globo terrestre para o espaço provocando aquecimento.
Uso de recursos naturais	Consumo das reservas de produto não renováveis ou exploração de produtos renováveis sem manejo ou acima da capacidade de recomposição.
Consumo de energia	Categoria que analisa a eficiência no uso de energia bem como a contribuição para o esgotamento de fonte de energias não renováveis.
Geração de resíduos	Acumulação de resíduos com risco de contaminação ambiental e desperdício de recursos naturais.
Consumo de água	Consumo de água na atividade, contribuição para o stress hídrico da região, e as consequências em capacidade de suporte da vida.
Toxicidade	Emissão ou uso de produtos que podem significar risco a saúde humana ou à de outras espécies, como dioxinas, furanos, formaldeídos, biocidas, metais pesados como o mercúrio.
Destruição da camada de ozônio	Emissão de gases como CFCs, Halon, HCFC, tricloroetano, principalmente por fluidos de ar-condicionados e geladeiras.
Poluição por nutrientes (eutrofização)	Contaminação do ambiente – especialmente de corpos de água – por elementos como fosfato, amônia, nitrogenados, fósforo, desequilibrando ecossistemas.
Acidificação	Contaminação do solo, do ar e da água, por ácidos (como SO _x), afetando animais, vegetação e até edifícios.
Poluição do ar	Emissões de gases como SO _x , NO _x , material particulado, inclusive aqueles que podem levar a formação de smog ⁶ fotoquímico. No caso do ambiente interno, emissões de compostos voláteis.

(Fonte: (AGOPYAN E JOHN, 2011 *apud* LINDMAN, 2012).

⁶ Smog é a junção de duas palavras inglesas: smoke e fog, respectivamente, fumaça e neblina. Caracteriza-se por mistura de gases, fumaça e vapores de água, sendo formada por óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos voláteis orgânicos (COV), dióxido de sulfureto, aerossóis ácidos e gases (AGOPYAN e JOHN, 2011).

3.3. Análise Qualitativa: O Método da Matriz

No Método da Matriz as etapas do ciclo de vida estão presentes como os cabeçalhos das colunas e os impactos como cabeçalho das linhas, assim como apresentado no exemplo na Figura- 8. É atribuído então, para cada elemento M_{ij} , um fator inteiro entre 0 (maior impacto) e 4 (menor impacto) que tem como base experiência guiada por *checklists*, pesquisas ou protocolos. A classificação do Produto Ambientalmente Responsável (Environmentally Responsible Product Rating, R_{erp}) total, consiste na soma da matriz (ASHBY, 2009)

	Material	Manufacture	Transport	Use	Disposal
Material resources	$M_{1,1}$	$M_{1,2}$			
Energy use	$M_{2,1}$	etc.			
Global warming					
Human health					
The biosphere					

Figura 16 – Exemplo de matriz de ACV simplificada.

(Fonte: ASHBY, 2009)

$$R_{erp} = \sum_i \sum_j M_{ij}$$

Existem diversas variantes deste método, diferenciando as categorias dos impactos nas linhas e as categorias do ciclo de vida nas colunas. Esse método tem a vantagem de ser flexível, se adaptar de forma fácil a diferentes produtos, propicia a economia de tempo e esforço e, quando realizado por profissionais experientes, pode levar em consideração pequenos detalhes das emissões e seus impactos (ASHBY, 2009).

Até o momento, não existe um consenso sobre uma métrica para mensurar o impacto no ciclo de vida do produto que seja trabalhável e apropriado para guiar o projeto. Em um ponto, entretanto, existe certo consenso internacional: o compromisso de uma progressiva redução nas emissões de carbono, interpretado normalmente na direção

do CO₂. O foco também é direcionado em reduzir o consumo de energia, mas visto que a energia e as emissões de dióxido de carbono estão diretamente ligados, diminuindo um, reduz-se o outro. Logo, torna-se lógico basear as decisões de projeto na geração de CO₂ ou no gasto de energia (ASHBY, 2009).

3.4. Análise Quantitativa: Método da Eco Seleção

O método da Eco seleção representa um modo alternativo para a realização da avaliação do ciclo de vida e é dividido em duas partes: eco auditoria e seleção. A eco auditoria compreende, de forma simples, as três primeiras etapas de uma ACV que consiste na definição do objetivo e escopo, análise de inventário e avaliação de impacto do ciclo de vida, já a seleção permite uma interpretação da avaliação para possibilitar uma escolha de ação (LINDMAN, 2012).

Assim, para superar os desafios da ACV, a eco auditoria foca seu objetivo somente em um recurso, a energia, e uma emissão, o gás carbônico (CO₂), transformando-se assim em uma avaliação do ciclo de vida rápida, onde é identificada a etapa que representa maior consumo de energia e/ou a que provoca maior emissão de dióxido de carbono (LINDMAN, 2012).

Em um primeiro momento, existe a necessidade de dominar a estratégia da Eco Seleção apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Estratégias para a Eco Seleção.

Estratégias para a Eco Seleção	
1	Adotar métricas simples de impacto ambiental.
2	Distinguir as etapas do ciclo de vida.
3	Basear a ação subsequente na repartição de energia ou de carbono

(Fonte: ASHBY, 2009)

Entretanto, para se realizar a eco auditoria e a seleção, é indispensável a realização de um estudo preliminar de seus dados de entrada, dados estes ecológicos e de propriedades dos materiais.

3.4.1. Eco Auditoria

Na eco auditoria é realizada uma avaliação rápida que envolve, de forma simplificada, as primeiras três etapas de uma ACV. Ela é responsável por identificar a etapa do ciclo de vida – produção de matéria – prima, fabricação do produto, transporte, utilização e descarte – que representa o maior consumo de energia ou é responsável pela maior emissão de CO₂. Normalmente, uma das etapas do ciclo de vida é responsável por 80% ou mais do total de consumo de energia e das emissões de CO₂. Essa discrepância se apresenta tão elevada que as ambiguidades na modelagem e a imprecisão nos dados não têm relevância. Deste modo, é necessário olhar para a etapa dominante, visto que é nela que se apresenta o maior potencial de ganhos, caso se realize alguma alteração (ASHBY, 2009).

Uma eco auditoria tem como principal objetivo e a comparação, propiciando diferentes opções de projetos para serem abordadas de forma rápida. A eco auditoria, assim, fornece para a seleção de materiais que possui como alvo minimizar o emissão de dióxido de carbono e o gasto de energia no decorrer do ciclo de vida do produto, equilibrando as influências da escolha em cada etapa do ciclo de vida (LINDMAN, 2012).

3.4.2. Seleção

Realizar a seleção de materiais engloba procurar o melhor ajuste entre as condições de projeto e as características dos materiais que podem ser utilizados para a fabricação do produto (ASHBY, 2009).

Entretanto, as condições do projeto, para um material de um produto, explicitam quais características o produto deve atender, mas não especificam as propriedades que os materiais devem ter. Assim, é preciso em um primeiro momento transformar as condições do projeto em restrições e objetivos que podem ser aplicados aos bancos de dados de materiais (fase de “tradução”) (ASHBY, 2009).

A próxima etapa é a de “triagem” que é o momento em que serão eliminados os materiais que não satisfazem as restrições obtidas na etapa anterior. Esta então é seguida pela etapa de “classificação”, que ordena os materiais que passaram pela etapa de triagem, por sua capacidade de atender aos critérios, assim como diminuir custos, pegada de carbono ou energia incorporada ao produto (ASHBY, 2009).

A etapa final da seleção é a “documentação”, que consiste em explorar profundamente os materiais com maior capacidade de atender aos requisitos, procurando analisar seus mais atuais empregos, as possíveis falhas ocorridas e as melhores técnicas de utilização desse material (ASHBY, 2009).

Pode-se observar na Figura 17 as etapas do processo de seleção.

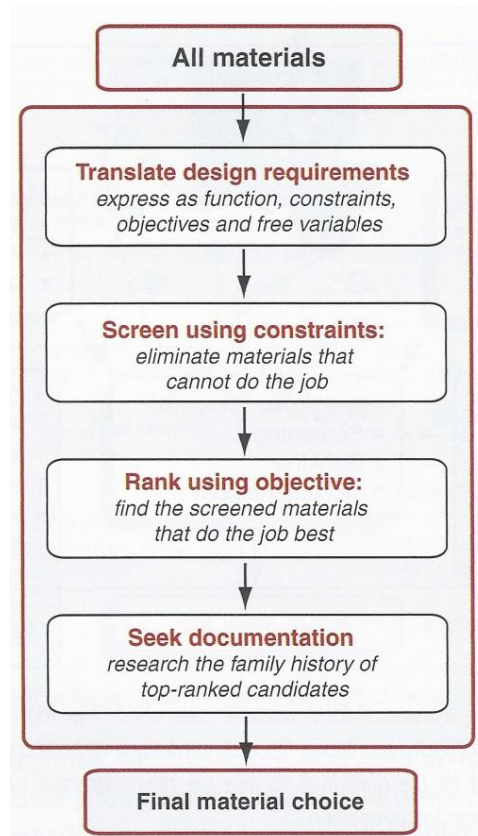


Figura 17 – Estratégia para seleção de material em quatro etapas.

(Fonte: ASHBY, 2009)

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso presente neste capítulo aborda a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida para o cimento *Portland* como forma de identificar as etapas do ciclo que apresentam maior nível de emissão de CO₂ e as alterações nas taxas de emissão de gás carbônico geradas por algumas alternativas utilizadas no processo de fabricação.

Para a realização deste estudo foi feita uma visita à fábrica de cimento da Lafarge em Cantagalo – RJ onde foram colhidos dados e informações.

4.1. A Empresa

A Lafarge é líder mundial em materiais de construção, alcançando reconhecimento em todas suas áreas de atuação: Cimento, Concreto e Agregados. Atua em 64 países e possui 65 mil empregados (<http://www.lafarge.com.br>, 2013).

Atuando no Brasil desde 1959, a Lafarge possui no país 1800 empregados e unidades industriais nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Paraíba, Bahia e Pernambuco, assim como representantes comerciais em todo o país (<http://www.lafarge.com.br>, 2013).

Para fabricação de cimento, a Lafarge possui oito fábricas e estações de moagem nas cidades de Arcos, Matozinhos, Montes Claros, Santa Luzia (MG), Caaporã (PB), Cantagalo (RJ), Candeias (BA) e Cocalzinho (GO) (<http://www.lafarge.com.br>, 2013).

Consciente do desafio que o aquecimento global representa para todo o planeta, a Lafarge no ano de 2001 se comprometeu com um audacioso objetivo, firmando uma parceria com a World Wide Fund for Nature (WWF), de reduzir suas emissões mundiais de CO₂ até 2010 em 20% em relação a as taxas de 1990. Como as metas de redução foram atingidas em 2009, o acordo foi renovado por mais 4 anos e novas objetivos foram traçados (<http://www.lafarge.com.br>, 2013).

A Lafarge Brasil vem acompanhando os compromissos mundiais do Grupo mantendo o índice de redução de emissão de CO₂ de suas unidades. Há, portanto, investimentos contínuos na adição de escória na produção do cimento, no avanço da eficiência energética e no coprocessamento – que faz uso de resíduos industriais, como papéis, borrachas, resíduos oleosos e pneus usados, em substituição aos combustíveis e matérias-primas usadas na fabricação de cimento (<http://www.lafarge.com.br>, 2013).

4.2. Produção de cimento na fábrica de Cantagalo.

Cantagalo é responsável pela fabricação dos cimentos Mauá e Campeão. O processo produtivo de cimento na fábrica de Cantagalo em muito se assemelha à apresentada no Capítulo 2, se distinguindo deste apenas em pequenos detalhes. As adições minerais utilizadas são a escória de alto-forno e o *Filler*.

Para o coprocessamento a fábrica recebe de fornecedores os resíduos já beneficiados e previamente preparados para a atividade. Estes são resíduos com poder de inflamabilidade, mais conhecidos como *blend*. Há, além do *blend*, pneus triturados que também funcionam como combustíveis.

4.3. Avaliação do Ciclo de Vida do Cimento Portland na fábrica de Cantagalo

4.3.1. Objetivo do estudo

Este estudo tem como objetivo identificar as etapas de produção do cimento *Portland* produzido na fábrica de Cantagalo que apresentam maior quantidade de emissões de CO₂ através da Avaliação do Ciclo de Vida e mostrar algumas alternativas utilizadas pelo fabricante com o objetivo de reduzir os níveis de CO₂ liberados durante o processo de fabricação do produto.

4.3.2. Escopo do estudo

4.3.2.1. Função do Sistema de Produto

O cimento *Portland* é uma das substâncias mais utilizadas pelo homem e isso se deve a características que lhe são peculiares quando fresco, como: trabalhabilidade e moldabilidade, alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo após seu endurecimento. O cimento pode ser utilizado tanto em peças de mobiliário urbano como em grandes barragens, em estradas ou edificações, em pontes, tubos de concreto ou telhados e outras finalidades (<http://www.abcp.org.br>, 2013).

4.3.2.2. Unidade Funcional

A unidade funcional consiste em uma tonelada de cimento *Portland*.

4.3.2.3. Fronteiras do sistema

Este estudo abordou as etapas do processo de obtenção da matéria-prima e fabricação do cimento *Portland*. A fronteira apresentada na Figura 18 foi escolhida por ser muito difícil obter e não se ter tempo hábil de mensurar as emissões geradas fora de seus limites, pois o produto é distribuído para diversas localidades, tem diversas finalidades e possui um ciclo de vida muito extenso.

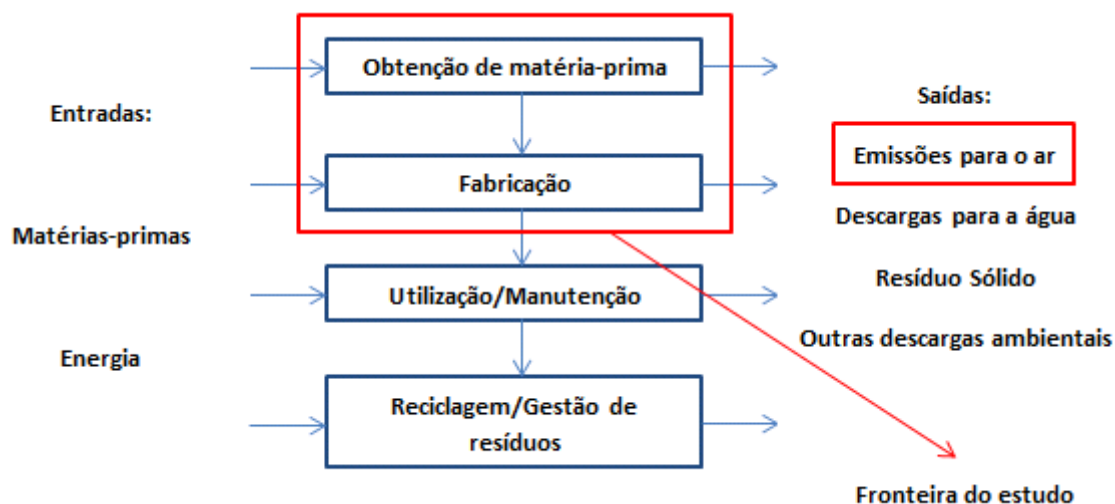


Figura 18 – Limites do estudo.

Existem diversas fontes responsáveis pela emissão de CO₂ ligados à operação de uma fábrica de cimento. Estas emissões, quando provenientes do consumo de combustível, podem ser separadas de duas formas: combustível utilizado pelo forno e combustível não utilizado pelo forno (<http://www.cement-co2-protocol.org>, 2013).

O combustível não utilizado pelo forno engloba os consumidos pelos equipamentos e veículos, equipamentos responsáveis pela secagem de componentes minerais e pela geração de energia no local (<http://www.cement-co2-protocol.org>, 2013).

Não ligado ao consumo de combustível, existe a calcinação/descarbonatação do calcário, reação química que ocorre principalmente no pré-calcinador quando a farinha

é submetida a elevadas temperaturas. Este processo é o maior responsável pelas emissões na fabricação do cimento.

Todas as formas de emissões de CO₂ apresentadas acima são consideradas emissões diretas causadas pela fabricação do cimento, entretanto, existem emissões indiretas que são geradas pelo consumo de energia, veículos usados para distribuição do produto que não são de posse da empresa e diversos outros fatores não ligados diretamente à produção (<http://www.cement-co2-protocol.org>, 2013).

4.3.3. Análise de Inventário do Ciclo de Vida

As fontes de emissões dentro da fronteira do estudo foram separadas e levantadas as entradas e saídas de cada uma delas.

As saídas (emissões de CO₂) foram calculadas usando como dados de entrada informações referentes à fábrica de Cantagalo como: quantidade de combustível utilizada pelo forno e não utilizada pelo forno, consumo de energia e quantidade de matéria prima produzida.

Por usar como dados de entrada números referentes à produção da fábrica de Cantagalo da Lafarge, e por serem esses dados sigilosos, as saídas não podem ser apresentadas na forma numérica e serão, quando necessário, representadas em porcentagem.

4.3.3.1. Ferramenta para o cálculo das emissões de CO₂

Foi utilizada como ferramenta de cálculo das emissões diretas e indiretas de CO₂ a planilha⁷ que faz parte do *The Cement CO₂ and Energy Protocol*. Este protocolo foi criado pela *Cement Sustainability Initiative (CSI)* do *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* com o objetivo de fornecer para as empresas fabricantes de cimento em todo mundo referências para facilitar e homogeneizar a formulação e avaliação de relatórios de emissões (<http://www.cement-co2-protocol.org>, 2013).

⁷ Disponível em www.cement-co2-protocol.org.

4.3.3.2. Emissões de CO₂ geradas indiretamente.

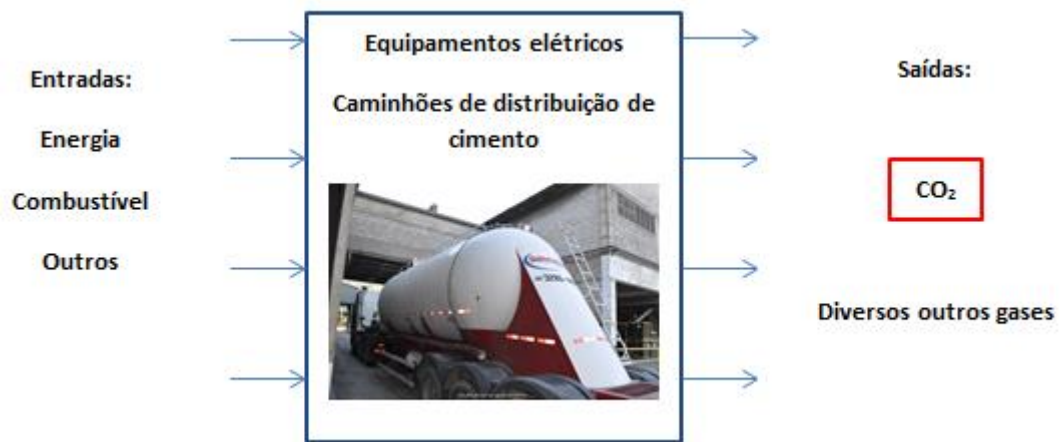


Figura 19 - Emissão gerada de forma indireta.

4.3.3.3. Emissões de CO₂ geradas pelo consumo de combustível não utilizado pelo forno.



Figura 20 – Emissão gerada pelo combustível não utilizado pelo forno.

4.3.3.4. Emissões de CO₂ geradas pela descarbonatação do calcário

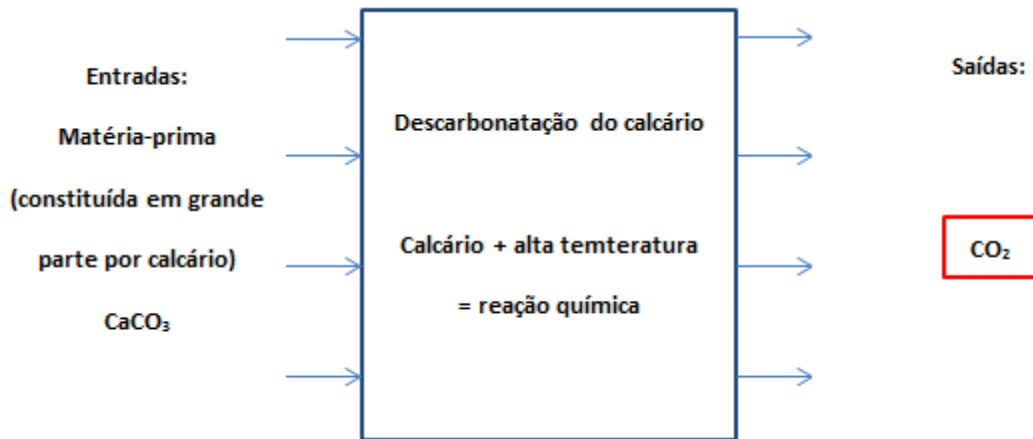


Figura 21 – Emissão gerada pela descarbonatação do calcário.

4.3.3.5. Emissões de CO₂ geradas pelo consumo de combustível pelo forno rotativo de cimento



Figura 22 – Emissões provenientes do consumo de combustível pelo forno.

4.3.3.6. Resultados

Analisando os resultados apresentados na Tabela 3, pode-se observar que as fontes que apresentam maiores emissões durante o processo de produção do cimento

(representando juntas quase 98%) são a utilização de combustível pelo forno e a calcinação da matéria prima.

A identificação dessas etapas com maior representatividade nas emissões dá a oportunidade ao fabricante de melhorar o desempenho ambiental do produto, pois pequenas alterações nestas fontes poderão trazer grandes benefícios, nesse caso diminuindo as taxas de CO₂ emitidas.

Tabela 3 - Porcentagem das emissões geradas por fonte presente no processo de fabricação de cimento

Fonte de emissão	Porcentagem
Indireta (apenas consumo de energia)	1,9 %
Combustível não utilizado pelo forno	0,4 %
Combustível utilizado pelo forno	33,5 %
Calcinação/descarbonatação	64,2 %

Essas informações serão utilizadas como base para as etapas realizadas nos próximos itens.

4.4. Impactos gerados nas taxas de emissão de CO₂ pelas alterações nas porcentagens de resíduos coprocessados e adições minerais.

Levando em consideração os processos que mais emitem dióxido de carbono identificados com a realização da ACV simplificada e sendo estes os que apresentam maior potencial em redução quando implementadas algumas alternativas.

Neste item foram realizadas simulações utilizando a planilha fornecida pelo CSI variando as porcentagens de resíduos utilizados no coprocessamento e as adições minerais com o intuito de ilustrar o impacto que essas variações geram nos níveis de emissão de CO₂ dos processos.

Todas as emissões estão expressas em kg CO₂/t de cimento produzido. Vale lembrar que os números gerados por essas simulações não refletem as emissões reais geradas pela fábrica de Cantagalo, apenas servem para demonstração.

4.4.1. Coprocessamento

Como o coprocessamento consiste na utilização de resíduos como combustível para o forno de cimento, a simulação foi feita variando a porcentagem de resíduo coprocessado de 0% até 50%, mantendo em 0% as adições minerais para a fabricação do cimento.

Observando a Tabela 4 e a Figura 23, que apresentam as emissões brutas⁸, pode-se identificar uma pequena redução se forem comparados os valores referentes a 0% e 50% de coprocessamento. Esse abatimento se dá devida a diferença dos fatores de emissão de CO₂ de cada combustível e pode ser considerada uma redução real.

Tabela 4 - Emissões brutas em Kg CO₂/ t de cimento produzido devido a variação das porcentagens de coprocessamento.

Emissões brutas em Kg CO₂/t cimento produzida				
% coprocessamento	Total	Calcinação	Comb. tradicional	Resíduo
0%	868	555	313	0
10%	860	555	282	23
20%	852	555	251	46
30%	844	555	220	69
40%	837	555	189	93
50%	829	555	158	116

Já, realizando a análise das emissões líquidas⁹ presentes na Tabela 5 e Figura 24 observa-se uma redução muito maior que a anterior, pois, além da redução real

⁸ Total de emissões diretas de CO₂ excluindo as emissões geradas pela produção de energia no local e combustão da biomassa presente em alguns resíduos utilizados no coprocessamento (*Internet Manual for printout*, disponível em www.cement-co2-protocol.org, 2013)

⁹ Total de emissões diretas de CO₂ excluindo as emissões geradas pela produção de energia no local, combustão da biomassa e emissões geradas pelos resíduos utilizados no coprocessamento (*Internet Manual for printout*, disponível em www.cement-co2-protocol.org, 2013)

decorrente da diferença nos fatores de emissão de cada material são deduzidas o CO₂ provenientes dos resíduos coprocessados gerando uma redução relativa.

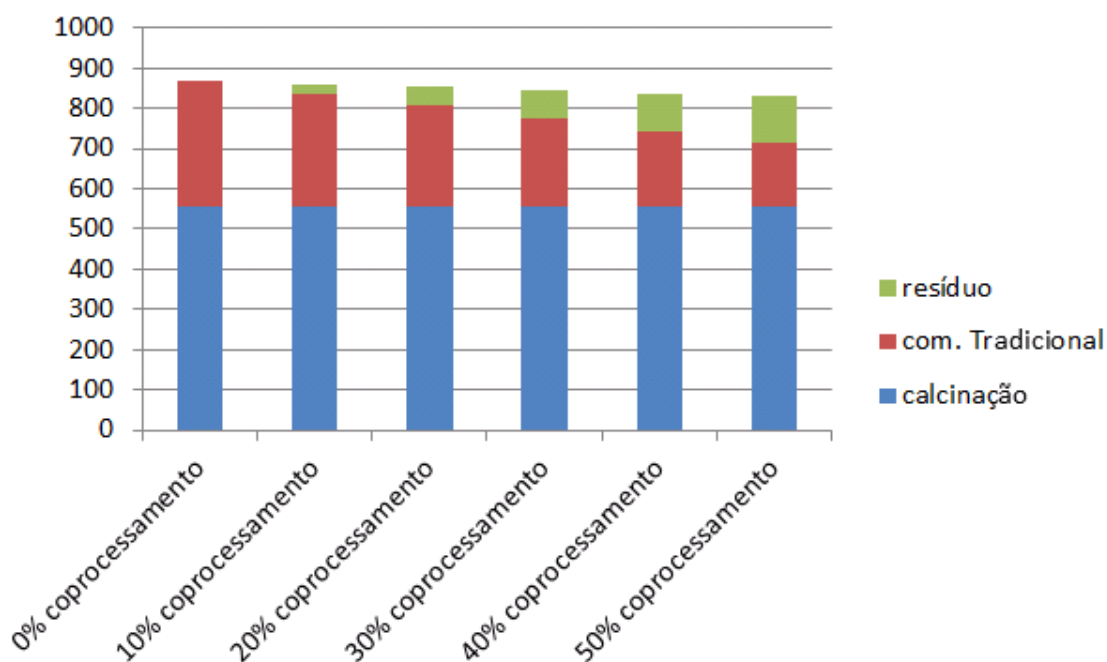


Figura 23 – Gráfico de emissões brutas em Kg CO₂/ t de cimento produzido devido à variação das porcentagens de coprocessamento.

Tabela 5 – Emissões líquidas em Kg CO₂/ t de cimento produzido devido à variação das porcentagens de coprocessamento.

Emissões líquidas de CO₂/t cimento produzida			
% coprocessamento	Total	Calcinação	Combustível
0%	868	555	313
10%	837	555	282
20%	806	555	251
30%	775	555	220
40%	744	555	189
50%	713	555	158

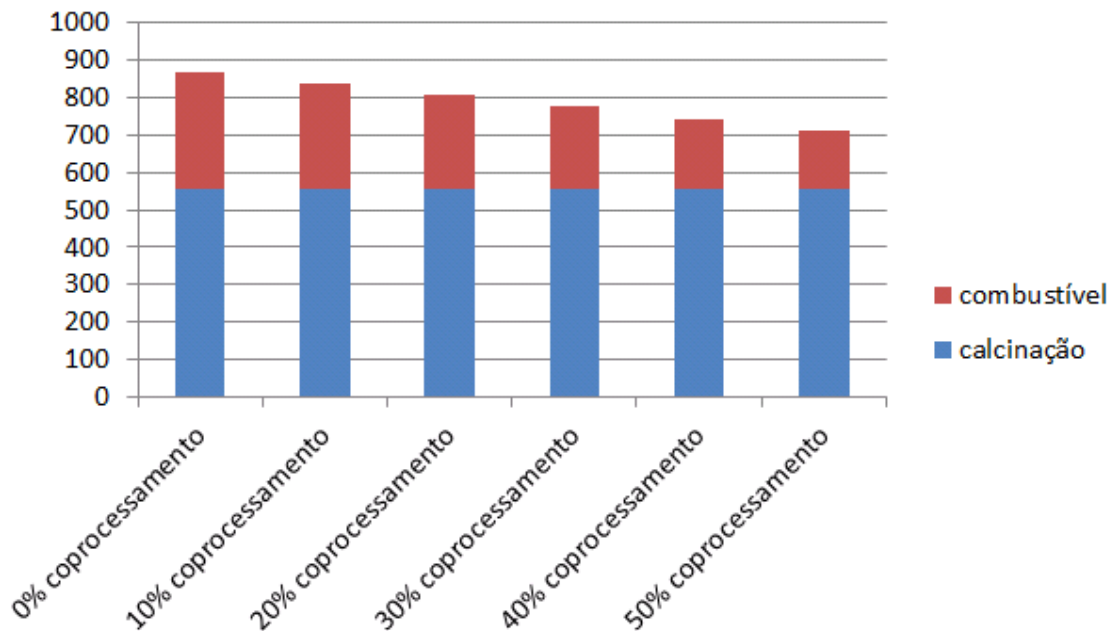


Figura 24– Gráfico de emissões líquidas em Kg CO₂/ t de cimento produzido devido à variação das porcentagens de coprocessamento.

Outro fato muito importante que pode ser visto neste item é que, mesmo elevando a quantidade de resíduos utilizado no coprocessamento, o CO₂ emitido pela calcinação do material calcário não se altera.

4.4.2. Adições minerais.

Seguindo proporções estipuladas por norma, foram variadas as quantidades de adições minerais para os cimentos CII-F (6% a 10% de material carbonático) e CII-E (6% a 44% de escória e material carbonático). Com o intuito de demonstrar apenas as alterações provocadas pelas adições foi considerada a utilização de 100% de combustível tradicional na geração de energia para o forno.

Levando em consideração as premissas apresentadas acima foram realizadas duas simulações apresentadas nas (Tabela 6 e Figura 25) e (Tabela 7e Figura 26) para os cimentos CII-F e CII-E.

Tabela 6 – Emissões em Kg CO₂/ t de cimento CII-F produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.

Emissões em Kg CO₂/t cimento produzida			
% de adição mineral	Total	Calcinação	Combustível
6%	817	522	295
7%	809	517	292
8%	801	512	289
9%	792	506	286
10%	783	501	282

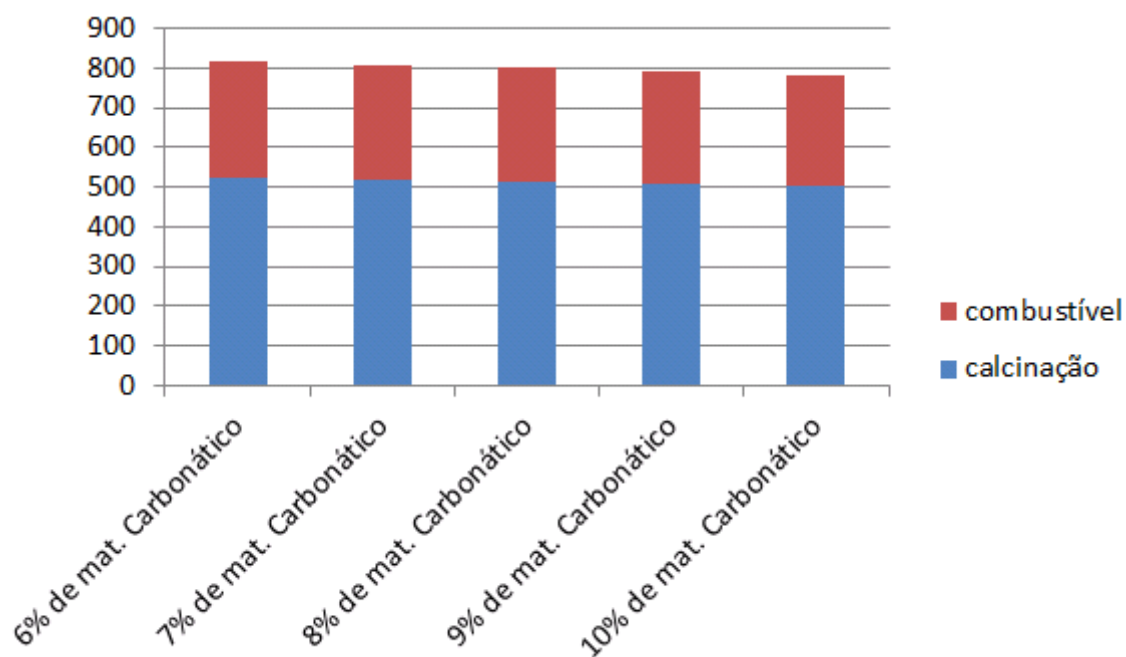


Figura 25 – Gráfico de emissões em Kg CO₂/ t de cimento CII-F produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.

Tabela 7 – Emissões em Kg CO₂/ t de cimento CII-E produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.

Emissões em Kg CO₂ CO2/t cimento produzida			
% de adição mineral	Total	Calcinação	Combustível
6%	817	522	295
10%	783	501	282
20%	698	446	252
30%	613	392	221
40%	527	337	190
44%	492	315	177

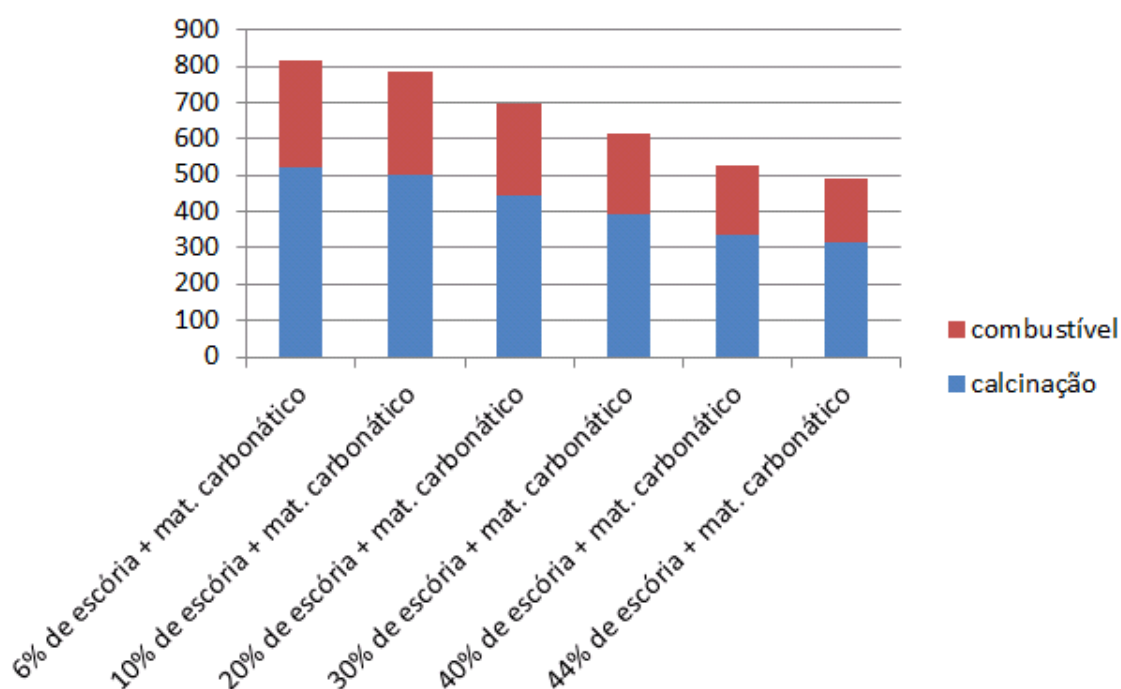


Figura 26 – Gráfico de emissões em Kg CO₂/ t de cimento CII-E produzido devido à variação da porcentagem de material carbonático.

Observou-se através das simulações realizadas que quanto maior as porcentagens de adições na mistura menores serão as taxas de emissão por tonelada de cimento e que a alteração no CO₂ emitido ocorre tanto na parcela referente ao consumo de

combustível pelo forno quanto no montante gerado pela calcinação do material calcário.

Essa alteração em ambas as parcelas acontece pois, com as adições, a quantidade de clínquer necessária para a fabricação de uma tonelada de cimento diminui acarretando em um menor consumo de combustível e matéria-prima.

4.4.3. Coprocessamento e adições minerais.

Depois de realizadas as simulações com as alternativas de coprocessamento e adições minerais separadamente, neste item foi realizada uma simulação considerando a fabricação de um cimento CII-E variando ambas as proporções.

As proporções adotadas foram a mínima de 0% de resíduo coprocessado e 6% de adições minerais e a máxima de 50% de resíduo coprocessado e 44% de adições minerais possíveis levando em consideração os percentuais de adição mineral definidos pela NBR 11578.

Nas Tabela 8 e Figura 27 que representam as emissões brutas de CO₂ por tonelada de cimento produzido, comparando as duas proporções consideradas, pode-se observar uma queda de 347 Kg CO₂/t de cimento produzido representando uma queda de aproximadamente 43%.

Tabela 8 – Emissões brutas em Kg CO₂/t de cimento CII-E produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento.

Emissões brutas em Kg CO₂/t cimento produzida				
% adições/%resíduo	Total	Calcinação	Comb. tradicional	Resíduo
6% / 0%	817	522	295	0
44%/50%	470	315	89	66

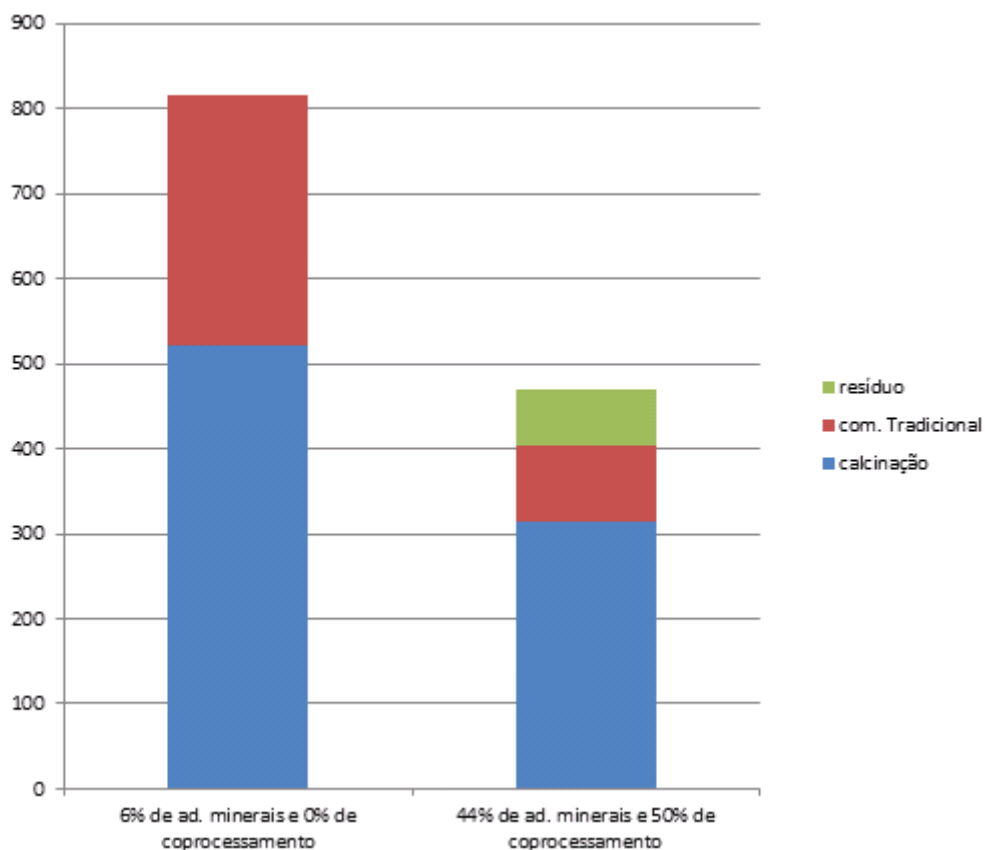


Figura 27 – Gráfico de missões brutas em Kg CO₂/t de cimento CPII-E produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento.

Porém, quando levadas em consideração as emissões líquidas de CO₂ pelo cimento Tabela 9 e Figura 28 obtido com o máximo das proporções, nota-se uma redução de 413 Kg CO₂/ t de cimento produzido, o que representa uma queda de cerca de 51% em relação ao cimento obtido com as mínimas proporções.

Tabela 9 – Emissões líquidas em Kg CO₂/ t de cimento CPII-E produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento.

Emissões líquida em Kg CO₂/t cimento produzida			
% adições/%resíduo	Total	Calcinação	Comb. tradicional
6% / 0%	817	522	295
44%/50%	404	315	89

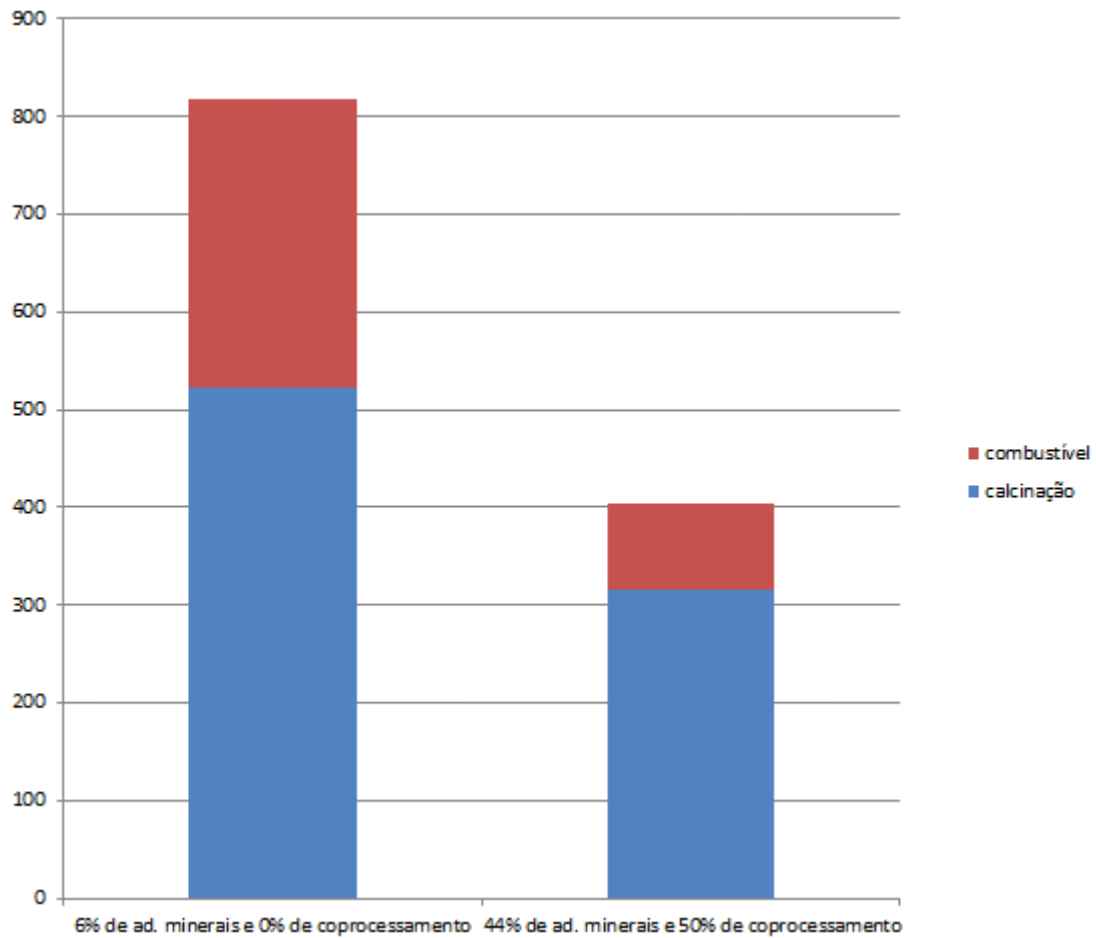


Figura 28 – Emissões líquidas em Kg CO₂/ t de cimento CPII-E produzido devido à variação das porcentagens de material carbonático e coprocessamento.

Essas simulações realizadas nesse item mostram que a associação do coprocessamento de resíduos com as adições minerais ao cimento, apresenta uma alternativa promissora para reduzir as emissões de CO₂ geradas pela fabricação de cimento *Portland*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento sustentável na construção civil vem sendo tema de diversos debates nos últimos tempos e, a indústria de materiais de construção vem tentando acompanhar a demanda por diminuir os impactos ambientais gerados em toda a cadeia da construção civil.

Diante desse cenário a indústria do cimento, sendo este um dos materiais mais utilizados na construção, vem buscando meios de tornar o seu produto ou seu processo produtivo cada vez mais sustentável.

A Avaliação do Ciclo de Vida pode ser considerada uma boa ferramenta para auxiliar a indústria cimenteira na tarefa de reduzir seus impactos, pois pode subsidiar: a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida; o aumento no nível de informação dos tomadores de decisão na indústria e nas organizações governamentais ou não governamentais; a seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo técnicas de medição; e o *marketing*.

Como embasamento para a pesquisa, inicialmente foi apresentada uma breve descrição sobre a história do cimento citando as primeiras construções que foram feitas utilizando materiais cimentícios, as primeiras tentativas de se obter cimento de forma artificial, quando e onde apareceram as primeiras indústrias de cimento no Brasil e o panorama atual desta atividade.

Apresentou-se as etapas de produção de cimento passando pela obtenção e beneficiamento da matéria-prima, a transformação da farinha em clínquer pelo forno rotativo de cimento, a geração do cimento pela moagem do clínquer juntamente com algumas adições minerais até sua distribuição para o mercado consumidor.

Posteriormente, há uma abordagem sobre as adições minerais incorporadas ao cimento durante o processo de fabricação mostrando os tipos de adição, como são formadas e as normas referentes aos cimentos que possuem em sua composição alguma dessas adições.

Também foi apresentado o coprocessamento descrevendo sua função, benefícios para a fabricação do cimento, os tipos de resíduos que podem ser utilizados e as Resoluções CONAMA que controlam e fornecem diretrizes para a realização dessa atividade.

Como forma de se familiarizar com uma metodologia para a obtenção das emissões durante as etapas de produção do cimento apresentou-se algumas alternativas possíveis para se realizar uma ACV, suas referentes normas (ABNT ISO 14040 e ABNT ISO 14044) e as etapas que a compõem.

Como Estudo de caso foi realizada uma ACV simplificada como subsídio a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental do cimento para diferentes etapas do seu ciclo e propor alterações nas etapas que possuem maiores índices de emissões.

No entanto, para este estudo, não foi possível considerar todo o ciclo de vida do cimento para a realização da ACV devido à dificuldade em obter informações referentes às etapas fora da fronteira da fábrica. Outra dificuldade encontrada para a confecção da ACV foi o fato das informações de produção obtidas na fábrica serem sigilosas e não poderem ser apresentadas, isso fez com que se interrompesse o estudo na fase de Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e seus resultados fossem apresentados apenas em porcentagem.

Mesmo com essas limitações o estudo de ACV permitiu identificar as etapas, dentro da fronteira estabelecida, que representavam maior impacto ao meio ambiente. A identificação dessas etapas permitiu demonstrar, através de simulações, alterações que permitiriam melhorar o desempenho do cimento em relação a quantidade de CO₂ emitida em sua produção.

Pode-se concluir com a realização desse trabalho que, embora a indústria cimenteira brasileira ter as menores emissões de dióxido de carbono no mundo, ainda existe a possibilidade de redução nas taxas de CO₂ emitido caso fossem elevadas as quantidades de resíduos coprocessados pelos fornos de produção de cimento e de adições minerais do cimento.

Como sugestão para trabalhos futuros propõem-se que, na ocasião em que os dados se tornem públicos, seja realizada uma ACV de forma mais completa, contemplando todo o ciclo de vida do cimento. No entanto, faz-se necessário a elaboração e disponibilização de um banco de dados de Inventários de Ciclo de Vida para que toda a cadeia seja englobada. Deve-se também realizar estudos que tenham o objetivo de encontrar outras alternativas para se reduzir os impactos ambientais gerados na produção do cimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, NBR 11578: 1991. **Cimento Portland composto.**
- ABNT, NBR 12653: 1992. **Materiais pozolânicos – Especificação.**
- ABNT, NBR 5732: 1991. **Cimento Portland comum.**
- ABNT, NBR 5733: 1991. **Cimento Portland de alta resistência inicial.**
- ABNT, NBR 5735: 1991. **Cimento Portland de alto-forno.**
- ABNT, NBR 5736: 1991. **Cimento Portland pozolânico.**
- ABNT, NBR ISO 14040:2009. **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura – Maio/ 2009**
- ABNT, NBR ISO 14044:2009. **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações – Maio/ 2009**
- AGOPYAN, A. e JOHN, V.M.; **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil.** Série Sustentabilidade – Volume 5. São Paulo: Blucher, 2011.
- ASHBY, M.F.; **Materials and the Environment: Eco Informed Material Choice.** Burlington: Elsevier, 2009.
- <<http://coprocessamento.org.br>>. Acesso em: 01 de agosto de 2013.
- <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.
- <http://www.cbcs.org.br/userfiles/download/ACV-s_CBSCS-ABCP_YushiroKihara.pdf>. Acesso em: 20 de julho de 2013.
- <<http://www.cement-co2-protocol.org>>. Acesso em: 27 de agosto de 2013.
- <<http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br>>. Acesso em: 01 de agosto de 2013.
- <<http://www.holcim.com.br>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.
- <<http://www.lafarge.com.br>>. Acesso em: 28 de maio de 2013.
- <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.
- <<http://www.vcimentos.com.br>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.
- <<http://www.wbcdcement.org>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M.; **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 1 ed. São Paulo: IBRACOM, 2008.

PASSUELO, Alexandra; JACINTO, Ana; KIRCHHEIN, Ana; et al; **Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações**. 1 ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia – IBRACON, V.1 e V.2,2005. 1600 p.

RESOLUÇÃO CONAMA nº 264, 1999

RESOLUÇÃO CONAMA nº 316, 2002