UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÃO DE CO_2 NA INDÚSTRIA DO CIMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CIMENTO LC^3 E O CIMENTO PORTLAND COMPOSTO

VICTOR SILVA QUEIROZ

ORIENTADOR: JOÃO HENRIQUE DA SIVA RÊGO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO / 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÃO DE CO_2 NA INDÚSTRIA DO CIMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CIMENTO LC^3 E O CIMENTO PORTLAND COMPOSTO

VICTOR SILVA QUEIROZ

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

_____

JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)

_____

CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA FEITOSA PEREIRA, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

JEAN MARCELO FERNANDES SOUTO, MSc. (UEM)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 15 de Fevereiro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

QUEIROZ, VICTOR SILVA
Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO_2 na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC^3 e o cimento Portland composto [Distrito Federal] 2017. xi, 84 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)
Monografia de Projeto Final-Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Cimento LC^3	2. Avaliação de Ciclo de Vida
3. Cimento Portland Composto	4. Estudo comparativo
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

QUEIROZ, V.S. (2017). *Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO_2 na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC^3 e o cimento Portland composto*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 84 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Victor Silva Queiroz
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO_2 na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC^3 e o cimento Portland composto.
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

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

Victor Silva Queiroz
vsqueiroz6@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus por ter me guiado ao longo da vida, pelas escolhas certas, e pela saúde, força e persistência, especialmente neste ano de tantas adversidades.

Aos meus pais, a minha madrinha e ao meu irmão pelo apoio incondicional que me deram para poder seguir com meus estudos e permanecer na universidade.

Quero demonstrar minha gratidão à Universidade de Brasília da qual sempre me orgulhei em fazer parte. Aos amigos e colegas de curso das Engenharias Civil, Ambiental e Florestal. A todos que ouviram minhas lamentações, me deram forças e proporcionaram momentos inesquecíveis.

Agradeço também ao professor João Henrique pela orientação nesta pesquisa e pela compreensão de todos os obstáculos que enfrentei para concluí-la.

Há muitas outras pessoas que gostaria de agradecer, que não irei nominá-las para não me estender, mas que de forma direta ou indireta tornaram minha jornada menos exaustiva nesta minha busca ao conhecimento e realização deste projeto.

À Thinkstep GaBi Education pela disponibilização do software GaBi e a CIPLAN – DF pelos dados fornecidos para a realização deste estudo.

RESUMO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMISSÃO DE CO_2 NA INDÚSTRIA DO CIMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CIMENTO LC^3 E O CIMENTO PORTLAND COMPOSTO.

Autor: Victor Silva Queiroz
Orientador: João Henrique da Silva Rêgo

É crescente a conscientização para redução do impacto ambiental de processos industriais, seja por organizações internacionais ou grupos de pesquisadores que incentivam o desenvolvimento sustentável das indústrias. No processo produtivo do cimento, produzem-se grandes impactos decorrentes principalmente das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de recursos minerais e combustíveis fósseis. Tem-se observado como solução para reduzir os impactos da indústria do cimento em termos de emissão de gases, a incorporação de materiais cimentícios suplementares (MCS), como alternativa de substituição ao clínquer. Dentre os MCS ou adições minerais, destaca-se o fíler calcário e a argila calcinada, com os quais vêm sendo realizadas pesquisas para composição de um novo cimento conhecido como LC^3 (Limestone Calcined Clay Cement). Portanto, têm-se como objetivo principal deste estudo realizar um estudo comparativo de emissão de CO_2 do processo produtivo do cimento LC^3, com teor de substituição de 50%, utilizando como referência o cimento Portland composto. Propõe-se a aplicação da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O software GaBi foi utilizado como suporte para realizar a ACV. O método de avaliação de impacto utilizado foi o CML 2001 e a categoria de impacto avaliada foi o potencial de aquecimento global quantificado em termos de emissão de CO_2 equivalente. O projeto concluiu que o cimento LC^3, com substituição de 50%, apresenta-se como solução ambientalmente preferível, com redução de aproximadamente 52% na emissão de CO_2, atribuído principalmente à descarbonatação no processo de calcinação.

Palavras-chave: ACV, cimento LC^3, potencial de aquecimento global, *GaBi*.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Justificativa 3
1.2. Objetivos da pesquisa 4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1. INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND 5
2.1.1. Sustentabilidade na indústria do cimento 6
2.1.2. Principais Impactos Ambientais 8
2.1.3. Processo Produtivo 10
2.1.4. Extração de Matérias-Primas e Transporte 15
2.1.5. Calcinação 16
2.1.6. Materiais cimentícios suplementares (MCS) 17
2.1.7. Substituição do clínquer 20
2.2. CIMENTO LC^3 21
2.2.1. Definições 21
2.2.2. Teor de substituição de clínquer 21
2.2.3. Proporção entre os elementos 23
2.2.4. Qualidade da argila utilizada 24
2.2.5. Estudos de viabilidade econômico-ambiental 24
2.3. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV) 28
2.3.1. Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida 29
2.3.2. Definição de escopo e objetivo 30
2.3.3. Análise de inventário de ciclo de vida 31
2.3.4. Avaliação do impacto do ciclo de vida 32
2.3.5. Interpretação de resultados 34
2.3.6. A ACV através de *softwares* de balanço de massa 36
2.3.7. ACV no contexto mundial 37
2.3.8. ACV e a indústria do cimento 38
3. METODOLOGIA 40
3.1. INTRODUÇÃO 40
3.2. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO 40
3.2.1. O sistema do produto 41
3.2.2. Unidade funcional 42
3.2.3. Fronteiras do sistema 42
3.2.4. Escolha dos cimentos 43

3.2.5. Fonte de dados 43
3.2.6. Limitações 43
3.3. ANÁLISE DO INVENTÁRIO 44
3.3.1. Consumo de materiais 44
3.3.2. Transporte 46
3.3.3. Emissões 46
3.3.4. Modelagem do inventário 46
3.4. AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL 48
3.4.1. Escolha do método de avaliação 48
3.5. INTERPRETAÇÃO 49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 50
4.1. CRIAÇÃO DAS REDES DE FLUXO 50
4.1.1. Cimento Portland composto CP II Z 50
4.1.2. Cimento LC^3 51
4.1.3. Gastos energéticos 51
4.2. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA 54
4.2.1. Resultado de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-}eq}$) 56
4.3. DISCUSSÕES RELEVANTES 61
5. CONCLUSÕES 63
5.1. Sugestões para trabalhos futuros 64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65
ANEXO A: Fluxograma do processamento do cimento Portland composto com pozolana no software GaBi. 72
ANEXO B: Fluxograma do processamento do cimento LC^3 no software GaBi. 73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação dos continentes no consumo mundial de cimento 6
Figura 2 - Produção mundial de cimento Portland 1990-2050 7
Figura 3 - Consumo de energia na produção de cimento 9
Figura 4 - Processo de produção do cimento 12
Figura 5 - Evolução do uso de adições minerais no Brasil (SNIC, 2010)..... 15
Figura 6 - Propriedades básicas de alguns MCS's 18
Figura 7 - Sinergia do cimento LC^3..... 22
Figura 10 - Estrutura básica para otimização do LC^3..... 23
Figura 9 - Composição do cimento LC^3 (EMMANUEL et al., 2015). 24
Figura 10 - Diagrama de fluxo potencial de sustentabilidade do cimento LC^3..... 25
Figura 11 - Emissões de CO_2 associadas à produção de LC^3 com 45% de MCS comparado aos cimentos referenciais P-35 e PP-25 em Cuba 26
Figura 12 - Resistência à compressão normalizada para OPC (Vizcaíno et al., 2015). 27
Figura 13 - Fases da ACV 29
Figura 14 - Categorias de fluxo de materiais de um inventário 31
Figura 15 - Principais categorias de impacto segundo o CML (adaptado de CHENANI et al., 2015)..... 36
Figura 16 - Exemplo de caracterização de acordo com o fator de caracterização relevante.... 36
Figura 17 - Emissões médias de CO_2 na produção de 1 kg de cimento Portland em diferentes regiões (JOHN et al., 2008)..... 39
Figura 18 - Sistema de produto "do berço ao portão" da fabricação do cimento 41
Figura 19 - Delimitação das fronteiras do estudo de ACV comparativo 42
Figura 20 - Fronteiras consideradas no estudo da ACV..... 43
Figura 21 - Relação clínquer/cimento dos tipos de cimento analisados na ACV. 45
Figura 22 - Fluxograma das etapas metodológicas. 49
Figura 23 - Representação de valores médios de consumo elétrico e de matérias-primas para produção de uma tonelada dos cimentos comparados. 53
Figura 24 - Representação do resultado de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$)..... 58
Figura 25 - Resultado da ACV na categoria potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$) em total absoluto. 60

Figura 26 - Resultado da contribuição por processamento da ACV do cimento CP II Z na categoria de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-}eq}$) em total absoluto. 60
Figura 27 - Resultado da contribuição por processamento da ACV do cimento LC^3 na categoria de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-}eq}$) em total absoluto. 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conversão dos GEE em $CO_{2\text{-eq}}$ 10
Tabela 2 - Teores de adições normalizadas nos diferentes tipos de cimentos Portland no Brasil. 15
Tabela 3 – Teores máximos de substituição para os cimentos Portland no Brasil..... 20
Tabela 4 - Índices de substituição do clínquer por argila calcinada e fíler calcário na literatura. 22
Tabela 5 - Composição dos cimentos para avaliação de impactos (BERRIEL et al., 2015). .. 26
Tabela 6 - Emissões de CO_2 vs fator de clínquer na produção de cimento (VIZCAÍNO et al., 2015)..... 28
Tabela 7 - Composição química da mistura crua do clínquer Portland. 44
Tabela 8 - Processos analisados para o inventário da análise de ciclo de vida do cimento LC^3 e cimento Portland composto com pozolana..... 47
Tabela 9 – Considerações metodológicas do estudo comparativo. 47
Tabela 10 - Valores médios de consumo de energia elétrica nas várias etapas de fabricação dos cimentos em kWh/t de cimento. 52
Tabela 11 - Valores médios de consumo de energia térmica na etapa de calcinação em kg/t de cimento. 53
Tabela 12- Etapa de britagem e homogeneização nos processos de produção do cimento CP II Z e LC^3. 54
Tabela 13 - Etapa de calcinação nos processos de produção do cimento CP II Z e LC^3. 55
Tabela 14 - Etapa de moagem do cimento nos processos de produção do cimento CP II Z e LC^3. 55
Tabela 15 - Resultado da ACV na categoria de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$). 56

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
CSI	*Cement Sustainability Initiative*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de efeito estufa
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudança Global do Clima
LC^3	*Limestone Calcined Clay Cement*
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MME	Ministério de Minas de Energia
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
OPC	*Ordinary Portland Cement*
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA	Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
ton.	Toneladas
UNEP	*United Nations Environment Program*
WBCSD	*World Business Council for Sustainable Development*
BMCC	*Building Material and Component Combinations*
WPC	*Whole Process of the Construction*
NO_X	Óxidos de Nitrogênio
SO_2	Dióxido de Enxofre
CO	Monóxido de Carbono
COV_S	Compostos Orgânicos Voláteis

1. INTRODUÇÃO

A produção de cimento enfrenta grandes desafios com relação à emissão de poluentes atmosféricos, recursos energéticos e consumo de recursos naturais, investidos no processo de fabricação. As tendências atuais de produção indicam que até 5% das emissões globais de CO_2 estão relacionadas à indústria do cimento, sendo que 50% destas emissões ocorrem durante a produção de clínquer, 40% na queima de combustíveis para aquecimento de fornos e 10% provêm de uso de eletricidade e transporte (WBCSD, 2012).

Segundo Martirena e Scrivener (2015), o cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na vida moderna e, associado ao nível de desenvolvimento de um país. Sua produção mundial em 2010 foi de 3,3 bilhões de toneladas, sendo que nenhum outro material se compara ao cimento e ao concreto em termos de volume de produção. Ainda segundo os autores, cerca de 10% das emissões antropogênicas totais de CO_2 estão relacionadas à fabricação de concreto, sendo que 85% são produzidas durante a fabricação do cimento. Dessa forma, qualquer menor alteração em seu processo de fabricação teria um impacto considerável sobre o lançamento de CO_2 na atmosfera.

O aumento da demanda tem sido fundamentado no desenvolvimento e crescimento das chamadas "economias emergentes", através de obras de infraestrutura para a industrialização e urbanização nesses países (VIZCAÍNO *et al*., 2015). No Brasil, esse aumento pode ser observado ao longo das últimas décadas, impactando no consumo energético e emissões de CO_2, impulsionado também pelo crescimento das indústrias de mineração, manufatura e construção civil. Além disso, a indústria brasileira de cimento desempenha um papel importante no cenário nacional e internacional, ocupando a quarta posição entre os maiores produtores mundiais (ABCP, 2015).

Em 2002, os fundadores da Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) publicaram o seu Plano de Ações com a definição de um cronograma de trabalho com foco em áreas específicas para tratar de questões ambientais ou sociais, e projetos individuais, recorrendo à inovação e à adoção de boas práticas. A Iniciativa é representada pelas principais companhias de cimento que produzem coletivamente quase 50% do cimento mundial, exceto a China, e tem por objetivo

identificar os assuntos-chave para a sustentabilidade do setor ao longo dos próximos 20 anos e estabelecer medidas confiáveis e significativas (WBCSD, 2012).

Nesse contexto, o Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceu, em 2015, um grupo internacional com mais de 20 especialistas da academia e da indústria, de países desenvolvidos e em desenvolvimento com o objetivo de avaliar técnicas alternativas, de baixo custo, específicas para a fabricação e utilização do cimento, capazes de reduzir as emissões de CO_2 e aumentar a eficiência dos materiais em toda a cadeia do cimento. A abordagem do grupo limitou-se a soluções de materiais, já que aspectos como combustíveis renováveis e energia já haviam sido analisados em detalhe (SCRIVENER *et al.*, 2016).

Um levantamento da CSI, conhecido como Mapeamento Tecnológico do Cimento, com horizonte até 2050, visa mapear atuais e potenciais tecnologias que contribuam para a redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pela indústria do cimento, atendendo à viabilidade econômica e às políticas públicas relacionadas. No Brasil, o mapeamento foi lançado em 2014 e conta com o apoio dos associados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), além de representantes do governo e academia. O objetivo é retratar a atual situação do setor e indicar caminhos a serem seguidos pela indústria para mitigar ainda mais as emissões de gases de efeito estufa: desenvolvimento tecnológico, eficiência energética, combustíveis alternativos, adições para substituir clínquer, captura e armazenamento do carbono (CCS), dentre outros.

O uso de cimentos com baixo teor de clínquer podem garantir um caminho sustentável para minimizar o impacto ambiental, sendo que a utilização de diversos materiais cimentícios suplementares (MCS) como substituição de clínquer vem sendo realizada nos últimos anos a fim de mitigar os impactos a longo prazo. Segundo Scrivener e Favier (2015), os caminhos mais promissores para melhorar a sustentabilidade do cimento são através da mistura do clínquer de cimento Portland com materiais de substituição, sendo as argilas calcinadas a fonte mais promissora de MCS que podem contribuir substancialmente para reduzir o impacto ambiental do cimento.

Scrivener (2014) afirma que um novo tipo de cimento, baseado em uma mistura de calcário e argila calcinada, conhecido como LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*) pode reduzir as emissões de CO_2 em até 30%. Ainda segundo a autora, o material pode se tornar referência para

concretos de baixo carbono, já que o novo sistema possui um baixo custo de produção, tecnologia conhecida e pode ser produzido com os equipamentos de fabricação existentes, constituindo-se uma solução real e viável em escala global. Estudos experimentais apresentam resultados de desempenho satisfatórios na produção do cimento LC^3 com composição mineral de 40 a 50% de clínquer, 30 a 40% de argila calcinada, 15 a 20% de fíler calcário e 4 a 7% de gesso, enfocando também a necessidade de estudos relacionados aos aspectos técnicos, econômicos e ambientais da influência da variação na composição desses parâmetros no cimento (MARTIRENA & SCRIVENER, 2015).

Levanta-se a necessidade de conhecer o processo produtivo do novo cimento, de forma a avaliar o desempenho ambiental utilizando ferramentas e estudos comparativos afim de quantificar o potencial sustentável do uso do cimento LC^3. Uma forma de mensurar os impactos ambientais de um produto ou processo é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste na mensuração das entradas (consumo de matéria-prima, energia) e as saídas (emissões, resíduos, efluentes etc.), ao longo do ciclo de vida do objeto de estudo. Segundo a ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) a avaliação se baseia no estudo dos 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.

1.1. Justificativa

As mudanças climáticas, suas causas e consequências, têm sido tema recorrente da agenda ambiental nos últimos anos. Com a pressão internacional para a diminuição das emissões de CO_2, a indústria do cimento apresenta relevância, uma vez que a emissão de dióxido de carbono é intrínseca ao seu processo produtivo, seja na transformação química da matéria-prima em cimento, seja na queima de combustíveis para alimentar o processo.

Considerando que os principais impactos ambientais ocorrem no processo de fabricação e transporte de materiais, Caldas (2016) afirma que é cada vez mais notória a necessidade de se desenvolver pesquisas relacionadas, principalmente em relação à energia e às emissões de CO_2. Guinée *et al.* (2011) acreditam que um dos principais problemas surgidos é comparar produtos ou processos distintos, do ponto de vista de suas consequências ambientais. Conforme o IPCC (2007), estima-se que cortes anuais de 5 a 7 bilhões de toneladas de CO_2 são necessários para estabilização climática, sendo que até 1 bilhão de toneladas de CO_2/ano podem ser

reduzidas pela substituição de 50% do cimento Portland por alternativas de baixo carbono. Já segundo Benhalal *et al.* (2013) a previsão é que a produção de cimento dobre nas próximas quatro décadas, o que faria com que a fabricação de cimento fosse responsável por até 20% do total de emissões de CO_2 no mundo. Acredita-se também que os cimentos à base de clínquer de cimento Portland continuarão a dominar no futuro devido à economia de escala, nível de otimização do processo, disponibilidade de matérias-primas e confiança do mercado nesses produtos.

O cenário atual da indústria cimenteira brasileira busca alternativas que reduzam os custos econômicos e aperfeiçoamento do produto na cadeia de produção. A indústria mostra-se cada vez mais interessada em práticas não só viáveis, como também lucrativas do ponto de vista de consumo de matérias-primas e recursos energéticos, fato que se torna ainda mais evidente dado a queda na produção observada nos últimos anos. Por outro lado, o que se tem observado na realidade brasileira e internacional é o foco da Avaliação do Ciclo de Vida em questões relacionadas ao consumo de energia e emissões de CO_2. Sendo que, utilizar a ACV no processo produtivo do cimento LC^3 constitui-se uma forma de contribuir para a aplicação da prática em estudos de impactos ambientais relacionados a outros materiais de construção civil, bem como fornecer estudos preliminares do processo produtivo do novo cimento.

1.2. Objetivos da pesquisa

Este trabalho teve por objetivo geral realizar um estudo comparativo de emissão de gases de efeito estufa (GEE), em termos de emissão de CO_2, no ciclo de vida do cimento LC^3 e do cimento Portland composto partindo do pressuposto de que o processo de fabricação representa a fase de maior impacto ambiental.

Foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

a) Aplicar a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), com uso do *software GaBi*, ao processo de fabricação do cimento LC^3 e do cimento Portland composto identificando os processos mais relevantes para a ACV.

b) Quantificar o impacto ambiental da fase de processamento industrial do cimento LC^3 e do cimento Portland composto através da emissão de CO_2.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para embasamento teórico desta pesquisa, são apresentados os principais aspectos e desafios relacionados à indústria do cimento, como os parâmetros ambientalmente mais impactantes no processo produtivo, extração de matérias-primas e processamento industrial, bem como soluções e técnicas sustentáveis que vêm sendo utilizadas no panorama mundial.

Os impactos ambientais têm enfoque nas emissões de CO_2, frequentemente utilizado para quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse sentido, é apresentada a definição do cimento LC^3, os parâmetros mais utilizados para avaliação de sua aplicabilidade em estudos experimentais e produção comercial, além de estudos de viabilidade econômico-ambiental que avaliaram a sustentabilidade do cimento e a redução significativa das emissões de CO_2. Além disso, é apresentada também as abordagens de que trata a Avaliação do Ciclo de Vida, suas etapas, modelagem e simplicações.

Sendo assim, neste capítulo os conceitos sobre os impactos ambientais da indústria do cimento, o cimento LC^3 e a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) serão abordados, além do estado da arte envolvendo a ACV na indústria do cimento, no contexto nacional e internacional.

2.1. INDÚSTRIA DO CIMENTO PORTLAND

Segundo Martirena e Scrivener (2015), devido ao crescente aumento na produção de cimento e concreto para o setor de construção, este se torna responsável por um percentual entre 6 e 8% das emissões de CO_2 do mundo. Segundo os autores, em 2010 as emissões de CO_2 apenas do processo de produção de clínquer, excluindo o uso de combustíveis fósseis, representaram quase 4% das emissões totais de CO_2 em todo o mundo. Comparativamente, o CO_2 proveniente da produção de cimento aumentou mais de 150% de acordo com os levantamentos realizados entre 1990 e 2010 pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2016).

No período entre 2000 e 2011, a produção mundial de cimento dobrou para 3,6 bilhões de toneladas (VIZCAÍNO *et al.*, 2015). Numa estimativa conservadora, para cada 1 kg de cimento Portland comum produzido tem-se um subproduto de 0,9 kg de CO_2, o que equivale a 3,24 bilhões de toneladas de CO_2 por ano. Sendo que estes números não incluem o CO_2 e outros

gases de efeito estufa emitidos durante a extração e transporte de matérias-primas ou o carregamento, descarregamento e transporte do cimento produzido (HENDRIKS *et al.*, 2004). A produção de clínquer, o principal componente do cimento, emite grande quantidade de CO_2 decorrente da calcinação do calcário, além de um alto gasto energético. Os principais usos de energia estão relacionados ao combustível para a produção de clínquer e eletricidade para moagem de matérias-primas e o cimento acabado. As diferenças nos fatores de emissão se dão aos teores de clínquer do cimento produzido, eficiência energética, intensidade de carbono do combustível do clínquer e intensidade de carbono da geração de energia (IPCC, 2007).

Na Figura 1 é expresso o consumo mundial do cimento em termos percentuais, que está intimamente ligado à atividade de construção e à atividade econômica, destacando a Ásia como líder no mercado. Segundo dados divulgados pelo SNIC (2013) em seu Relatório Anual de 2012, o continente Asiático contribuía com 77% no consumo mundial de cimento, seguido pela Europa, com 11%. A China, no topo dessa cadeia produtiva, produziu 2,14 bilhões de toneladas de cimento. Na Índia, o setor da construção civil colabora com 22% das emissões de CO_2 e é um dos que mais cresce no país; o país se tornou um dos maiores produtores de cimento do mundo, com a fabricação de 300 milhões de toneladas em 2010 e projeções de produção de 600 milhões de toneladas em 2020 (MAITY, *et al.*, 2015).

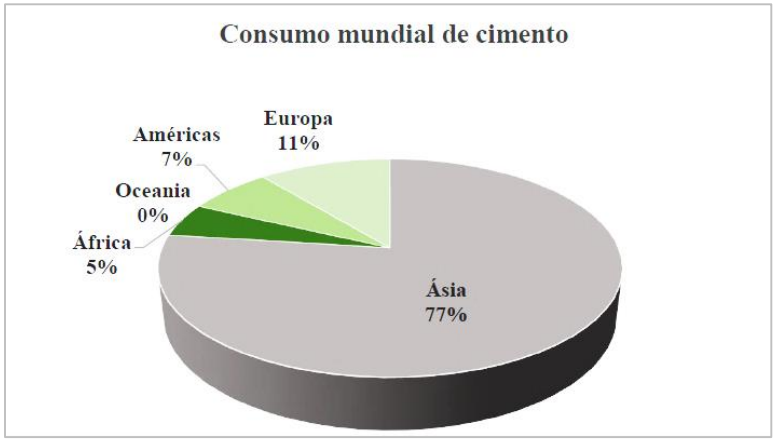


Figura 1 - Participação dos continentes no consumo mundial de cimento (adaptado de SNIC, 2013).

2.1.1. Sustentabilidade na indústria do cimento

A Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento e o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável recomendam como a indústria pode fazer mudanças em uma

escala global promovendo as melhores tecnologias de eficiência disponíveis para instalações de produção novas e existentes, aumentando a consciência de combustíveis alternativos e incentivando a substituição de clínquer (WBCSD, 2009).

A necessidade de se desenvolver pesquisas relacionadas à sustentabilidade ambiental torna-se cada vez mais notória, principalmente em relação à energia e às emissões de CO_2 na indústria (PEREIRA, 2014; CALDAS, 2016). O desenvolvimento sustentável não será mais uma escolha, especialmente para nações de desenvolvimento rápido que possuem taxas crescentes de urbanização (EMMAUEL *et al*., 2015).

Na Figura 2, estão projetadas as emissões de CO_2 da indústria de cimento se não forem feitas alterações nos métodos de produção atuais. Em 2050, as emissões terão aumentado quase 5 vezes do valor observado em 1990, sobretudo nos países em desenvolvimento, como a Índia e a China, que possuem uma alta demanda por infraestrutura e habitação (WBCSD, 2009).

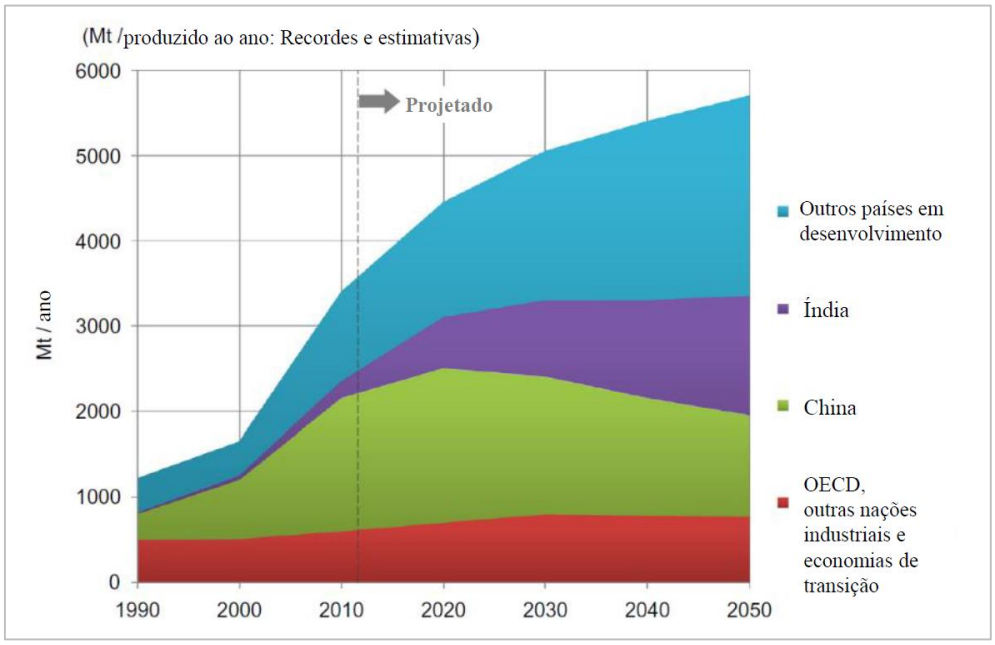


Figura 2 - Produção mundial de cimento Portland 1990-2050
(adaptado de IMBABI *et al.*, 2012).

A indústria brasileira de cimento possui grande eficiência energética e é referência mundial na produção de cimento com baixa emissão de carbono. O setor produz os cimentos tipo Portland, que são subdivididos em cinco classes caracterizadas de acordo com as adições minerais empregadas, sendo as principais delas as escórias granuladas de alto forno, pozolanas e fíler cálcario. No Brasil, há 93 plantas industriais distribuídas nas cinco regiões geográficas que,

com seu mercado regionalizado, favorece que as indústrias se localizem próximas ao mercado consumidor, uma vez que é um produto perecível e, em função dos custos, seu valor e peso impedem o seu transporte a longas distâncias. Em 2013, a Região Sudeste liderava a produção de cimento com 48% da produção total brasileira, seguida pela Região Nordeste com 20% (SNIC, 2010).

Atualmente, a indústria cimenteira nacional ocupa uma posição de referência no combate aos gases de efeito estufa (GEE), graças a uma série de características do processo produtivo nacional, além de diversas ações adotadas pelo setor, algumas alavancadas a partir da transformação industrial durante a crise do petróleo do final da década de 70, outras mais recentes. A ABCP (2014) define três características que se constituem pilares para tornar a indústria do cimento mais sustentável:

a) Eficiência energética;
b) Combustíveis alternativos;
c) Adições ao clínquer.

2.1.2. Principais Impactos Ambientais

A indústria do cimento possui potencial de degradação ambiental, tanto pelo processo de extração do calcário e argila quanto pela emissão de gases poluentes durante o processo produtivo do cimento. Dessa forma, se torna responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de GEE e 5% das emissões de CO_2, o mais abundante dos gases de efeito estuda, além de consumir uma parcela relativamente considerável da energia global (CSI, 2002; BENHALAL *et al.*, 2013).

Emmanuel *et al.* (2015) observaram que o superdimensionamento no uso de materiais é uma das principais causas do consumo desnecessário de recursos naturais, além da qualidade e a classe do cimento. Segundo o autor, um olhar para os recursos disponíveis enfatiza a necessidade de diversificar os produtos de acordo com a localização e as aplicações.

Sob a ótica Benhalal *et al.* (2013), dentre as opções para amenizar os impactos ambientais da produção de cimento estão: a alteração das plantas fabris, de modo que haja captura do carbono emitido, a utilização do processo via seca, exigindo menor alimentação do forno e reduzindo

até 50% da energia necessária e quase 20% das emissões de CO_2 no processo. Além disso, o reaproveitamento de resíduos industriais para alimentação do forno e a alteração da formulação do cimento, de modo a liberar menor quantidade de CO_2, podem também atenuar as emissões em cimenteiras.

Karstensen (2006) relaciona os principais impactos ambientais da produção de cimento às categorias de emissões de material particulado de chaminés e poeiras fugitivas, emissões atmosféricas dos gases CO_2, NO_x, SO_2, CO, COVs e consumo de recursos naturais como energia e matérias-primas.

Grandes esforços para aumentar a eficiência energética começaram após a crise energética dos anos 70. Na indústria de cimento brasileira, por exemplo, houve a mudança de óleo combustível nesse período, para carvão vegetal em 1984 e, atualmente, a indústria depende quase que inteiramente de coque de petróleo. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas de Energia (MME), divulgou em seu relatório anual de 2015, a contribuição percentual de combustível no consumo energético da produção de cimento no Brasil. Na Figura 3 estão sintetizados os dados divulgados.

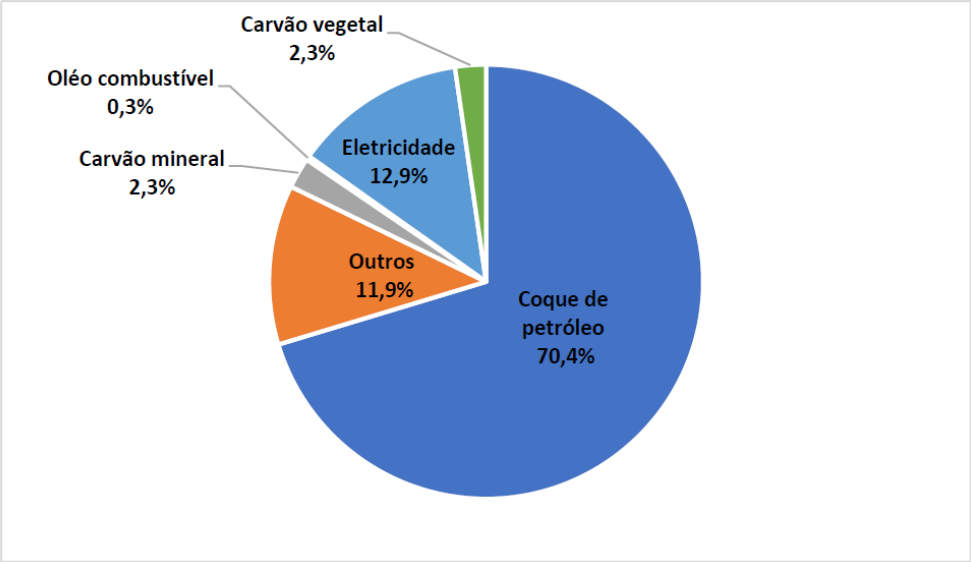


Figura 3 - Consumo de energia na produção de cimento
(adaptado de BRASIL, 2015, p. 88).

Ainda segundo o Ministério de Minas e Energia, o processo de produção do cimento no Brasil gera em torno de 879 kg CO2/t de cimento. Considerando a produção nacional, chega-se a uma geração de CO_2 igual a 37 Mt/ano, equivalente a 11% das emissões brasileiras. De acordo com

o Balanço Energético Nacional, elaborado pelo MME, o setor atinge níveis de consumo térmico da ordem de 653 kcal/kg cimento e elétrico de 104 kWh/t cimento, confirmando a posição da indústria nacional do cimento como uma das mais eficientes em consumo específico de energia, abaixo dos padrões médios mundiais.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2012), os gases de efeito estufa, para o protocolo de Kyoto, são: dióxido de carbono (CO_2), gás metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hexafluoreto de enxofre (SF_6), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs). Entretanto, tendo em vista o caráter desta pesquisa, será escolhido o CO_2 para se chegar a uma única unidade de Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential - GWP*). Dessa forma, todos os gases de efeito estufa serão convertidos no equivalente de dióxido de carbono ($CO_{2\text{-eq}}$). Os dados de conversão são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Conversão dos GEE em $CO_{2\text{-eq}}$
(adaptado de BRASIL, 2015).

Gás	Símbolo	GWP
Dióxido de carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	21
Óxido nitroso	N_2O	310
Hidrofluorocarbonos	HFC-23	11.700
	HFC-125	2.800
	HFC-134a	1.300
	HFC-143a	3.800
	HFC-152a	140
Perfluorcarbonos	CF_4	6.500
	C_2F_6	9.200
Hexafluoreto de enxofre	SF_6	23.900

2.1.3. Processo Produtivo

O cimento Portland constitui-se como o produto obtido pela pulverização de clínquer, que por sua vez é constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades (BAUER, 1994). Segundo o autor, o cimento tem como constituintes fundamentais a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico

(SO_3). Apresenta também em sua composição, em menores teores, impurezas, óxido de sódio, óxido de potássio e óxido de titânio. Resumidamente, a cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem 95 a 96% do total na análise de óxidos.

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 (Calcinação);
g) Resfriamento;
h) Moagem do cimento;
i) Estocagem e expedição.

A matéria-prima é submetida ao processo de britagem, com o propósito de reduzir a granulometria do material. Os materiais britados, como o calcário, são encaminhados a depósitos apropriados, de onde são processados segundo as linhas de operação via seca ou via úmida (BAUER, 1994). Sendo assim, a fabricação do clínquer pode ser dividida dependendo da umidade das matérias-primas, sendo que os fornos via seca garantem maior eficiência energética, economia de combustíveis e menor emissão de poluentes (SNIC, 2012).

No processo por via seca, a matéria-prima é convenientemente secada em uma estufa, seguida pela condução aos moinhos e silos, onde os materiais argilosos e calcários têm sua granulometria reduzida em mistura homogênea. São utilizados para o processo de moagem, moinhos usualmente de bolas associados em série e conjugados a separadores de peneira, ou ciclones. A mistura seca é então conduzida por via pneumática para os silos de homogeneização, nos quais a composição básica da mistura é quimicamente controlada e realizadas eventuais correções (BAUER, 1994).

A mistura devidamente homogeneizada é armazenada em silos, até ser conduzida ao forno para a queima, onde são fundidas em um forno a temperatura de aproximadamente 1450ºC, com alta

liberação de CO_2. O resfriamento desta fusão resulta no clínquer, que moído recebe a adição de outros materiais que determina os diversos tipos de cimentos disponíveis no mercado (ABCP, 2012). Bauer (1994) afirma que a operação de queima da mistura crua eleva a temperatura a níveis necessários à transformação química que conduz a produção do clínquer, sendo o resfriamento a fase mais importante da fabricação do cimento. Ainda segundo o autor, o clínquer resfriado é conduzido a depósitos apropriados, seguido pelo o processo de moagem, realizada em moinhos de bola conjugados com separadores de ar. Por fim, o clínquer pulverizado é conduzido pneumaticamente para os separadores de ar, um ciclone que conduz ao moinho os grãos de maior tamanho e dirige os de menor tamanho, o cimento propriamente dito, para os silos de estocagem.

Na Figura 4 são ilustradas resumidamente as etapas de processamento necessárias a produção do cimento Portland:

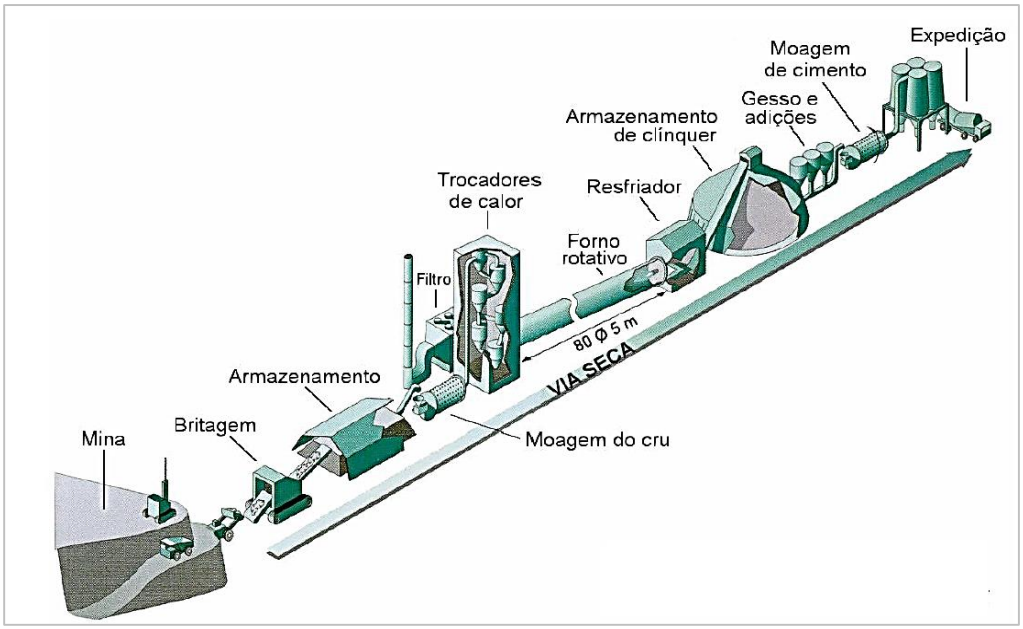


Figura 4 - Processo de produção do cimento
(Fonte: IEA; WBCSD, 2009).

Karstensen (2006) afirma que a fabricação de cimento é um processo de grande escala, exigindo quantidades consideráveis de recursos naturais, matérias-primas, combustíveis térmicos e energia elétrica. Os grandes consumidores de energia elétrica na fabricação de cimento são os moinhos (moinhos de cimento, de matérias-primas, de carvão) e os grandes ventiladores (predominantemente do sistema do forno e dos moinhos de cimento). O consumo específico de energia elétrica varia normalmente entre 90 e 130 kWh por tonelada de cimento.

Dutta e Maity (2015) também destacam que a indústria do cimento possui um consumo significativo de energia, variando entre 25 e 35% dos custos diretos totais, consequentemente, está continuamente investigando e adotando tecnologias mais eficientes em termos energéticos para melhorar sua lucratividade e competitividade.

De acordo com a base de dados do CSI, 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. Carvalho (2002) contabilizou de 100 a 115 Kwh/t cimento, sendo que quase a totalidade dessa energia na alimentação e exaustão do forno rotativo e na moagem da farinha de cru e do clínquer. Quanto aos gastos com energia térmica, eles também variam de acordo com alguns fatores, tendo uma grande influência o tipo de processo da fábrica. No Brasil, as cimenteiras utilizam o "processo por via seca", ou seja, com sistemas de pré-aquecimento e pré-calcinação. O consumo específico de energia térmica nacional está em torno de 3300 MJ/t de clínquer (PAULA, 2009).

Os dados do SNIC (2010) apontam que o parque industrial brasileiro tem praticamente toda a sua capacidade instalada utilizando a rota seca como via de produção, garantindo significativa diminuição do uso de combustíveis em relação a outros processos menos eficientes. Além disso, os pré-aquecedores e pré-calcinadores reaproveitam os gases quentes para pré-aquecer a matéria-prima previamente à entrada do forno, diminuindo ainda mais o consumo de combustíveis. Os fornos via seca com pré-aquecedores e pré-calcinadores, no Brasil, são responsáveis por cerca de 99% da produção de cimento. Comparativamente, segundo último levantamento da CSI, em escala mundial os fornos via seca com pré-aquecedor (e com ou sem pré-calcinador) representam 87% (ABCP, 2014).

Um típico forno de cimento rotativo moderno com um consumo de calor específico de 3,1 GJ/tonelada de clínquer e queima de combustíveis baseados em carbono tradicional, como carvão, óleo ou coque de petróleo, emite aproximadamente 0,31kg de combustível derivado de CO_2/kg de clínquer. Em comparação com o CO_2 derivado das matérias-primas é relativamente elevado: 0,53kg/kg de clínquer. Isto é mais constante do que as emissões derivadas do combustível, porque o conteúdo de calcário está dentro de um intervalo estreito de 1,2 a 1,3kg/kg de clínquer independentemente do tipo de processo envolvido (DAMTOFT *et al.*, 2008).

Dessa forma, a quantidade de emissão de CO_2 depende do tipo de combustível e do método de processamento específico utilizado, sendo que os fornos são comumente disparados usando carvão, óleo combustível, gás natural, coque de petróleo, biomassa, combustíveis alternativos derivados de resíduos ou misturas desses combustíveis (HENDRIKS *et al.*, 2004).

Para as emissões de CO_2, buscou-se dados bibliográficos recentes onde estivesse discriminado as emissões decorrentes de cada etapa. Loques (2013) contabilizou as emissões de CO_2 em 0,86 kg CO_2/kg de clínquer (0,555 kg CO_2/kg provenientes da calcinação, 0,282 kg CO_2/kg da combustão de combustíveis fósseis tradicionais e 0,023 kg CO_2/kg da queima de resíduos para alimentação do forno), considerando-se uma média de 10% de combustível de coprocessamento para o forno. Estima-se que para cada tonelada de cimento em nível mundial, é emitido em média 850 kg de CO_2. Já a indústria brasileira apresenta um dos menores níveis de CO_2, com emissões em torno de 600 kg por tonelada de cimento (CSI, 2012).

Além das matérias-primas básicas – calcário e argila –, a indústria de cimento nacional tem feito uso de subprodutos de outras atividades e matérias-primas alternativas há mais de 50 anos. A produção de cimentos com adições ao clínquer, com materiais como escórias de alto forno, cinzas volantes, pozolanas artificiais e fíler calcário, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, propicia a redução das emissões de CO_2, que dependerão do cimento produzido e do percentual de adição, uma vez que diminui a produção de clínquer e, consequentemente, a queima de combustíveis e a emissão decorrente da descarbonatação (ABCP, 2014). Também possibilita a preservação de jazidas minerais e redução no consumo de combustível fóssil pelo menor consumo de clínquer. A crescente substituição de clínquer por adições na fabricação de cimento pode ser verificada na Figura 5. Entre 1990 e 2010, enquanto o uso de adições cresceu 252%, a utilização de clínquer aumentou 94%. No mesmo período, a produção de cimento teve incremento de 129% (SNIC, 2010).

As adições minerais comumente utilizadas apresentam vantagens técnicas, ao melhorar propriedades específicas do cimento, vantagens econômicas, reduzindo os custos e gasto energético, além de vantagens ecológicas e estratégicas de aproveitamento de resíduos e preservação de jazidas.

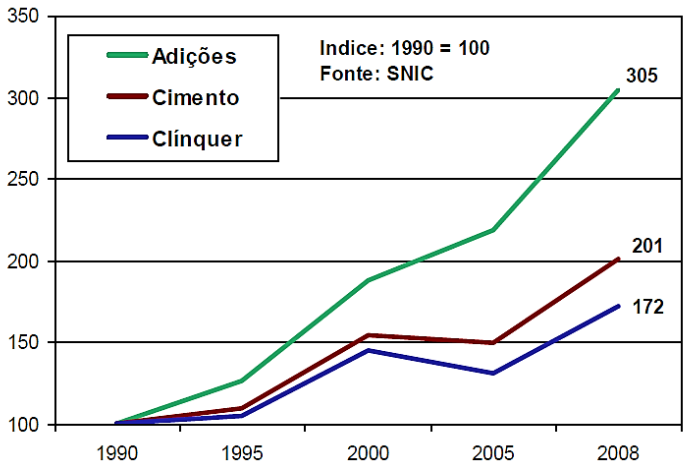


Figura 5 - Evolução do uso de adições minerais no Brasil (SNIC, 2010).

Na Tabela 2 são apresentados os percentuais de adições minerais normalizados nos tipos de cimentos Portland da indústria nacional brasileira.

Tabela 2 - Teores de adições normalizadas nos diferentes tipos de cimentos Portland no Brasil.

Cimento	Clínquer + Gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário	Fonte
CPI	100		–		NBR 5732
CPI-S	95 – 99		1 – 5		
CPII-E	56 – 94	6 – 34	–	0 – 10	
CPII-Z	76 – 94	–	6 – 14	0 – 10	NBR 11578
CPII-F	90 – 94	–	–	6 – 10	
CPIII	25 – 65	35 – 70	–	0 – 5	NBR 5735
CPIV	45 – 84	–	15 – 50	0 – 5	NBR 5736
CPV-ARI	95 – 100	–	–	0 – 5	NBR 5733

2.1.4. Extração de Matérias-Primas e Transporte

As fábricas de cimento situam-se normalmente perto das minas, particularmente, minas de calcário para minimizar os custos de transporte, já que grandes distâncias podem inviabilizar a seleção de alguns materiais do ponto de vista da sustentabilidade energético-ambiental (PEREIRA, 2014). Segundo Bauer (1994), o cimento é um produto de preço relativamente baixo, que não comporta fretes a grandes distâncias. Isso resulta na concentração de fábricas de cimento em algumas áreas que são mineralmente ricas, já a que a indústria se torna altamente dependente do transporte (EMMAUEL *et al.*, 2015).

Bauer (2014) afirma que a extração da matéria-prima se faz pela técnica de exploração de pedreiras, por escavação e por dragagens, a depender da exploração de calcário ou argila, principais matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento Portland. É necessário ressaltar

que apenas a operação de máquinas é responsável por emissões de CO_2 quanto à extração de matérias-primas (WBCSD, 2009). No Brasil, com relação aos transportes, as principais fontes de energia utilizadas são os combustíveis a base de óleo diesel e gasolina (PEREIRA, 2014). Em 2013, segundo dados divulgados pelo Relatório Anual do SNIC (2013), 96% do despacho de cimento era realizado por meio rodoviário.

A extração de calcário, pode ter impactos locais significativos no uso do solo, alterações do relevo, possíveis erosões, danos à flora, fauna e recursos hídricos, produção de resíduos, danos às comunidades adjacentes às minas, além da emissão de poeiras, ruído e movimentos de tráfego, dentre outras consequências inevitáveis do processo de extração (CSI, 2012).

2.1.5. Calcinação

As principais fontes de emissões no processo de fabricação do cimento Portland comum estão ligadas ao processo de calcinação e ao combustível de combustão utilizado para aquecer as matérias-primas a temperaturas de sinterização, entre 1400ºC e 1600ºC (IMBABI *et al.*, 2012). À medida que o forno rotaciona, o material desliza e desce para zonas progressivamente mais quentes para a chama. O calor intenso provoca reações químicas que fundem parcialmente a mistura em clínquer. A mistura pré-calcinada entra no forno a temperaturas de cerca de 1000°C. Combustíveis tais como carvão, coque de petróleo, gás, petróleo e combustíveis alternativos são acionados diretamente no forno rotativo até 2000°C para garantir que as matérias-primas atinjam temperaturas de até 1.450°C (CEMBUREAU, 2005). De forma simplificada, o processo de clinquerização, onde o carbonato de cálcio e óxidos de sílica são combinados pode ser expresso pelas equações:

$$CaCO_3 \xrightarrow[\sim 900\ a\ 1000°C]{} CaO + CO_{2(g)} \quad (1)$$

$$MgCO_3 \xrightarrow[\sim 400°C]{} MgO + CO_{2(g)} \quad (2)$$

$$3CaCO_3 + SiO_2 \xrightarrow[forno\ 1450°C]{} Ca_3SiO_5 + 3CO_{2(g)} \quad (3)$$

Onde,

$CaCO_3$: carbonato de cálcio;
CaO: óxido de cálcio (cal virgem);
Ca_3SiO_5: clínquer (silicato de cálcio);

CO_2: dióxido de carbono;
$MgCO_3$: carbonato de magnésio;
MgO: óxido de magnésio;
SiO_2: sílica.

A análise química dos cimentos Portland resulta na determinação das proporções dos óxidos, que pode ser feita relacionando as propriedades do cimento às proporções dos silicatos e aluminatos. Sendo assim, a importância do conhecimento das proporções dos compostos constituintes do cimento reside na correlação existente entre estes e as propriedades finais do cimento e também do concreto (BAUER, 1994). Os compostos principais são formados à temperatura de 1450ºC a partir dos silicatos de cálcio indicados na Equação 3. A descarbonatação dos compostos $CaCO_3$ e $MgCO_3$ somam a maior parte das emissões de CO_2 no processo de calcinação, identificadas nas Equações 1 e 2.

2.1.6. Materiais cimentícios suplementares (MCS)

Vários autores e organizações mundiais consideram que uma opção para tornar o cimento mais sustentável é a mistura do clínquer de cimento Portland com materiais cimentícios suplementares, contudo, o fornecimento dos MCS mais comuns, escórias e cinzas volantes, é consideravelmente limitado se comparado a produção mundial de cimento. Neste contexto, Scrivener e Favier (2015) afirmam que as argilas calcinadas são a fonte mais promissora de MCS que podem contribuir substancialmente para reduzir o impacto ambiental do cimento.

Os MCSs são conhecidos por conferir alta resistência mecânica, durabilidade, alta resistência ao ataque de sulfato e redução do consumo energético (PARASHAR *et al.*, 2015). Os materiais cimentícios suplementares estão sendo amplamente utilizados para a substituição parcial do clínquer em combinação com outras adições minerais em novas misturas ternárias e quaternárias com fatores de clínquer muito baixos (KRISHNAN *et al*., 2015). Na Figura 6 estão resumidas as características dos principais MCSs utilizados como substitutos ao clínquer.

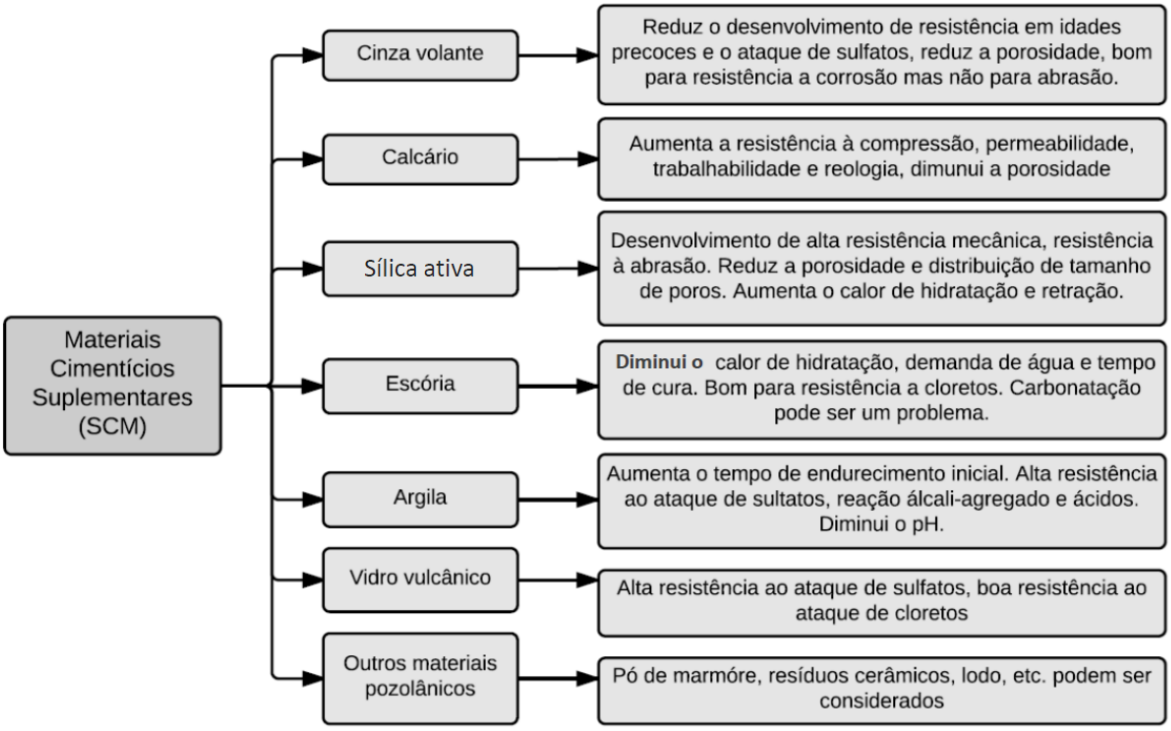


Figura 6 - Propriedades básicas de alguns MCS's
(adaptado de PARASHAR *et al*., 2015)

A fim de reduzir o consumo de energia, as emissões de CO_2 e aumentar a produção, reduzindo simultaneamente o custo, os materiais cimentícios suplementares (MCS) têm sido cada vez mais utilizados como substitutos de clínquer para a produção de cimento e como substitutos de cimento para a produção de concreto (STONGBO *et al.*, 2015).

Considerando a situação de indisponibilidade local e esgotamento de MCS de alta qualidade, Stongbo *et al.* (2015) cita que o metacaolim tem sido intensamente estudado nos últimos anos devido a suas altas propriedades pozolânicas e que, ao contrário de outras pozolanas, é um produto primário, formado pela desidroxilação de caulinita por aquecimento na faixa de temperatura de 700 - 800°C.

Nesse sentido, as argilas calcinadas tornam-se a melhor opção tanto para países industrializados quanto para países em desenvolvimento, visto sua distribuição mundial uniforme. Como referido por Martirena e Scrivener (2015) e SHAH *et al.* (2015), os depósitos de argila, embora não renováveis, podem ser explorados dentro de certos limites, sem causar danos graves ao ambiente, e sua disponibilidade excede a de qualquer outro MCS conhecido. A ativação da caulinita mineral a temperaturas entre 600ºC e 700°C, é a principal aplicação comercial para

argilas calcinadas, no entanto, ainda é um material caro, devido a energia intensiva em sua produção e a exigência de argila com alto grau de pureza.

Entretanto, estudos recentes mostram que a argila de baixo grau de caulinita tornou-se uma alternativa adequada já que possui maiores reservas e melhor distribuição geográfica, se comparada às argilas de caulinita puras atualmente utilizadas pela indústria (MARTIRENA, 2011). Como a argila de baixa qualidade está concentrada nas camadas superiores de minas de argila, o uso de recursos e combustível durante a escavação pode ser reduzido (EMMAUEL *et al.*, 2015). Ainda segundo o autor, a redução na exigência de qualidade de matérias-primas, como argila e calcário, pode levar à exploração de novas minas, o que, em última análise, leva à descentralização de unidades de cimento e à redução do custo total de transporte.

Tironi *et al.* (2015) estudaram as argilas cauliníticas pobres (44%), calcinadas a 750ºC em combinação com fíler calcário e demonstraram que as fases hidratadas correspondem à reação pozolânica (contribuição da argila calcinada) e à estabilização de fases (contribuição do fíler), modificando a estrutura porosa e desenvolvendo propriedades mecânicas com larga redução de consumo de energia e emissões de CO_2.

Antes que as cinzas volantes fossem usadas, as argilas calcinadas já eram utilizadas na Índia, desde os anos 70. No Brasil, as argilas calcinadas têm sido utilizadas na fabricação de cimento Portland há muitos anos, no entanto, a sua cor impõe limitação comercial quando os cimentos mostram tons avermelhados ou rosados, avaliados como cimento de baixa qualidade. A calcinação da argila pode modificar suas propriedades e favorecer sua aplicação como material pozolânico, dependendo da composição química e mineralógica. Existem argilas de caulinita e ilita que produzem metacaolim quando calcinadas entre 600°C e 1000°C. (CHOTOLI *et al.*, 2015).

Vários trabalhos apontam a viabilidade da utilização da substituição de parcelas representativas de clínquer (até 50%) por argila calcinada em composição com fíler calcário no mercado indiano e potencialmente no mercado mundial. Porém, os autores ressalvam, em geral, a necessidade de mais pesquisas para que o comportamento do novo produto seja inteiramente compreendido (JOSEPH *et al.*, 2015).

2.1.7. Substituição do clínquer

Muitas técnicas têm sido propostas para melhorar a questão ambiental na indústria de cimento, como: recuperação de calor residual, combustíveis e matérias-primas alternativas, melhoria da eficiência térmica e elétrica e substituição de clínquer; e dentre todas as soluções propostas, a substituição de clínquer provou ser a mais eficaz para reduzir as emissões de CO_2 (Krishnah *et al*, Berriel *et al.*, 2015).

As emissões de CO_2 resultantes da clinquerização podem ser substancialmente reduzidas ao aumentar o índice de substituição de clínquer. Martirena e Scrivener (2015) afirmam que os cimentos convencionais com substituição de clínquer de até 30% permitem a redução de aproximadamente 15-20% das emissões de CO_2. Na formulação apresentada por Vizcaíno *et al.* (2015), com índice de substituição de 50%, obteve-se a maior redução de emissões: cerca de 30% das emissões associadas à fabricação do cimento.

A maioria dos estudos propõe índices de substituição do clínquer por argila calcinada e fíler calcário entre 30 e 60%. A norma europeia EN 197-1 preconiza um percentual de substituição de até 35%. No Brasil, a norma ABNT NBR 11578:1991 define três tipos de cimento composto, com variação da proporção clínquer + gesso entre 56% e 94% a depender da adição mineral empregada, isto é, percentual de substituição de até 44%, conforme listado na tabela abaixo.

Tabela 3 – Teores máximos de substituição para os cimentos Portland no Brasil.

Cimento	Clínquer + Gesso (%)	Máximo teor de substituição (%)	Fonte
CPI	100	0	NBR 5732
CPI-S	95 – 99	5	
CPII-E	56 – 94	44	NBR 11578
CPII-Z	76 – 94	24	
CPII-F	90 – 94	10	
CPIII	25 – 65	75	NBR 5735
CPIV	45 – 84	55	NBR 5736
CPV-ARI	95 – 100	5	NBR 5733

As diferentes composições do clínquer revelam níveis de emissões distintos, de acordo com os teores de carbono na sua composição. O fator de emissão implícito reportado no Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa

(MCTI, 2015) foi de 0,544 em 2010 tendo a participação de clínquer na mistura do cimento sido reduzida de 68% para 66% entre 2005 e 2010. Os fatores atuais que impedem o pleno potencial de substituição de clínquer de ser alcançado incluem normas de cimento existentes e códigos de construção, má compreensão do processo pelo público e clientes, fatores regionais e locais de materiais de substituição que não refletem a disponibilidade e, nova legislação a nível nacional e internacional (CEMBUREAU, 2007).

2.2. CIMENTO LC^3

2.2.1. Definições

O cimento LC^3 (*Limestone Calcined Clay Cement*) é um tipo de cimento recentemente desenvolvido, baseado na mistura de calcário e argila calcinada, que possui composição mineral de 40 a 50% de clínquer, 30 a 40% de argila calcinada, 15 a 20% de fíler calcário e de 4 a 7% de gesso. Esta mistura sinérgica mostra melhor desempenho em termos de resistência em comparação com outras misturas de cimento usadas convencionalmente, demonstrando ser mais eficiente que qualquer outra mistura pozolânica binária. A substituição de cimento pela mistura de argila caulinítica e calcário está associada ao aumento da reatividade das fases de aluminatos, devido ao teor de aluminatos do metacaolim (MARTIRENA SCRIVENER, 2015).

Joseph *et al.* (2015) estudaram a viabilidade econômica do LC^3 na Índia, segundo maior consumidor e produtor de cimento, o que significa muito para outros países como o Brasil, que possui grandes reservas de argila cauliníticas. O cimento LC^3 constitui-se um produto viável com grande potencial para colaborar na redução da utilização do clínquer na fabricação de cimentos, sendo que os parâmetros mais importantes para sua fabricação são o teor de substituição, a proporção entre os materiais, e a qualidade da argila utilizada, relacionada ao teor de caulinita.

2.2.2. Teor de substituição de clínquer

Os baixos teores de clínquer podem ser alcançados usando cimentos em que o clínquer seja substituído por uma combinação de MCS. Na Figura 7 é ilustrada a sinergia do cimento LC^3, associação entre clínquer, argila calcinada (metacaolim) e fíler calcário.

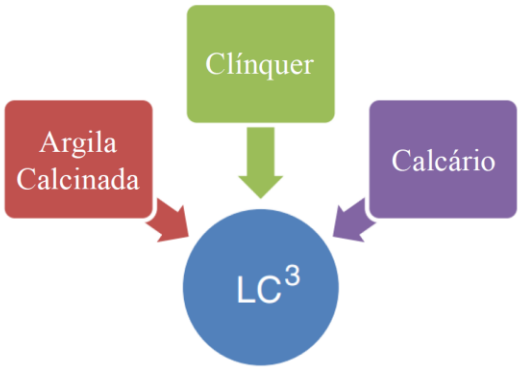


Figura 7 - Sinergia do cimento LC^3
(adaptado de Krishnan *et al.*, 2015).

O possível fator clínquer de LC^3 ainda não é fixo. Pesquisas ainda estão acontecendo neste sentido, principalmente no que se refere à disponibilidade de matérias-primas, ao grau exigido de cimento e às recomendações de comitês-padrão. Contudo, sabe-se que a proporção ótima depende da quantidade de caulinita presente na argila.

Vários autores ao redor do mundo expuseram seus estudos sobre a influência de parâmetros de fabricação do cimento com teores de substituição de até 60% de clínquer por argila calcinada e fíler calcário. Os resultados mostram que o fíler calcário acelera a hidratação e, juntamente com a argila calcinada, contribui para o ganho de resistência em longas idades, devido a reação pozolânica, melhorando a reologia da mistura fresca sem comprometer a resistência (PEREZ *et al.*, 2015). Outros estudos baseados em resistência mecânica, carbonatação, durabilidade e modelagem termodinâmica, mostram-se satisfatórios. Na Tabela 4 estão resumidos os resultados para os teores de substituição adotado em cada estudo.

Tabela 4 - Índices de substituição do clínquer por argila calcinada e fíler calcário na literatura.

Índice de substituição	
Martirena e Scrivener (2015)	60%
Berriel *et al.* (2015); Joseph *et al.* (2015); Perez *et al.* (2015); Vizcaíno *et al.* (2015); Emmauel *et al.* (2015)	50%
Antoni (2012)	45%
Dai *et al.* (2015)	35%
Maity *et al.* (2015)	30%

2.2.3. Proporção entre os elementos

Como a reação pozolânica depende da quantidade de portlandita produzida pela reação de hidratação do cimento, é crítico estimar a quantidade de portlandita produzida no sistema para o projeto de composição ideal para LC^3. As fases de clínquer podem ser calculadas com a ajuda de equações de Bogue modificadas, utilizando a composição de óxido obtida a partir da análise química do clínquer. Os clínqueres com maior teor de alumínio serão mais adequados para a produção de cimentos de baixo fator de clínquer, devido à maior quantidade de hidróxido de cálcio produzido (KRISHNAN *et al.*, 2015).

A Figura 8 ilustra a estrutura para se obter níveis ótimos entre as proporções dos elementos que compõem o cimento LC^3.

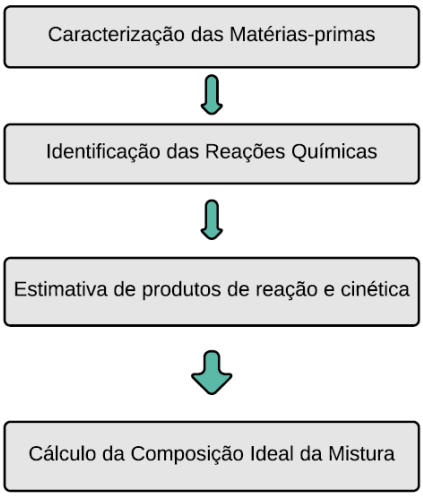


Figura 8 - Estrutura básica para otimização do LC^3
(adaptado de KRISHNAN *et al.*, 2015).

O fíler calcário introduzido no sistema é disponível em largas quantidades, além de não ser calcinado, não emitindo CO_2 extra ao ambiente. Os cimentos LC^3 contém, tipicamente, 15% de fíler, são mais baratos ou, no mínimo, tem o mesmo custo dos cimentos tradicionais. (SCRIVENER, 2014). Poucas pesquisas têm enfoque na influência do teor de gesso no comportamento do cimento LC^3, embora Antoni (2012) afirme que o sistema é sensível a esse parâmetro. O teor ótimo de gesso nos cimentos LC^3 permanece como uma lacuna que demanda maiores pesquisas. Na Figura 9 é apresentada a composição ótima mais observada nos estudos envolvendo o cimento LC^3.

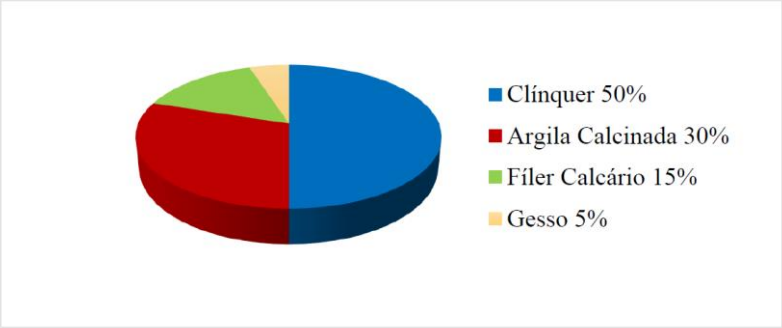


Figura 9 - Composição do cimento LC³ (EMMANUEL *et al.*, 2015).

2.2.4. Qualidade da argila utilizada

Como referido sub-tópico 2.1.6, a principal conclusão foi que os solos argilosos contendo baixo teor de caulinita, que estão amplamente disponíveis, podem ser ativados termicamente para exibirem altas atividades pozolânicas, o que permite níveis razoavelmente altos de substituição do teor de clínquer argilas calcinadas sem comprometer a resistência nem a durabilidade dos materiais produzidos. Devido à menor energia incorporada destas misturas, esses materiais poderiam representar uma alternativa mais ecológica e econômica.

2.2.5. Estudos de viabilidade econômico-ambiental

As experiências pioneiras de desenvolvimento e utilização de cimentos LC^3 se deram em Cuba e na Índia, onde foram implementados projetos-piloto em escala industrial e construídas várias estruturas usando o cimento. Formou-se em 2015, um programa de cooperação internacional, entre a Universidad Central de Las Vilas (UCLV) em Cuba e o Laboratory of Construction Materials, da Ecole Polytechnique Federal de Lausanne (EPFL) da Suíça, objetivando avaliar a viabilidade das argilas calcinadas de baixo teor de caulinita para produção de cimentos de baixa emissão de carbono. Numa primeira etapa o trabalho desenvolvido pelos pesquisadores procurou investigar a reatividade de argilas com teor de caulinita de até 40%. O sucesso desta etapa habilitou as equipes a formularem misturas ternárias contendo clínquer, argilas calcinadas e fíleres calcários, com teor de substituição do clínquer de até 50%.

Joseph *et al.* (2015) demonstraram que, para os custos normais de calcinação, o cimento LC^3 é mais econômico do que o cimento Portland comum. Os autores fizeram uma análise das implicações econômicas da utilização do cimento LC^3 na Índia e chegaram à conclusão de que o custo do cimento LC^3 é mais baixo por dois motivos: redução do fator clínquer e menor

quantidade de combustível e eletricidade para calcinação da argila em comparação com a produção do clínquer. Na Figura 10 é apresentado um fluxograma do potencial econômico-ambiental do cimento LC^3.

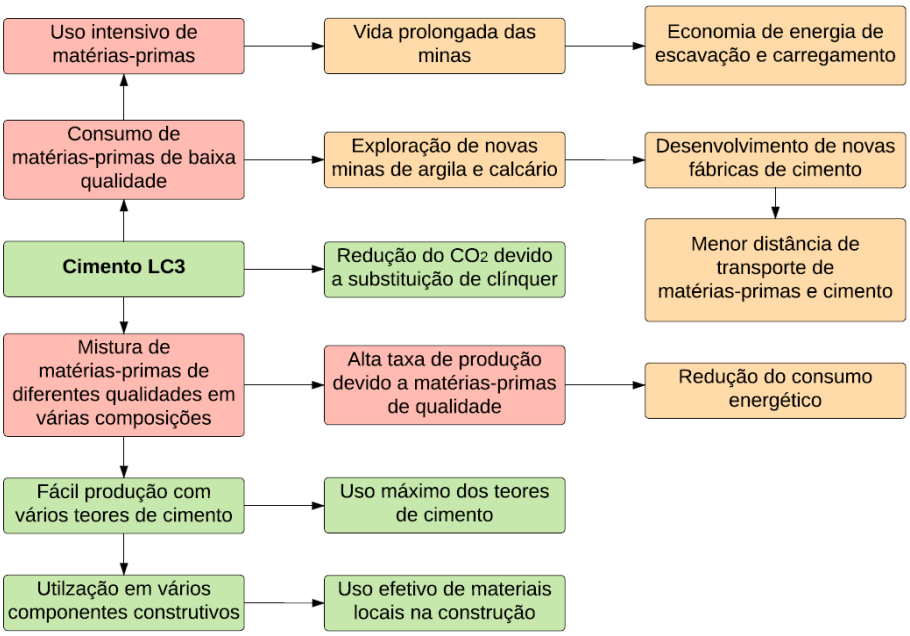


Figura 10 - Diagrama de fluxo potencial de sustentabilidade do cimento LC^3 (adaptado de EMMANUEL *et al.*, 2015).

Berriel *et al.* (2015) estudaram duas técnicas amplamente utilizadas na avaliação de impactos ambientais de cimentos na literatura, para a produção de cimento em Cuba: a Avaliação do Ciclo de Vida e a Ecoeficiência. A primeira técnica foi utilizada para avaliar o impacto ambiental da produção do cimento LC^3 desde a extração de matérias-primas até o portão da fábrica. A ACV comparou três cimentos cubanos e seus impactos associados: OPC (cimento Portland comum), PPC (cimento Portland composto) e LC^3 (*limestone calcined clay cement*). Foi desenvolvido um inventário utilizando estatísticas oficiais do setor do cimento, e calculado índices produtivos, econômicos e fatores de emissão. Os principais impactos identificados foram potencial de aquecimento global e intenso gasto energético. Na Tabela 5 é apresentada a composição química do cimento LC^3 e do cimento utilizado como referência para a avaliação de impactos.

Tabela 5 - Composição dos cimentos para avaliação de impactos (BERRIEL *et al.*, 2015).

Tipo de cimento	**Composições do cimento (%)**				
	Cínquer	Fíler Calcário	Gesso	Argila calcinada	Zeólita
OPC (P-35 em Cuba)	0,88	0,05	0,07	-	-
PPC (PP-25 em Cuba)	0,75	-	0,05	-	0,20
LC^3 (ensaio industrial)	0,50	0,14	0,09	0,27	-

Na avaliação de Berriel *et al.* (2015), o processo de calcinação de argila apresentou uso de menor quantidade de energia, sendo que a maior redução foi decorrente da energia térmica para processo de calcinação. Observou-se uma redução de mais de 1500 MJ por tonelada de cimento produzido. Para estimar as emissões de CO_2, seguiu-se a metodologia do IPCC (2006), em que a produção de clínquer é multiplicada por um fator de emissão. As emissões causadas pela decomposição química de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ contido nas matérias-primas (calcário e argilas), foram deduzidos por meio de cálculos estequiométricos calculando as diferenças no teor de CaO e MgO das matérias-primas antes de introduzidos no forno e na saída (produção de clínquer ou argila calcinada).

Na fase de moagem do cimento, o CO_2 foi associado ao consumo de energia elétrica no moinho de bolas. Outras fontes de emissões forma consideradas insignificantes e foram descartadas. O cálculo final das emissões de CO_2 é apresentado na Figura 11.

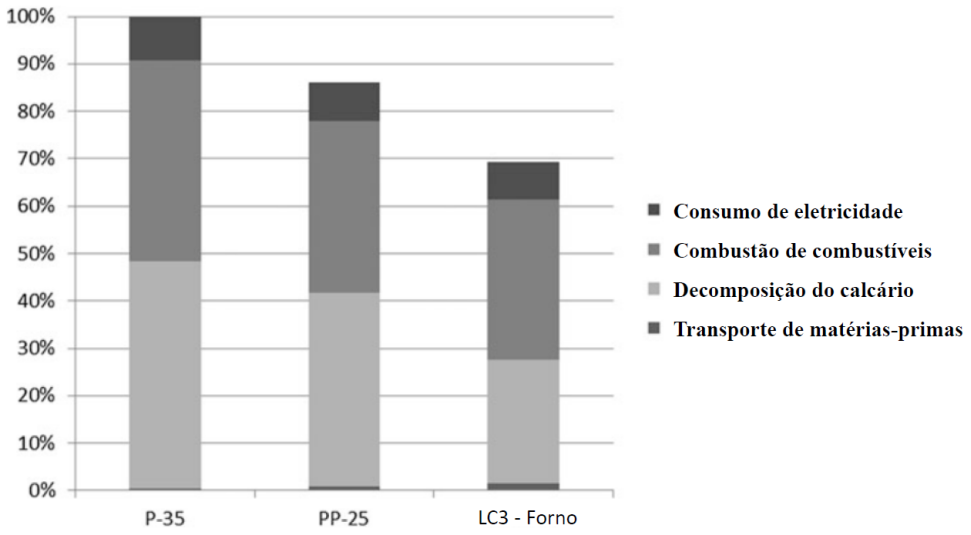


Figura 11 - Emissões de CO_2 associadas à produção de LC^3 com 45% de MCS comparado aos cimentos referenciais P-35 e PP-25 em Cuba
(BERRIEL *et al.*, 2015).

O cimento LC^3 produzido em condições não otimizadas durante o processo industrial teve redução de aproximadamente 360 kg de CO_2 / tonelada em relação ao OPC (P-35), isto é, aproximadamente 31%. Já a redução referencial do cimento tradicional cubano PPC (PP-25) está na ordem de 155 kg CO_2 / tonelada. Um pequeno aumento é associado às emissões de transporte devido à quantidade de nova matéria-prima que precisa ser transportada, que é insignificante se compararmos as reduções geradas durante o processo de produção do cimento.

A produção de LC^3 em Cuba teve impacto econômico e ambiental positivo, com uma redução do custo de produção entre 4 e 40%, e redução de emissão de CO_2 entre 15 e 30% a depender da tecnologia usada para produzir a argila calcinada e do depósito de argila caulinita para a sua produção.

Na Figura 12 estão apresentadas as emissões de CO_2 e a resistência à compressão aos 28 dias do cimento LC^3 produzido pelo ensaio industrial de Vizcaíno *et al.* (2015) na fábrica de cimento cubana de Siguaney, em comparação com os valores de referência dos cimentos P-35 e PP-25 cubanos, o que leva a conclusão de que o cimento LC^3 conduz a baixas emissões de carbono, não comprometendo o desempenho do cimento, mesmo em comparação com outros cimentos produzidos industrialmente na fábrica de cimento.

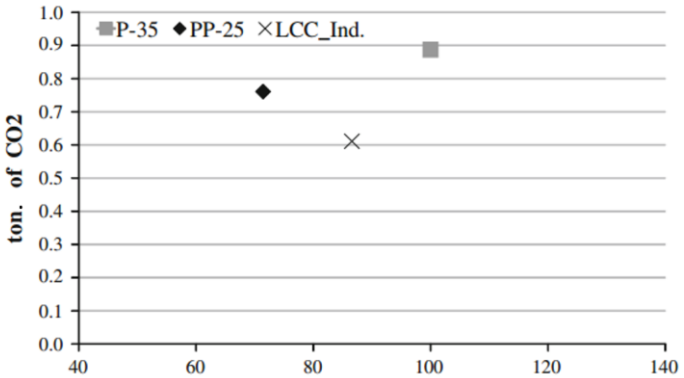


Figura 12 - Resistência à compressão normalizada para OPC (Vizcaíno *et al.*, 2015).

Vizcaíno *et al.* (2015), também compararam as emissões de dióxido de carbono com o fator de clínquer. Os resultados, em cada etapa da produção do cimento estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Emissões de CO_2 vs fator de clínquer na produção de cimento (VIZCAÍNO *et al.*, 2015).

Fases do processo produtivo	**Valor unitário (kg CO_2/t)**	**Fator de clínquer (%)**		
		100	70	55
Calcinação de matérias-primas (CaO e MgO)	502,0	502,0	351,4	276,1
Combustível	320,0	320,0	224,0	176,0
Adições (argila calcinada, fíler calcário)	380,0	0,0	38,2	57,2
Moagem	100,0	100,0	100,0	100,0
Outros	60,0	60,0	60,0	60,0
Total		982,0	773,6	669,3
Economia relativa a um fator de clínquer de 100%		100%	79%	68%

Ainda segundo Vizcaíno *et al.* (2015) o novo sistema de cimento poderia permitir uma redução nas emissões associadas ao fabricação de cimento na faixa de 25-35% relacionada à prática atual, redução esta baseada na substituição do clínquer, que é o principal liberador de CO_2. Segundo dados de 2012 do governo indiano, o cimento PPC deteve a maior parte da produção total (65%), seguido pelo OPC com 24%.

Uma metodologia que vem sendo bastante utilizada na determinação dos diversos impactos ambientais, inclusive relacionados ao consumo de energia e emissões de CO_2, causados pelos materiais da construção civil e indústria do cimento é a Avaliação do Ciclo de Vida, que é discutida no item a seguir.

2.3. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

A crescente conscientização sobre a questão ambiental tem influenciado no desenvolvimento de ferramentas para melhor compreender e diminuir os impactos ambientais gerados por determinado produto ou processo. Uma das ferramentas em desenvolvimento acerca dessa temática é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que consiste na compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ou processo ao longo do ciclo de vida do objeto de estudo, permitindo a avaliação do seu desempenho ambiental (IBICT, 2015; COLTRO, 2007).

2.3.1. Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida

Em cada uma das etapas do ciclo de vida de um produto pode ocorrer consumo de energia e de recursos naturais, ocasionando a liberação de emissões, efluentes e geração de resíduos, que pode atingir níveis de danos ambientais. Dessa forma, para que a ACV produza resultados confiáveis e comparáveis, é necessário que os impactos ambientais associados sejam avaliados por de metodologias e procedimentos sistemáticos padronizados (STANO, 2008).

A Avaliação do Ciclo de Vida é regulamentada pelas normas internacionais ISO 14040:2014 e ISO 14044:2014, que no Brasil são conhecidas como ABNT NBR ISO 14040:2014 e ABNT NBR ISO 14044:2014, respectivamente. De acordo com a ABNT NBR ISO 14040:2014 a ACV considera os impactos ambientais ao longo da vida do produto, desde a extração de matérias-primas até a produção, uso e disposição final, denominada a ACV "do berço ao túmulo". De modo geral, o estudo de um produto consiste na estrutura apresentada na Figura 13:

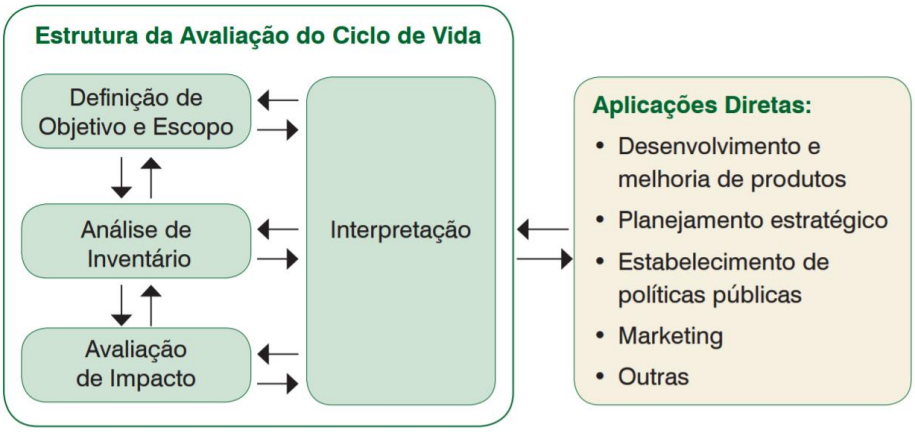


Figura 13 - Fases da ACV
(ABNT, 2009).

Segundo Ribeiro *et al*. (2007) a ACV pode auxiliar na identificação de oportunidades para melhorar aspectos ambientais dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida, na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais e não-governamentais, na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de determinação e no marketing.

Após este breve panorama, as quatro fases do estudo da ACV, de acordo com a ABNT NBR ISO 14040, encontram-se parcialmente transcritas nos itens a seguir.

2.3.2. Definição de escopo e objetivo

Consiste na fase inicial do planejamento para aplicação da ACV e definição clara do objetivo do estudo. Posteriormente, segue-se para a definição do escopo, na qual as seguintes definições são necessárias:

a) Sistema de produto: O sistema de produto consiste numa explicação detalhada das etapas que compõem o ciclo de vida de um determinado produto, desde a extração da matéria-prima, etapas de processamento, uso do produto e transporte necessários entre etapas.

b) Fronteiras do sistema: As fronteiras determinam quais unidades de processo devem ser incluídas na ACV, determinadas pela aplicação pretendida do estudo, pelas suposições feitas, critérios de corte e restrição de dados e custo. Os critérios usados no estabelecimento das fronteiras do sistema devem ser identificados e justificados no escopo do estudo.

c) Funções do sistema: A definição da função do produto em análise é de grande importância para que se busque comparações justas e se identifique funções secundárias e terciárias.

d) Unidade funcional e fluxos de referência: A unidade funcional é a quantificação das funções identificadas no produto que define uma medida de desempenho do produto em análise. Sua importância está em assegurar a comparabilidade dos resultados de ACV. O fluxo de referência consiste na massa de matérias-primas necessárias para a produção da unidade funcional da ACV.

e) Limitações e suposições: A limitação na fronteira da ACV é bastante comum no estabelecimento das fronteiras do sistema, seleção das fontes de dados, categorias de impacto, nos modelos usados para análise de inventário e na aplicabilidade geográfica dos resultados de estudos de ACV. Por exemplo, é comum a limitação das fronteiras do sistema da ACV que analisa a fase de extração das matérias-primas até a produção do produto, ignorando sua vida útil e potencial de reciclagem, conhecida internacionalmente por *cradle-to-gate* (do berço ao portão).

2.3.3. Análise de inventário de ciclo de vida

A segunda fase da ACV corresponde ao período de coleta de dados e procedimentos para análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do estudo (ABNT NBR ISO 14040:2014). Os dados de um ICV são informações que descrevem os fluxos de entrada e saída de um determinado modelo de um sistema técnico, que sejam ambientalmente relevantes, sendo assim é a fase onde se quantificam as entradas e saídas ao longo do ciclo de vida do produto, em massa ou volume. Dessa forma, o ICV configura-se como base de uma ACV, que consiste numa aferição quantitativa de todas as cargas ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto (JOHN *et al*., 2008).

Uma etapa importante a ser realizada nos processos unitários de um ICV é a alocação, que pode ser definida como a separação dos fluxos de entrada e saída de um processo ou de um sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e um ou mais sistemas de produtos (ABNT NBR ISO 14040:2014). Existem diversos métodos de alocação: por massa, energética, econômica e expansão do sistema seguido de substituição.

Na fase de ICV são realizadas a coleta e a quantificação de todas as variáveis – matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos, entre outros – que se relacionem ao ciclo de vida de um produto, processo ou atividade, conforme apresentado na Figura 14.

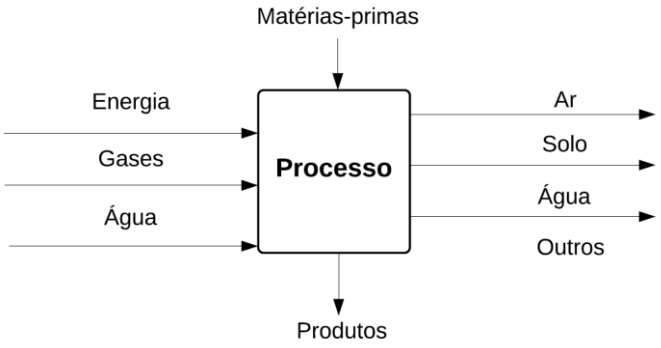


Figura 14 - Categorias de fluxo de materiais de um inventário
(adaptado de JOHN, 2007).

Oliveira (2007) afirma que algumas vezes a ACV acaba tendo limitações devido à falta de dados ou a inacessibilidade dos dados sobre os impactos que efetivamente ocorrem em cada uma das fases de ciclo de vida de um produto, dificultando sua aplicação. Deve-se ressaltar também a

grande desvantagem do Brasil em relação à ausência de um banco de dados nacional, que reflita a situação brasileira e otimize a aplicação da ACV, o que torna prática comum a utilização de bases de dados estrangeiras para adquirir informações, podendo-se citar o *ecoinvent database*, *GaBi database*, dentre outros. Caldeira-Pires (2004) recomenda, entretanto que os dados devam ser coletados e validados para cada contexto geopolítico, tecnológico ou social onde serão aplicados.

2.3.4. Avaliação do impacto do ciclo de vida

Nesta etapa, verificam-se os dados quantitativos de materiais do ICV para tradução em dados de impacto ambiental do sistema de produto, avaliando a intensidade e o significado das alterações potenciais sobre o meio ambiente associado aos recursos naturais, energia e emissões relacionadas ao produto estudado (ABNT NBR ISO 14040:2014). A AICV é a etapa onde se transforma os dados de inventário de aspectos ambientais em impactos ambientais quantificáveis.

Diversas categorias de impactos ambientais podem ser avaliadas num estudo de ACV: mudanças climáticas, toxicidade, acidificação, uso de terra e recursos. De acordo com a ABNT NBR ISO 14040:2014, a AICV é dividida em 5 etapas, sendo que 2 são obrigatórias e 3 opcionais:

a) Classificação (obrigatória): Nesta etapa, cada fluxo elementar do ICV, por exemplo, emissão de CO_2, é atribuído a uma ou mais categorias de impacto ambiental. Os dados de inventário são então classificados e agrupados nas diversas categorias selecionadas. Convém que exista uma correlação dos resultados do inventário de ciclo de vida com as categorias de impacto.

b) Caracterização (obrigatória): A cada fluxo elementar é atribuído um valor referente ao seu respectivo potencial de dano ambiental naquela respectiva categoria de impacto ambiental. Por exemplo, para mudanças climáticas o CO_2 tem o potencial de 1 kg $CO_{2\text{-eq.}}$ e o CH_4 tem um potencial de 25 kg de $CO_{2\text{-eq}}$. Ao final é possível ter os resultados em indicadores específicos de cada categoria, ou seja, a modelagem dos dados de inventário dentro das categorias específicas.

c) Normalização (opcional): Os resultados caracterizados na etapa anterior são relacionados com a magnitude de cada categoria de impacto ambiental, por meio de fatores de normalização, possibilitando observar as categorias de impacto mais significantes.

d) Ponderação (opcional): Consiste num processo onde a cada categoria de impacto ambiental é atribuída uma importância, caracterizando-se uma etapa bastante subjetiva e de aplicabilidade restrita.

e) Agregação (opcional): As diferentes categorias de impacto ambiental podem ser agregadas num indicador único, o que facilita a tomada de decisão.

Os aspectos gerais de impactos ambientais a considerar incluem: a redução de recursos naturais, a saúde humana e as consequências ecológicas (ABNT NBR ISO 14040:2014). Existem, porém algumas abordagens de AICV que focam em uma única categoria de impacto ambiental.

Chau *et al.* (2015) classifica os métodos de avaliação de impacto de acordo com sua abordagem em direcionado a problemas (*midpoints*), que são os métodos de impacto clássicos, com suas categorias de impacto determinadas por problemas ambientais, como aquecimento global e acidificação e, direcionado a danos (*endpoints)*, focados no real efeito dos problemas ambientais, avaliando o dano causado à saúde humana, meio ambiente, recursos naturais e mudanças climáticas.

Devido a relevâncias ambientais distintas de impactos locais e regionais e condições econômicas, existe uma necessidade de se desenvolver um método de AICV direcionado às condições ambientais brasileiras (SOUZA *et al.*, 2007). Os autores afirmam que mediante a identificação e análise de métodos de AICV existentes, observa-se a necessidade de selecionar categorias de impacto específicas, associadas aos principais problemas ambientais do país. Segundo os autores, de acordo com as condições ambientais brasileiras, no mínimo onze categorias de impacto podem ser propostas para o país: mudança climática; depleção da camada de ozônio; depleção de recursos abióticos; acidificação; eutrofização; formação de oxidante fotoquímico; ecotoxicidade; toxicidade humana; consumo de água; uso da terra; e disposição de resíduos.

2.3.5. Interpretação de resultados

Esta fase consiste em identificar e analisar os resultados obtidos na fase de avaliação de impacto de um estudo de ACV. A fase de interpretação de uma ACV compreende as três etapas seguintes:

- Interpretação das questões significativas;
- Avaliação;
- Conclusão.

Levantam-se os resultados da análise de inventário e da avaliação de impacto, relacionando o objetivo e escopo para chegar às conclusões. Considerando que os resultados da análise do ICV são baseados em uma abordagem relativa, que indica efeitos ambientais potenciais e que não prevê impactos reais sobre pontos finais de categoria, a extrapolação de limites e de margens de segurança ou riscos (ABNT NBR ISO 14040:2014).

Para a interpretação dos dados de inventário em categorias ambientais de impacto, SAADE *et al.* (2014) afirma que é preciso adotar uma metodologia específica de conversão ou cálculo que, realizada pelos métodos de avaliação de impacto, possuem sua própria maneira de conversão e utilizam determinadas abordagens de caracterização. Mendes (2013) analisou as características e a aplicabilidade de alguns dos principais métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida, são eles: *CML, Eco-indicator 99, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LUCAS* e *ReCiPe*.

Apesar do surgimento de inúmeros *softwares* voltados para a realização de ACV, dentre os quais podem ser citados o *SimaPro*, o *GaB*i, o *Umberto* e o *Open LCA* (IBICT, 2015), o que ainda se observa na maioria dos estudos é o uso de equações e de dados secundários dos materiais devido ao fato de muitos desses *softwares* possuírem bancos de dados específicos para os países onde foram desenvolvidos e por não terem acesso gratuito.

No caso do *software GaBi*, o usuário pode escolher qual método de avaliação irá gerar os resultados no momento da compilação e, dependendo da escolha, qual categoria de impacto irá avaliar (LIRA, 2017). O método CML apresenta um escopo de aplicação global e possui fatores

de avaliação de impacto para análise de sensibilidade, além da distinção entre categorias de impacto básicas e outras categorias de impacto (Mendes, 2013).

O *GaBi* calcula os potenciais impactos ambientais, bem como outras quantidades importantes de um sistema de produtos baseado em planos, que representam o sistema com seus limites. E os fluxos representam todos os fluxos de material e energia que passam entre os processos e para e do sistema, definindo os fluxos de entrada e saída do sistema (GaBi, 2017).

Os resultados da fase de ICV incluem muitas emissões diferentes. Depois que as categorias relevantes de impacto são selecionadas, os resultados são atribuídos a uma ou mais categorias de impacto. Se as substâncias contribuem para mais de uma categoria de impacto, elas devem ser classificadas como contribuidoras para todas as categorias relevantes. Por exemplo, CO_2 e CH_4 são atribuídos à categoria de impacto potencial de aquecimento global. As emissões de NO_x podem ser classificadas para contribuir tanto para a eutrofização quanto para a acidificação, pelo qual o fluxo total será totalmente atribuído a ambas categorias (GaBi, 2017). Na Figura 15 são abordadas as principais categorias de impacto, sendo que para o potencial de aquecimento global são utilizados fatores do IPCC.

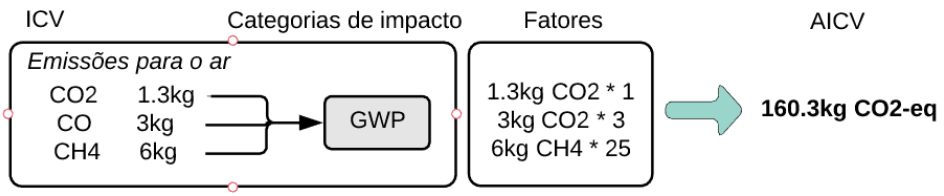
Depleção abiótica	Refere-se ao uso (extração) de recursos naturais abióticos. Os impactos considerados nesta categoria são os derivados da extração de minerais e combustíveis fósseis. A unidade é kg de equivalentes de antimônio (Sb) ou MJ por unidade funcional;
Potencial de acidificação	Significa a acidificação de emissões de poluentes, tais como SO_2 ou NO_x, para o ar. Estas emissões têm impactos negativos no solo, águas subterrâneas, águas superficiais, organismos, ecossistemas e materiais. A unidade para cada produto é igualada a kg de SO_2.
Potencial de aquecimento global	Significa o impacto do produto no aquecimento global através da emissão de gases de efeito estufa para o ar em 100 anos. Cada gás de efeito estufa é igualado a kg de $CO_{2\text{-eq}}$, por kg de emissão.
Depleção da camada de ozônio	Os clorofluorocarbonetos são conhecidos por causar a perda da camada de ozônio que protege a terra de radiação UV prejudicial. Cada produto químico é igualado a kg de CFC-11, por kg de emissão.

Ecotoxicidade terrestre	É potencial da toxicidade terrestre ou a categoria de impacto ambiental resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela disposição de rejeitos, ocasionando, consequentemente, potenciais danos à litosfera. A unidade desse fator é kg de 1,4 DB equivalentes por kg de emissão.
Toxicidade humana	Resulta do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela disposição de rejeitos, ocasionando, consequentemente, potenciais danos à saúde humana. A unidade do fator de caracterização é kg de equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (1,4-DB).

Figura 15 - Principais categorias de impacto segundo o CML (adaptado de CHENANI *et al.*, 2015).

A caracterização descreve e quantifica o impacto ambiental do sistema de produtos analisado. Depois de atribuir os resultados do ICV às categorias de impacto, os fatores de caracterização devem ser aplicados às quantidades relevantes. Os fatores de caracterização estão incluídos nos métodos de categoria de impacto selecionados, como por exemplo o CML. Os resultados do ICV são convertidos em unidades de referência usando fatores de caracterização. Por exemplo, a substância de referência para a categoria de impacto potencial de aquecimento global é CO_2 e a unidade de referência é definida como kg $CO_{2\text{-eq}}$. Todas as emissões que contribuem para o aquecimento global são convertidas em kg de CO_2 (GaBi, 2017). A Figura 16 exemplifica o processo de classificação e caracterização realizado no *software*.

Figura 16 - Exemplo de caracterização de acordo com o fator de caracterização relevante.



Fonte: GaBi (2017).

2.3.6. A ACV através de *softwares* de balanço de massa

Segundo Coltro (2007), uma dificuldade presente nos estudos de Avaliação de Ciclo de Vida é o grande número de dados necessário para análise, que envolve a manipulação de um grande volume de informações, sendo necessário o uso de ferramentas computacionais. Campos (2012) identifica a existência de vários *softwares* de balanço de massa disponíveis no mercado sendo

que todos eles têm bancos de dados próprios, adequados à realidade geográfica na qual se inserem, tornando ferramentas regionalizadas.

Atualmente existem no mercado diversos tipos de *softwares* específicos para a realização de ACV. Em linhas gerais, todos eles contêm bancos de dados com informações referentes a diversos processos produtivos (matérias primas, energia, transporte, resíduos, entre outros) que podem ser escolhidos pelo usuário para a elaboração de um sistema de produto e que relacionam esses processos às respectivas categorias de impacto ambiental, de acordo com o interesse, sendo que cada *software* apresenta particularidades no método de inserção dos dados e de visualização dos resultados**.**

O *software GaBi*, escolhido para modelagem da ACV deste trabalho, foi desenvolvido pela empresa alemã PE International (atual Thinkstep) e é largamente utilizado por empresas e pesquisadores em todo o mundo. É líder do mercado mundial em ferramentas computacionais para ACV e sua base de dados é reconhecida pela quantidade e volume de informação que contém (CALDEIRA-PIRES, 2011). Além disso, possui uma versão educacional gratuita disponível para download e permite a construção do sistema de produto já em forma de fluxograma, o que facilita a visualização dos processos produtivos e a percepção com precisão os pontos de eficiência ou de geração de impactos ambientais. Baseado num conceito modular, também permite que planos, processos, fluxos e suas funcionalidades estabeleçam unidades modulares, conceito esse que permite que várias fases do ciclo de vida, como produção, utilização e deposição, possam ser capturadas em módulos e depois modificados separadamente, tornando a base de dados unidades independentes.

2.3.7. ACV no contexto mundial

Considerando as diferenças evidentes entre países desenvolvidos e aqueles em desenvolvimento, bem como o papel que cada grupo ocupa no panorama da ACV, Campos (2012) fornece uma visão de ferramentas de análise, políticas governamentais e agências de pesquisas desenvolvidas em países como Alemanha, Suécia, Suíça, Dinamarca, Japão, Austrália, Estados Unidos e Canadá, e que vêm investindo fortemente no desenvolvimento de metodologias e inventários de ACV desde o século passado. Ainda que incipientes, estudos também vêm sendo realizados em países como China, México, Chile,

Argentina e Brasil, visto o interesse das indústrias e dos governos na prática e aplicação de ACV.

No governo brasileiro, a ACV é responsabilidade do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI), por meio do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) e, justamente por meio do IBICT foi que o Brasil passou a fazer parte da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida, importante fórum internacional para o desenvolvimento da metodologia ACV. No âmbito da América Latina, o Brasil é o único país que possui um programa de desenvolvimento de ICVs, em total consonância com as diretivas da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida, apoiado pelos Ministérios da Ciência e Tecnologia e de Desenvolvimento Indústria e Comércio (LIMA, 2007; GUINÉE *et al.*, 2011).

De forma geral, poucos países desenvolvidos e nenhum em desenvolvimento têm um banco de dados de ICV abrangente e confiável, o que torna o uso prático da ACV limitado, já que existe uma tendência de usar dados gerados para países estrangeiros os quais foram estabelecidos a partir das realidades diferentes das referidas regiões (JOHN *et al.*, 2008).

2.3.8. ACV e a indústria do cimento

Na indústria da construção existem duas aplicações para a ACV. Segundo Ortiz *et al.* (2009) uma possui foco nos materiais de construção e suas combinações, denominada *Building Material and Component Combinations* (BMCC), e outra é focada em todo o processo da construção, por sua vez denominada *Whole Process of the Construction* (WPC). Entretanto, há predominância em estudos de consumo energético e de emissões de CO_2 aplicados a sistemas construtivos e edificações.

Em estudos comparativos, a ACV deve ser aplicada a produtos que exercem a mesma função. Diante disso, Carvalho (2002) estudou a aplicação da ACV na produção do cimento Portland com adição de resíduos, avaliando os impactos ambientais em nível global, regional e local, bem como as emissões nacionais e internacionais.

Saade (2013) aplicou a ACV para avaliação dos impactos ambientais de diferentes tipos de cimento Portland, com vários percentuais de adição de escória de alto-forno, analisando os resultados decorrentes do uso de vários critérios de alocação de impactos e expansão das

fronteiras do sistema. Para Gursel *et al*. (2014), faltam dados que reflitam variações tecnológicas e geográficas da produção de cimento, sendo que os impactos ambientais do ciclo de vida de outros materiais além do cimento Portland, como adições e o consumo de água, são raramente incluídos nas publicações sobre ACV.

Silva e Silva (2015) iniciaram a construção de inventários de ciclo de vida para materiais de construção nacionais e a validação de inventários internacionais; utilizaram para tal dados para modelagem dos ciclos de produção de materiais e componentes de construção coletados da literatura e adaptados da base de dados do *Ecoinvent*, considerando a análise do berço ao portão. Na pesquisa foram apresentados estes materiais e componentes com dados de energia e emissões de CO_2 para o contexto brasileiro.

Na Figura 17 estão exemplificadas as diferenças significativas nas emissões de CO_2 para a produção de cimento Portland em diferentes regiões do mundo, que podem ocorrer principalmente pelas diferentes fontes de energia que poderão ser utilizados durante o processo.

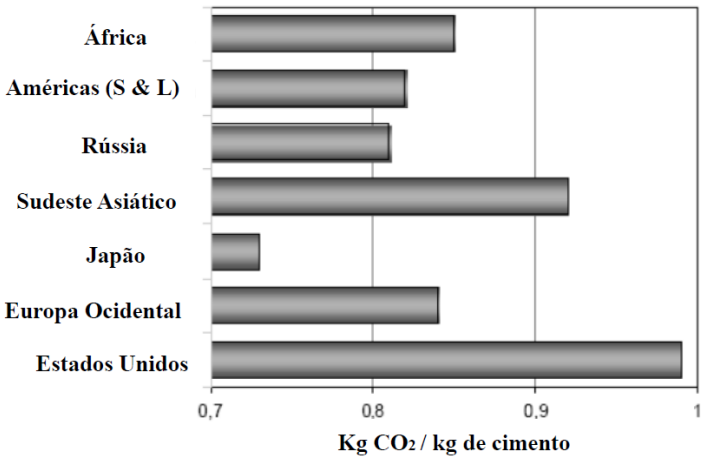


Figura 17 - Emissões médias de CO_2 na produção de 1 kg de cimento Portland em diferentes regiões (JOHN *et al.*, 2008).

3. METODOLOGIA

3.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo aplicar a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no processo produtivo do cimento a fim de comparar o impacto ambiental do cimento LC^3 e cimento Portland composto por meio das emissões de CO_2.

Primeiramente foi definido o objetivo e o escopo do estudo. O objetivo consistiu em declarar a aplicação pretendida e as razões para a realização do estudo, já no escopo foram expostos: o sistema de produto estudado; os tipos e fontes de dados selecionados de acordo com o objetivo e escopo do estudo; a unidade funcional que forneceu uma referência para a normalização dos dados de entrada e saída; a fronteira do sistema que determinou quais processos elementares foram incluídos na ACV; e limitações.

Na próxima etapa deu-se início a análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) que compreendeu as fases de coleta de dados, onde foram coletados os dados quantitativos incluídos no inventário para cada processo elementar da fronteira do sistema, procedimentos de cálculos, e alocação. Os dados levantados foram empregados na modelagem da rede e montagem do ICV, sendo que a adoção do *software* teve por objetivo identificar a contribuição dos processos mais relevantes com relação às emissões de CO_2 envolvendo os cimentos comparados. Para o tratamento e análise do inventário de dados, e interpretação dos resultados, foi utilizado o *software GaBi*.

Após a definição do objetivo e escopo e a elaboração da ICV, é apresentado os dados obtidos referentes às emissões de CO_2 geradas na fabricação dos cimentos LC^3 e Portland composto com pozolana para cada processo elementar. A análise dos resultados permitiu identificar as etapas do processamento industrial que são responsáveis pelo maior impacto ambiental.

3.2. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO

O objetivo da realização desta ACV foi comparar o impacto ambiental na fase de processamento industrial dos cimentos LC^3 e cimento Portland composto com pozolana, com foco na emissão de CO_2, principal indicador de GEE. A categoria de impacto escolhida justifica-se pela

funcionalidade do *software GaBi* na caracterização de todas as contribuições de poluentes em termos de dióxido de carbono, principal indicador de impacto ambiental em análises envolvendo emissão de material particulado e uso de recursos naturais em estudos de ACV.

Devido ao caráter introdutório desta pesquisa, constituem-se principalmente como público-alvo desta análise a comunidade acadêmica e indústria nacional, visto que o desenvolvimento desta metodologia pode contribuir para a realização de outras análises ambientais científicas e, até mesmo tecnológicas, na produção do cimento LC^3.

3.2.1. O sistema do produto

Diversos estudos de ACV identificam os processos unitários específicos por meio da elaboração de diagramas que demonstram a cadeia produtiva do produto analisado. O sistema de produto considerado neste estudo se baseia nos principais processos existentes em uma planta industrial, conforme ilustrado no fluxograma do sistema do produto apresentado na figura abaixo.

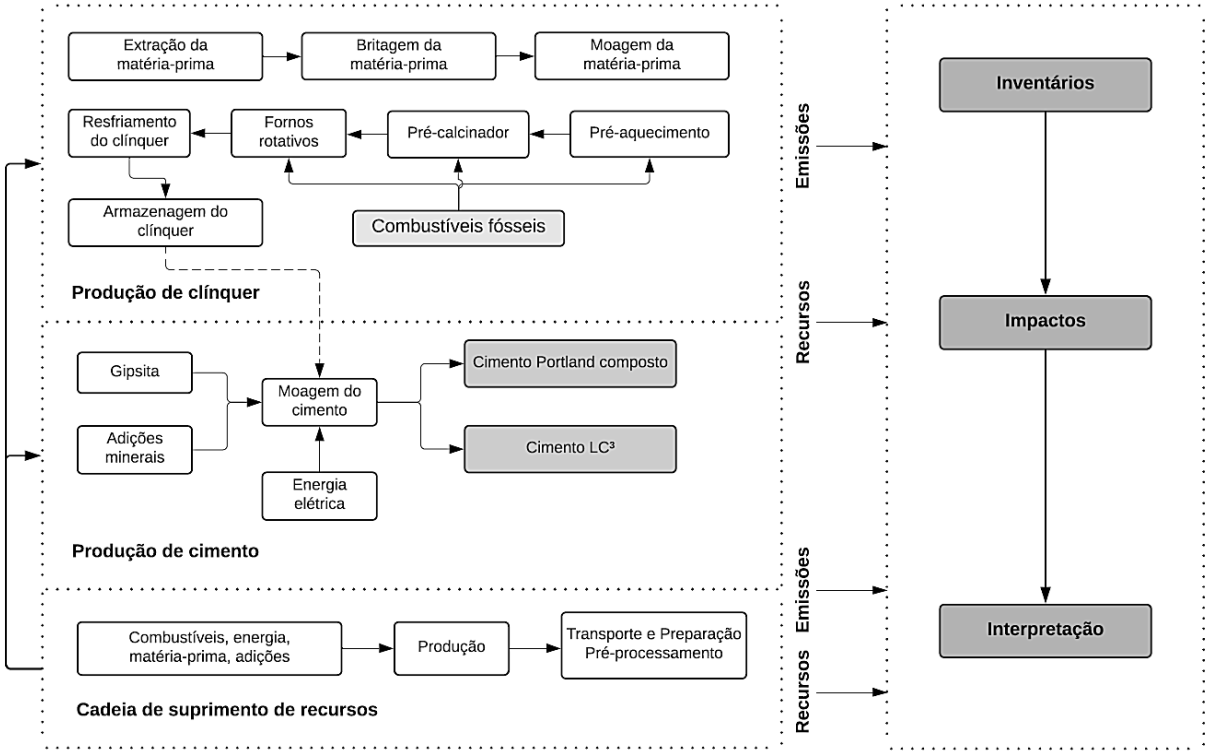


Figura 18 - Sistema de produto "do berço ao portão" da fabricação do cimento (adaptado de GUERREIRO, 2014).

3.2.2. Unidade funcional

Tendo em vista a equivalência funcional dos cimentos em questão, considerou-se que 1 tonelada de cimento produzido seria a unidade funcional mais adequada para servir de referência aos processos avaliados na ACV.

3.2.3. Fronteiras do sistema

Essa ACV ignora as etapas de aplicação e uso do cimento, vida útil, disposição final de resíduos e potencial de reciclagem, se restringindo à fábrica, ou seja, do "berço ao portão". Sendo assim, os limites considerados para comparação dos dois processos produtivos (cimento LC^3 e cimento Portland composto com pozolana) para a análise do ciclo *cradle-to-gate* (berço ao portão) são, portanto, a extração de matérias-primas e combustíveis, o transporte para a fábrica, o processo de produção de clínquer e moagem do cimento.

Na Figura 19 estão ilustradas as diferenças entre os dois processos e delimitada as fronteiras do sistema em estudo.

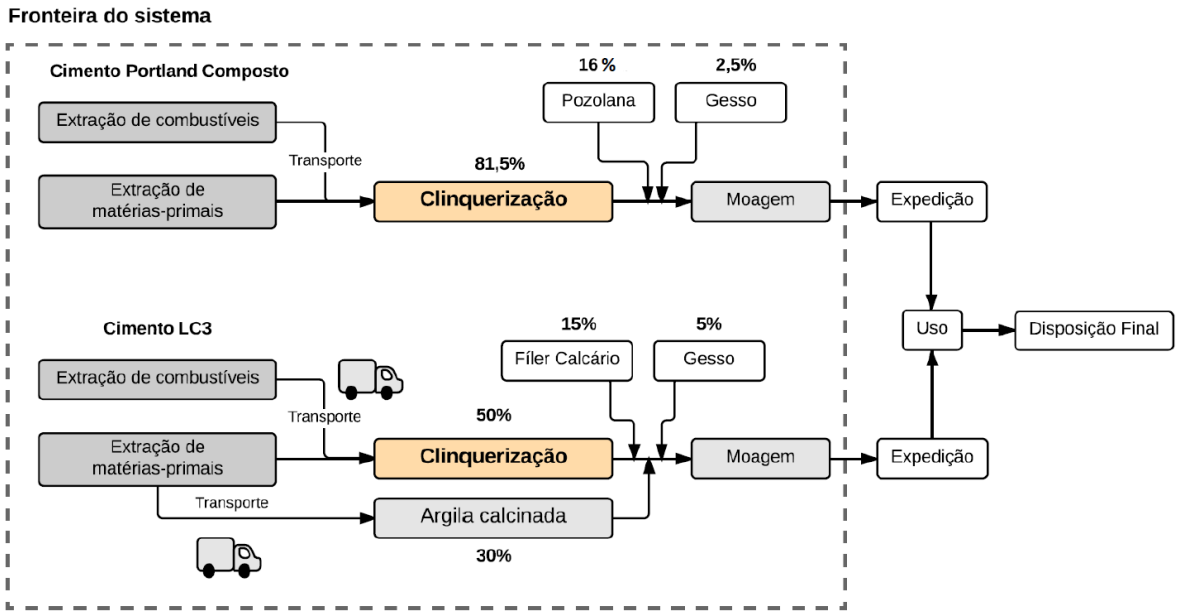


Figura 19 - Delimitação das fronteiras do estudo de ACV comparativo (elaborado pelo autor).

3.2.4. Escolha dos cimentos

O cimento LC^3 escolhido para análise é constituído por clínquer, fíler calcário, argila calcinada e gesso. Esse tipo de cimento foi escolhido devido aos bons resultados obtidos em laboratório e que favorecem a aplicação industrial em países com alta demanda de cimento, mas sem grandes reservas de MCS comumente utilizados. Os teores de composição mineral do cimento LC^3 foram adotados com base em estudos experimentais citados em bibliografia, utilizando as proporções mais representativas observadas na literatura: 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de fíler calcário e 5% de gesso. Decidiu-se utilizar como referência para este estudo o cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z), fabricado pela CIPLAN – DF (Cimento Planalto S/A) que contém em sua composição média aproximadamente 81,5% de clínquer, 16% de material pozolânico e 2,5 % de gesso. Esse tipo de cimento possui ampla utilização na indústria local, área para qual o estudo está sendo realizado.

3.2.5. Fonte de dados

As principais fontes de dados desta pesquisa foram trabalhos acadêmicos, informações industriais e o banco de dados do *software GaBi* e, para o estudo de ICV foram aqueles ligados às entradas e saídas de massa e energia dos sistemas de produto.

3.2.6. Limitações

As limitações do estudo foram, em sua maioria, das suposições realizadas na condução da pesquisa e nas limitações de fronteira consideradas na Figura 20.

Fronteiras geográficas	A pesquisa considerou uma abrangência internacional, pela uso do banco de dados do *software GaBi* e, quando necessárias, utilizou-se processos e dados nacionais e locais disponíveis.
Fronteiras temporais	A base de dados utilizada do *software GaBi* foi de 2016. E a última atualização do CML 2001 (2016).
Fronteiras tecnológicas	Foram inseridos dados dos processos mais recentes e eficientes da indústria nacional e estrangeiras, a depender da disponibilidade dos mesmos.

Figura 20 - Fronteiras consideradas no estudo da ACV.

3.3. ANÁLISE DO INVENTÁRIO

3.3.1. Consumo de materiais

As principais matérias-primas utilizadas são argila e calcário, sendo a argila é extraída por meio de pás carregadeiras de uma jazida de produção da CIPLAN, localizada no município de Formosa – GO, a 53 km da fábrica. A jazida de calcário se localiza a apenas 2 km da fábrica e o gesso, por sua vez, é transportado do estado de Pernambuco.

Neste estudo foram considerados para o cimento CP II Z a composição média utilizada pela CIPLAN para produção de 1 tonelada de cimento, próxima das encontradas do banco de dados de países que consideram o processo de produção do clínquer por via seca. Os dados fornecidos pela fábrica referentes à composição da farinha crua para produção de 1 tonelada de clínquer é de: 95% de calcário, 4% de argila e 1% de minério de ferro, sendo o fator de clínquer utilizado de 1,55. Já para o cimento LC^3, foram adotados principalmente as experimentações em nível industrial propostas por Berriel *et al.* (2015), com fator de clínquer de aproximadamente 1,1.

A Tabela 7 a seguir apresenta a composição da mistura crua do clínquer Portland fornecido pela análise na balança na fábrica da CIPLAN, antes de ser levado aos fornos rotativos. As percentagens da composição sofrem variações em função do estado químico e mineralógico da matéria-prima extraída, sendo que para fins deste trabalho, foram consideradas a média dos resultados das análises realizadas no laboratório da fábrica entre os dias 01/08/2017 e 24/10/2017.

Tabela 7 - Composição química da mistura crua do clínquer Portland.[1]

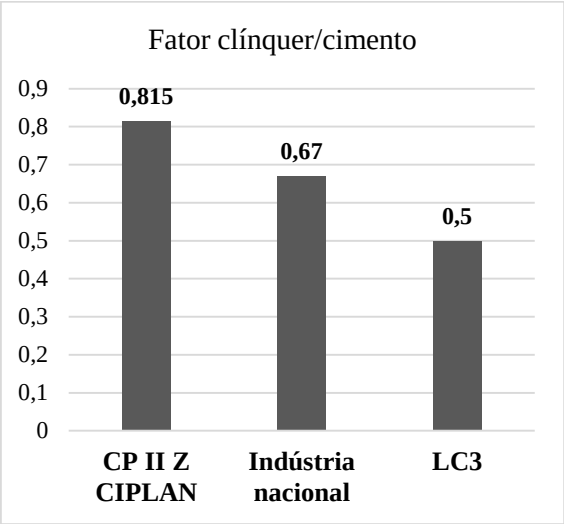
Componentes óxidos	Composição % (kg)
CaO	63,00
SiO_2	20,42
MgO	5,35
Al_2O_3	4,69
Fe_2O_3	2,97
SO_3	1,35
Resto	2,22

(Fonte: CIPLAN-DF)

[1] Outros componentes com percentagens menores que 1% foram desconsiderados.

A partir dos dados fornecidos pela fábrica CIPLAN foi estabelecido o valor médio da relação clínquer/cimento para o cimento Portland composto com pozolana, utilizado como referência e, para o cimento LC[3] a partir de estudos bibliográficos e ensaios industriais realizados, conforme explicitado na Tabela 4. Esta representação, apresentada na figura abaixo, considera também a relação clínquer/cimento da indústria brasileira apresentada pela publicação de dados das indústrias brasileiras.

Figura 21 - Relação clínquer/cimento dos tipos de cimento analisados na ACV[2].



Fonte: elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que uma única categoria de impacto será analisada nesta pesquisa, referente ao potencial aquecimento global, de acordo com a metodologia e balanço energético dos processos de ciclo de vida utilizando o *software GaBi*. O inventário deste estudo de ACV foi realizado a partir da revisão bibliográfica, na qual os dados secundários foram coletados e calculados, de acordo com a definição do escopo, envolvendo as trocas ambientais dos processos envolvidos no sistema. Considerando que existem similaridades entre os cimentos brasileiros e europeus, principalmente da base de dados francesa e alemã, utilizou-se de processos dos tipos de cimentos considerados equivalentes, levando em conta o limite de substituição de clínquer, o tipo de adições utilizadas e as etapas de produção.

[2] O fator indústria nacional de 0,67 foi obtido pelo projeto Getting the Numbers Right (GNR) do WBCSD (2014) e inclui a média dos tipos de cimentos Portland normalizados no Brasil.

3.3.2. Transporte

Para o fornecimento das matérias-primas, a fábrica da CIPLAN estabelecida na Região Administrativa de Sobradinho – DF, na região da Fercal e às margens da Rodovia DF-205 se localiza próxima às jazidas de calcário (2 km) e depósito de argila (53 km). Para a extração de calcário são utilizados explosivos, sendo que para a argila o processo é feito por meio de pás carregadeiras. Para o transporte das matérias-primas são utilizados caminhões de 30/60 t.

3.3.3. Emissões

Para o cálculo dos fatores de emissão dos processos ligados à fabricação do cimento foi utilizada a base de dados do *software GaBi* e adaptada quando necessário às condições brasileiras. Considerou-se que as emissões de CO_2 possuem duas fontes principais no processo de fabricação do cimento: a descarbonatação dos materiais carbonáticos no processo de calcinação e a queima de combustíveis para alimentação do forno rotativo. As emissões das outras etapas são pertinentes a transporte de matérias-primas e da eletricidade nos processos de moagem, consideradas nos respectivos processos, com sua base de dados de valores de entrada e saídas.

3.3.4. Modelagem do inventário

Modelar um sistema de ACV consiste em dimensionar os inventários de todos os processos incluídos nas fronteiras do sistema, observando a unidade funcional e fluxos de referência. Considerando os passos descritos nos tópicos anteriores para a elaboração da modelagem, foram seguidas as seguintes etapas:

1. Busca no banco de dados pelos processos e planos e sua inserção;
2. Criação dos processos e planos necessários que não são do banco de dados do *GaBi*;
3. Conexão dos processos, planos e fluxos.

Para montagem das redes de fluxo foi necessário conhecer todos os processos de obtenção das matérias-primas e fabricação tanto do cimento LC^3 quanto do cimento Portland composto. Todo o levantamento de dados foi realizado para alimentar as necessidades do *software* e gerar um balanço coerente. Os principais dados de inventário para o cimento LC^3 foram relacionadas às matérias-primas utilizadas, tipo de tecnologia, processos de extração e processamento industrial de matérias-primas. Na Tabela 8 é apresentado um resumo dos processos de entrada de

consumo de matéria-prima, combustíveis e demais processos responsáveis pela emissão de CO_2, que foram coletados para cada tonelada de cimento.

Tabela 8 - Processos analisados para o inventário da análise de ciclo de vida do cimento LC^3 e cimento Portland composto com pozolana.

Matérias-primas
Calcário
Argila
Gesso
Minério de ferro
Clínquer
Combustíveis
Processos industriais
Britagem do calcário
Moagem da argila
Homogeneização
Alimentação e exaustão do forno
Moagem de clínquer
Calcinação da argila
Combustíveis
Eletricidade

Após as devidas conversões, os dados foram inseridos no *GaBi*, que forneceu resultados para a avaliação do processo produtivo definido na fronteira, o que permitiu avaliar os impactos gerados, além de comparar os processos produtivos de ambos os cimentos quanto às emissões de CO_2, conforme apresentado no Título 4. Na Tabela 9 são explicitadas as principais considerações metodológicas na realização do estudo.

Tabela 9 – Considerações metodológicas do estudo comparativo.

	Cimento LC^3	**Cimento CP II-Z**
Unidade funcional	1 tonelada de cimento	1 tonelada de cimento
Fonte dos dados de inventário	*GaBi database*, estudos bibliográficos	
Plataforma de apoio	*GaBi Education*	
Método de avaliação de impactos	CML 2001 (*baseline*)	
Categoria de impacto avaliada	Potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq.}}$)	

3.4. AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

Definida a categoria, os resultados obtidos na análise de inventário foram transformados em potencial de impacto, na etapa de classificação. Os resultados da caracterização não serão relacionados a um valor de referência (normalização) para a região inserida na fronteira geográfica, tornando o estudo apenas uma comparabilidade entre cimentos numa produção hipotética.

Para obtenção dos resultados da Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida (AICV) foi realizada a classificação dos impactos e sua posterior caracterização por meio do *GaBi*. Selecionada a categoria de impacto para a análise de emissões de CO_2 o impacto foi representado pelas emissões em $CO_{2\text{-eq}}$. Por ser um estudo de elevada complexidade, a ACV foi simplificada para análise de apenas uma categoria, o que segundo Chau *et al.* (2015), facilita na busca de dados e na interpretação dos resultados.

3.4.1. Escolha do método de avaliação

Na etapa de avaliação de impactos foi adotado o método CML 2001, que transforma os dados do inventário em categorias de impactos específicas, já que não existe nenhum fator de normalização que refira, de forma específica, aos efeitos ambientais para o contexto brasileiro.

A etapa de classificação do inventário é feita automaticamente pelo *GaBi* e pela metodologia CML que inclui também a caracterização. No presente trabalho foi realizado um recorte e analisada a categoria de impacto referente ao potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*), sendo que todos os gases de efeito estufa (GEE) foram convertidos no equivalente de dióxido de carbono ($CO_{2\text{-eq}}$).

3.5. INTERPRETAÇÃO

No presente trabalho, foi analisado o potencial de aquecimento global ($CO_{2\text{-}eq}$), classificados dentro da abordagem *endpoint* na categoria saúde humana, sendo que a interpretação se deu isoladamente de outras categorias de impacto.

Na de interpretação, foi verificado se o objetivo e o escopo definidos foram de fato atingidos. Além disso, houve a detecção dos pontos mais críticos, analisando as etapas responsáveis por maiores contribuições na categoria ambiental e qual processo, matéria-prima ou produto foi o maior contribuinte dentro da mesma etapa.

No fluxograma da Figura 22 são ilustradas as etapas metodológicas que foram utilizadas na pesquisa com fins à avaliação final e interpretação dos resultados.

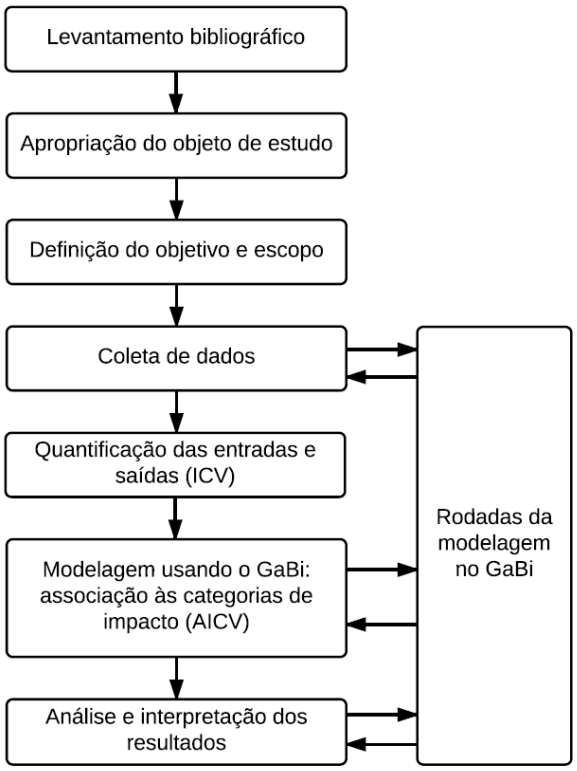


Figura 22 - Fluxograma das etapas metodológicas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

É apresentado neste capítulo os resultados obtidos neste estudo, referentes à avaliação dos dois cimentos comparados: o cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z) e o cimento LC^3. Para alcançar tais resultados utilizou-se a metodologia baseada na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), através da criação de redes de fluxo dos processos produtivos de cada uma das situações analisadas, além da elaboração dos Inventários de Ciclo de Vida (ICVs) de acordo com cada contexto considerado. Por fim, ao realizar o balanço de massa de matérias-primas e gastos energéticos, foi possível quantificar os impactos ambientais e a comparação dos danos ao ambiente a partir da quantificação das emissões de CO_2 equivalente, consolidando a transformação de valores de emissão em dados concretos de impacto ambiental.

4.1. CRIAÇÃO DAS REDES DE FLUXO

Para montagem do fluxograma dos processos no *software* foi necessário discretizar todas as composições definidas na metodologia para cada cimento comparado. Os itens abaixo apresentam as quantidades de matéria-prima para fabricação de uma unidade funcional definida para o cimento, com intuito de facilitar a compreensão da criação das redes de fluxo apresentadas no Anexo e de cada composição adotada.

4.1.1. Cimento Portland composto CP II Z

Quantidades para fabricação da unidade funcional 1 tonelada (1000kg) de cimento:

- Clínquer (81,5%) = 815kg.
- Argila calcinada (16%) = 160kg (adição).
- Gesso (2,5%) = 25kg (adição).

Fator clínquer = 1,55.

Quantidade de farinha para fabricação de 815kg de clínquer = 1263 kg (CIPLAN):

- Calcário (95%) = 1200 kg.
- Argila (4%) = 50 kg.
- Minério de ferro (1%) = 13kg.

4.1.2. Cimento LC^3

Quantidades para fabricação da unidade funcional 1 tonelada (1000kg) de cimento:

- Clínquer (50%) = 500kg.
- Argila calcinada (30%) = 300kg.
- Fíler calcário (15%) = 150kg.
- Gesso (5%) = 50kg.

Foram utilizados na composição da farinha para fabricação de uma tonelada de cimento (BERRIEL *et al.*, 2015):

- Calcário (83,8%) = 459 kg.
- Argila (11,7%) = 64 kg.
- Minério de ferro (4,5%) = 25kg.

A composição adotada nos experimentos de Berriel *et al.* (2015), fornece 548kg de clínquer. Para a composição utilizada nesta pesquisa, foi definido um percentual de 50% de clínquer, isto é, 500kg de clínquer para cada tonelada de cimento fabricado. Sendo assim, julgou-se conveniente, a complementação dos dados através do cimento LC^3 cubano, referentes às adições, fonte energética para clinquerização e calcinação da argila. Além do percentual de clínquer, foi utilizado 300kg de argila calcinada e 50kg de gesso (ao invés dos 390kg e 70kg dos experimentos de Berriel *et al.*), proporção esta adotada na maioria dos estudos bibliográficos consultados para fabricação do cimento LC^3, conforme Tabela 4. Sempre que inseridos os dados de composição em massa foram feitas correções proporcionais.

4.1.3. Gastos energéticos

A Tabela 10 sistematiza os resultados de consumo de energia elétrica para cada etapa, os dados secundários utilizados, o tipo de forno utilizado no processamento e o seu consumo percentual relativa à unidade funcional definida.

Tabela 10 - Valores médios de consumo de energia elétrica nas várias etapas de fabricação dos cimentos em kWh/t de cimento.

ETAPA	Subetapa	Forno com pré-aquecedor e pré-calcinador (kWh)		Consumo proporcional por etapa	
		Cimento CP II Z	**Cimento LC[3]**	**Cimento CP II Z**	**Cimento LC[3]**
Britagem e Homogeneização [3]	Britagem pri. e sec. de calcário	4,17	2,96	4,04	4,63%
	Britagem da argila	1,02	0,72	0,99%	1,13%
	Moagem do cru	33,58	23,83	32,53%	37,28%
	Homogeneização	4,80	3,41	4,65%	5,33%
Calcinação[3]	Alimentação e exaustão do forno rotativo	17,70	18[5]	17,15%	28,16%
	Acionamento do forno	3,00	-	2,91%	-
	Acionamento do soprador de ar primário	0,96	-	0,93%	-
Moagem do clínquer	Moagem do clínquer	38[4]	15[5]	36,81%	23,47%
TOTAL		103,23	63,92	100%	100%

A alimentação e exaustão do forno no processamento do cimento LC[3] incluem a calcinação da farinha e da argila calcinada, que contribuem respectivamente com 13kWh e 5kWh/t de cimento. Os valores de britagem e homogeneização foram calculados por proporcionalidade em relação ao de fator clínquer do cimento Portland composto utilizando fator 1,1 para o cimento LC[3] que representa 70,97% em relação ao fator do cimento CP II Z.

Não estão incluídos na Tabela 10, o coque de petróleo utilizado como fonte de energia térmica no forno para ambos os processos, por caracterizarem fontes energéticas diferentes das apresentadas. Entretanto, os gastos energéticos de origem elétrica e térmica para a obtenção de clínquer e argila calcinada foram incorporados conjuntamente no forno rotativo. A Tabela 11 apresenta a quantidade de combustível utilizada.

[3] Silva (1994)
[4] CIPLAN
[5] Berriel *et al*. (2015)

Tabela 11 - Valores médios de consumo de energia térmica na etapa de calcinação em kg/t de cimento.

Cimento	Processo	Tipo de combustível (100%)	CIPLAN[6]	Massa clínquer/argila (kg)	Massa combustível (kg)
CP II Z	Calcinação da farinha	Coque de petróleo	0,0808	815	65,9
	Calcinação da argila	Coque de petróleo	0,0808	160	12,9
Subtotal					**78,8**
LC[3]	Calcinação da farinha	Coque de petróleo	0,0808	500	40,4
	Calcinação da argila	Coque de petróleo	0,0808	300	24,3
Subtotal					**64,7**

Priorizando utilizar as condições locais de produção, foi adotado como único combustível fonte de energia térmica para ambos processos 100% de coque de petróleo. Todas as etapas desconsideram o gasto energético térmico referente ao transporte envolvido no processamento industrial.

De forma simplificado, a Figura 23 permite a visualização dos dados inseridos com dados energéticos e consumo de matérias-primas no processamento industrial dos dois cimentos.

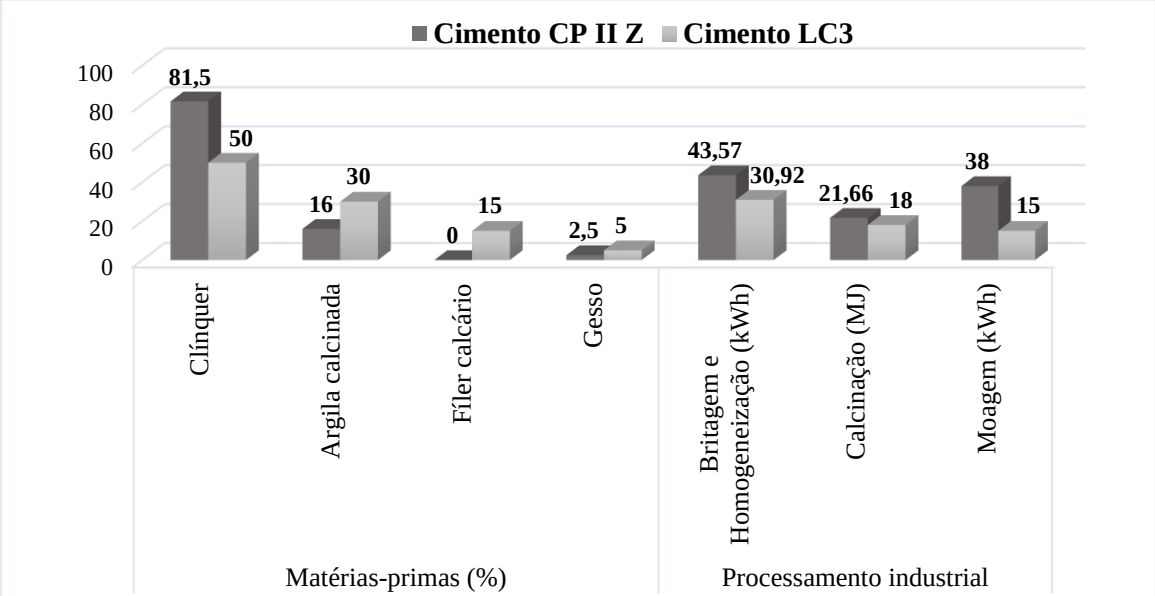


Figura 23 - Representação de valores médios de consumo elétrico e de matérias-primas para produção de uma tonelada dos cimentos comparados[7].

[6] Para o cálculo da quantidade em kg de coque de petróleo foi utilizado o fator 0,0808 kg combustível/ kg de clínquer, convertido através do dado de consumo de 800kcal/ kg de clínquer fornecido pela CIPLAN.
[7] Apesar de apresentados em kWh as entradas do *software* utiliza dados de energia em MJ, com fator de conversão de 3,6.

Cabe ressaltar que os combustíveis para energia térmica calculados na Tabela 11, não foram representados na Figura 23 por diferir quanto a unidade (kg de coque de petróleo) e para não causar equívoco ao comparar dados energéticos de origem térmica e elétrica. Ainda assim, podem ser visualizados no fluxograma apresentado no Anexo.

Tanto na rede de fluxo do cimento Portland composto quanto do cimento LC^3, a contribuição de energia elétrica dos processos de britagem e homogeneização se mostraram superiores à contribuição do processo de moagem do cimento, fato que se deve a alocação do processo com fins à simplificação das etapas individuais da fabricação do cimento, já que o uso de energia elétrica na etapa de moagem geralmente representa o maior consumo percentual do processo de fabricação do cimento.

4.2. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Os resultados da elaboração dos inventários com quantitativos e discriminação das entradas e saídas necessários para quantificação dos efeitos ambientais relacionados à emissão de $CO_{2\text{-eq}}$ das etapas de processamento industrial dos cimentos está apresentado nas Tabelas 11, 12 e 13 como forma de se obter uma melhor organização e entendimento sobre cada atividade do ciclo. As planilhas extraídas do *GaBi* foram adaptadas para o português. O fluxograma montado no *software* contendo os fluxos de entrada e saída são apresentados nos Anexos A e B.

Tabela 12- Etapa de britagem e homogeneização nos processos de produção do cimento CP II Z e LC^3.

CIMENTO CP II Z			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Calcário	Massa	1200	kg
Argila	Massa	50	kg
Minério de ferro (56,86%)	Massa	13	kg
Eletricidade	Energia	157	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Pó de calcário	Massa	1200	kg
Pó de argila	Massa	50	kg
Pó de minério de ferro	Massa	13	kg
CIMENTO LC^3			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Calcário	Massa	459	kg
Argila	Massa	64	kg
Minério de ferro (56,86%)	Massa	25	kg

Eletricidade	Energia	112	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Pó de calcário	Massa	459	kg
Pó de argila	Massa	64	kg
Pó de minério de ferro	Massa	25	kg

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 13 - Etapa de calcinação nos processos de produção do cimento CP II Z e LC^3.

CIMENTO CP II Z			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Pó de calcário	Massa	1200	kg
Pó de argila	Massa	50	kg
Pó de minério de ferro	Massa	13	kg
Eletricidade	Energia	78	MJ
Coque de petróleo[8]	Massa	78,8	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Clínquer	Massa	815	kg
CIMENTO LC^3			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Pó de calcário	Massa	459	kg
Pó de argila	Massa	64	kg
Pó de minério de ferro	Massa	25	kg
Eletricidade	Energia	64,8	MJ
Coque de petróleo	Massa	64,7	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Clínquer	Massa	500	kg

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 14 - Etapa de moagem do cimento nos processos de produção do cimento CP II Z e LC^3.

CIMENTO CP II Z			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Clínquer	Massa	815	kg
Argila calcinada	Massa	160	kg
Gesso	Massa	25	kg
Eletricidade	Energia	137	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Cimento Portland composto CP II Z	Massa	1000	kg
CIMENTO LC^3			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade

[8] Dado inclue a calcinação do clínquer e da argila.

Clínquer	Massa	500	kg
Argila calcinada	Massa	300	kg
Fíler calcário	Massa	150	kg
Gesso	Massa	50	kg
Eletricidade	Energia	54	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Cimento LC[3]	Massa	1000	kg

Fonte: elaborado pelo autor

Os resíduos gerados nas etapas de processamento industrial foram desconsiderados para efeito de balanço de massa de saída dos processos. Já a energia elétrica, apresentou, enquanto matriz energética, grandes fontes de emissão e impacto na categoria ambiental analisada, sendo apresentada apenas com intuito bibliográfico e comparativo.

4.2.1. Resultado de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$)

Na Tabela 15 é apresentado o resultado da categoria de potencial de aquecimento global (emissões de $CO_{2\text{-eq}}$) detalhada por fonte energética e matéria-prima com a respectiva contribuição em percentagem.

Tabela 15 - Resultado da ACV na categoria de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$).

CIMENTO	Potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$)		
CP II Z	RER[9]: Clínquer	825,61	87,80%
	DE[10]: Argila calcinada	52,84	5,62%
	BR[11]: Eletricidade	32,84	3,49%
	BR: Coque de petróleo	29,00	3,08%
	DE: Gesso	0,06	0,01%
Total		**940,35**	**100,00%**
LC[3]	RER: Clínquer	315,80	67,53%
	DE: Argila calcinada	99,07	21,19%
	BR: Coque de petróleo	28,47	6,08%
	BR: Eletricidade	20,36	4,35%
	DE: Fíler calcário	3,8	0,81%
	DE: Gesso	0,12	0,03%
Total		**467,62**	**100,00%**

Fonte: elaborado pelo autor

[9] RER: dados da base francesa.
[10] DE: dados da base alemã.
[11] BR: dados da base brasileira.

Para os dois tipos de cimento analisados, a maior contribuição para o potencial de aquecimento global resultou da descarbonatação do calcário na etapa de calcinação no forno. Para o cimentos CP II Z e LC^3 os percentuais foram de quase 88% e 68%, respectivamente. Já o dado de entrada com segunda maior contribuição é resultado da calcinação da argila, utilizada como adição mineral nos dois tipos analisados com diferentes teores. O uso do cimento LC^3 justifica-se principalmente pelo aumento do percentual de argila calcinada utilizada, que apesar de incrementar ligeiramente o potencial de $CO_{2\text{-eq}}$, diminui a utilização do calcário como fonte de matéria-prima, maior contribuinte.

Um ponto a ser discutido é que o uso de energia elétrica e térmica variou em um pequeno intervalo, entre 3,49-4,35% e 3,08-6,08%, respectivamente, permitindo avaliar que apesar da contribuição do cimento CP II Z possuir potencial de aquecimento global em termos absolutos mais que o dobro em relação ao cimento LC^3, a matriz energética adotada (Tabela 10) se mostrou pouco sensível a esse parâmetro. Fato possivelmente ligado a baixa flexibilidade operacional do forno rotativo e dos moinhos, equipamentos de grandes dimensões que requerem uso intenso de combustíveis e eletricidade principalmente para acionamento e alimentação, com menor grau de dependência da quantidade de matéria-prima a ser processada.

Conforme balanço gerado no *software* o fíler calcário e o gesso tiveram contribuição quase desprezível nos impactos gerados no ciclo de vida, inferiores a 1%. As duas adições minerais, naturalmente extraído de jazidas ou não passam pelo processo de queima ou envolvem a queima a temperaturas mais brandas, como é o caso do gesso. Estas adições foram portanto, consideradas inertes, já que possuem baixo potencial de aquecimento global e não passam por nenhum tipo de processamento industrial com uso considerável de energia elétrica e térmica.

Apesar da relação percentual próxima das matérias-primas e combustíveis energéticos entre os dois tipos de cimento comparados, cabe salientar que o total absoluto de kg de $CO_{2\text{-eq}}$ para o cimento Portland composto com pozolana apresentado na Tabela 15 é consideravelmente maior em relação ao cimento LC^3, com valores iguais a 940,35 kg $CO_{2\text{-eq}}$ e 467,62 kg $CO_{2\text{-eq}}$, respectivamente.

Na figura abaixo pode ser visualizado o potencial de aquecimento global em termos percentuais para cada cimento, por contribuição de matéria-prima e energia.

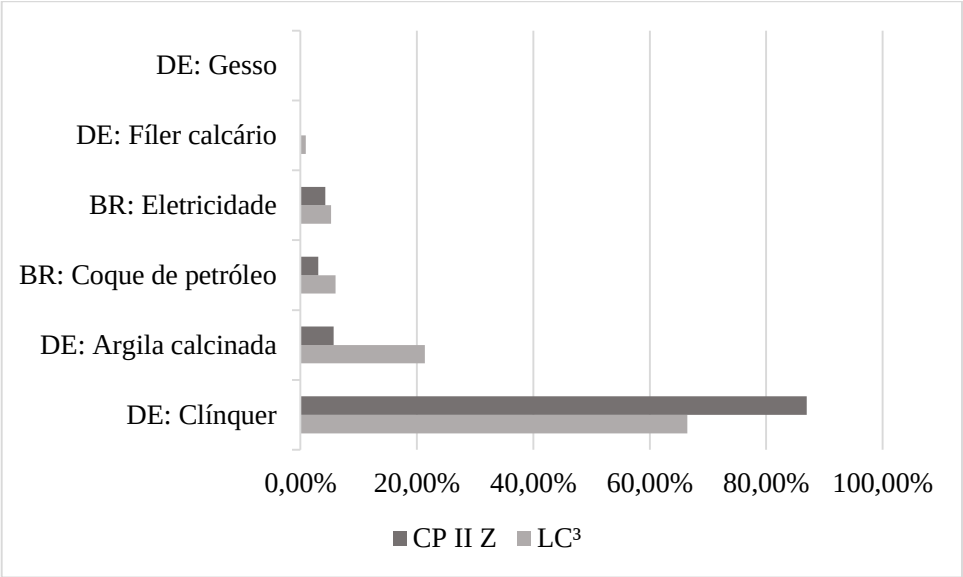


Figura 24 - Representação do resultado de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-}eq}$).

Também se observa, em termos absolutos, que a quantidade de kg $CO_{2\text{-}eq}$ para o cimento CP II Z, com origem no processamento de matérias-primas, se mostra superior ao cimento LC^3, cabendo as seguintes considerações:

- Os resultados apontaram uma redução de 52,33% no potencial de aquecimento global em termos de $CO_{2\text{-}eq}$ com o uso da composição de 50% de clínquer no cimento LC^3, sem considerar a influência dos combustíveis da matriz energética brasileira.

- A quantidade de argila calcinada utilizada como adição mineral no cimento LC^3 é quase duas vezes maior que no cimento CP II Z. Os valores percentuais de potencial de aquecimento global de 99,07% e 52,84%, respectivamente, apresentados na Tabela 15 evidenciam essa proporção e permitem compreender a influência da argila calcinada como substituição ao clínquer, já que tanto os teores de adição de fíler e gesso já são praticados pela indústria.

- Como esperado, a proporção de 15% de fíler calcário utilizada no cimento LC^3 não teve grande impacto na categoria analisada, já que, como adição mineral não é realizado nenhum processo de descarbonatação no forno rotativo.

- Apesar do uso de alguns dados estrangeiros, em termos comparativos, os resultados possuem valores confiáveis por envolverem os mesmos processos, com diferenciais em quantitativo e, realidades de produção próximas à adotada na indústria nacional.

Para Scrivener (2014), o cimento LC^3 pode reduzir as emissões de CO_2 em até 30%, neste estudo essa redução foi superior a 50%. A diferença se deve possivelmente ao cimento de referência objeto de comparação. Vizcaíno *et al*. (2015) compararam as emissões de dióxido de carbono com o fator de clínquer. Para um percentual de 55% de substituição obteve 669 kg de CO_2/t de cimento, superior ao encontrado para o cimento LC^3 com substituição de 50% (468 kg CO_2/ t de cimento).

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, o processo de produção do cimento no Brasil gera em torno de 879 kg CO_2/t de cimento. Guerreiro (2014) aplicou a ACV nos principais cimentos utilizados no indústria nacional utilizando o *software OpenLCA* e encontrou para o cimento CP II Z com fator clínquer/cimento de 0,85 o total de 807 kg $CO_{2\text{-eq}}$. Neste estudo, o valor encontrado para o mesmo cimento de referência foi de 940,35 kg $CO_{2\text{-eq}}$. Diferença que pode estar relacionada ao combustível utilizado no processamento. Comparativamente, o cimento LC^3, ressalvadas simplificações, totalizou 468 kg CO_2/t de cimento.

A comparação dos dois cimentos deste estudo, em termos absolutos, são apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27. Observa-se uma grande diferença na substituição dos teores no cimento CP II Z, com uma redução de mais da metade de $CO_{2\text{-eq}}$, sem incremento de novas matérias-primas ou uso de tecnologia de fabricação que não esteja disponível.

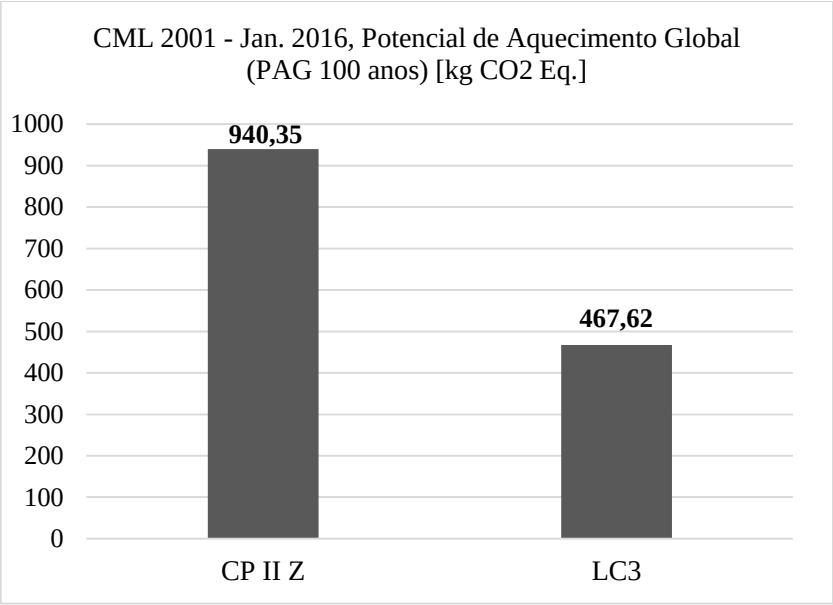


Figura 25 - Resultado da ACV na categoria potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$) em total absoluto.

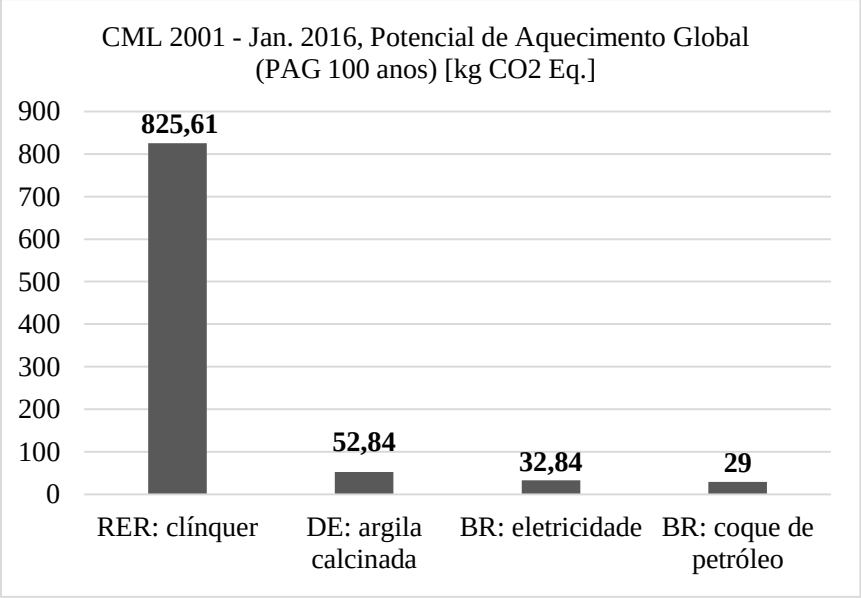


Figura 26 - Resultado da contribuição por processamento da ACV do cimento CP II Z na categoria de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$) em total absoluto.

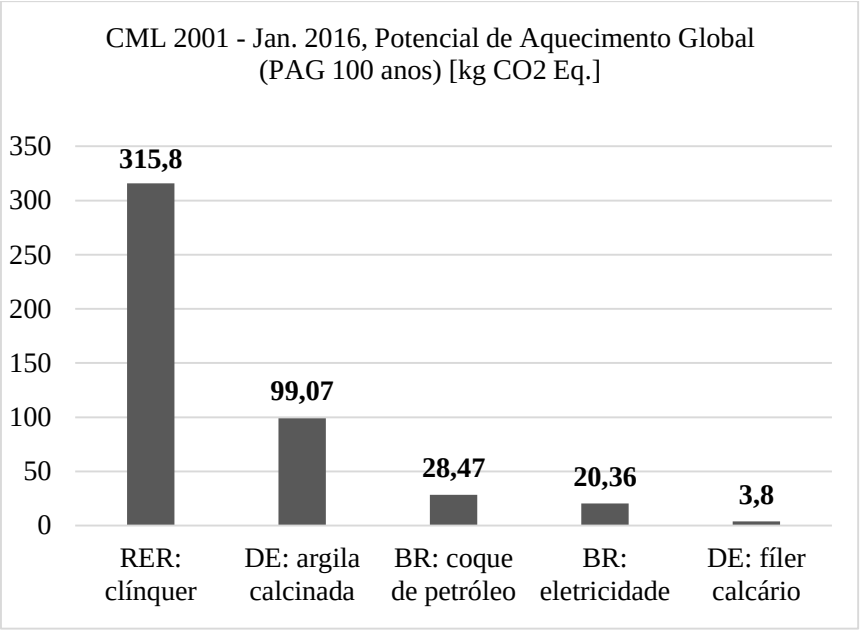


Figura 27 - Resultado da contribuição por processamento da ACV do cimento LC^3 na categoria de potencial de aquecimento global (kg $CO_{2\text{-eq}}$) em total absoluto.

4.3. DISCUSSÕES RELEVANTES

Este estudo não teve como objetivo fazer uma comparação direta entre cimentos da mesma indústria, mas sim uma avaliação comparativa do impacto gerado dentro do sistema produtivo. Na entrada de dados no *software*, quando se trata de matérias-primas, partiu-se do pressuposto de que o impacto da extração dos mesmos é equivalente ao descrito pela base de dados utilizada, cujos dados são, em sua maioria, referentes a condições europeias. Não havia, porém, dados referentes a matérias-primas em nenhum inventário brasileiro na base do *software*. Para evitar distorções significativas nos resultados quando da utilização de processos descritos nas bases de dados, a matriz energética brasileira foi inserida nestes processos, assim adequando-os ao contexto energético nacional.

Alguns processos não foram analisados detalhadamente para o cenário nacional, utilizando-se a base de dados do *software*, pois ou são processos em que a variação tecnológica é muito pequena, ou que não possui grande peso na ACV. Como exemplo, tem-se o processo de extração da argila e gipsita, em que o impacto gerado pela extração do material é praticamente o mesmo, independente da parte do mundo onde são extraídos. Sendo assim, as distâncias de transporte, condicionadas à localização das jazidas de calcários, que possuem o maior percentual de utilização na fabricação dos cimentos foram consideradas irrelevantes para a

montagem das redes de fluxo de transporte para os cimentos analisados. Para este estudo comparativo a distância para transporte do maior contribuinte em peso e geração de impacto, seria de apenas 2 km.

Maiores estudos são necessários no que se refere às limitações assumidas nesta pesquisa, já que negligenciar partes da ACV devidas às insignificâncias, baseadas em estudos anteriores, mesmo com baixos percentuais de energia, consumo de matérias-primas e emissões tóxicas no sistema de produção pode elevar uma parcela significativa de efeitos ambientais calculados. Além disso, as demais etapas dentro da fase de AICV, normalização e definição de ponderadores dos impactos, não foram abordadas.

5. CONCLUSÕES

A avaliação do ciclo de vida dos dois tipos de cimento analisados (cimento Portland composto com pozolana CP II Z e cimento LC^3) para a categoria de impacto de potencial de aquecimento global teve como a produção de clínquer, a etapa que apresentou maior valor de potencial. Em termos absolutos, a redução no valor de emissão de $CO_{2\text{-eq}}$ no processo de fabricação do cimento LC^3 resultou em mais de 50%.

A partir de resultados do *GaBi*, foi possível categorizar os materiais responsáveis pela maior contribuição na categoria de impacto avaliada. O cimento CP II Z se mostrou mais impactante para todos os processos e materiais avaliados na categoria de potencial de aquecimento global, com exceção da argila calcinada e gesso.

O efeito ambiental alcançado pelo aumento do uso de fíler calcário e da argila calcinada, é que menos clínquer necessita ser produzido para obter a mesma quantidade final de cimento, e, consequentemente, menos energia é consumida e menor emissão de CO_2 no processo. Além disso, com base na literatura consultada, ambos possuem uma vantagem maior em relação às outras adições minerais por serem amplamente disponíveis a custos relativamente baixos.

Apesar de não ter sido avaliada a categoria referente ao consumo de recursos minerais e fósseis, uma contribuição importante deste estudo foi a conversão do consumo energético em categorias de impacto de $CO_{2\text{-eq}}$, inserida no *GaBi*, possibilitando correlacionar tal categoria com o uso de eletricidade e combustíveis fósseis. Cabe destacar também a necessidade em se incentivar a utilização de fontes renováveis, que apresentam valores de emissões inferiores ao coque de petróleo, usado majoritariamente na indústria brasileira pela alta disponibilidade e baixo preço.

O menor impacto ambiental do LC^3, no processo de fabricação para a categoria de impacto analisada, reforça a vantagem da utilização de cimentos com menor demanda energética nos processos industriais e, principalmente, o aumento da substituição do clínquer por materiais cimentícios em maiores proporções, sem redução no desempenho e aplicabilidade do cimento.

Os processos analisados na fabricação dos cimentos contribuem para identificar as oportunidades para melhorar aspectos ambientais dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida. Sendo que, os resultados aqui apresentados poderão contribuir para o inventário

brasileiro de ciclo de vida de emissões de CO_2, podendo servir como parâmetros de comparação em futuros trabalhos, o que não dispensa a necessidade de um ICV adaptado às condições ambientais brasileiras, com categorias de impacto específicas.

É válido ressaltar que, ao contrário de outros materiais produzidos localmente, os cimentos são tratados como uma das principais *commodities* mundiais e sujeitos a normas nacionais e internacionais rigorosas, tornando difícil a modificação de cimentos em grande medida para adaptá-los às necessidades econômicas e ambientais locais. Reforça-se também a necessidade da troca de informações entre a área científica e a área industrial, essencialmente responsável para desenvolvimento e evolução real dessa área.

Pode-se avaliar com este estudo, que ainda com as limitações encontradas, os dados e ferramentas disponíveis foram adequados para conclusão dos objetivos propostos. Os resultados mostraram os processos mais relevantes ambientalmente em termos de emissão de CO_2 para os cimentos comparados, além de estudos incipientes do cimento LC^3, servindo como motivação para estudos de processos alternativos na indústria cimenteira nacional e outras pesquisas envolvendo o novo tipo de cimento. O cimento LC^3 constituiu-se um produto com grande potencial para colaborar na redução da utilização do clínquer na fabricação de cimento, sendo os parâmetros mais importantes o teor de substituição e a proporção entre os materiais.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- De acordo com os resultados apresentados, e apesar da emissão de CO_2 ser o passivo ambiental dominante na produção do cimento, recomenda-se que outras categorias de impacto disponíveis no *software* sejam analisadas a fim de entender outros impactos ambientais relevantes na produção do cimento, a exemplo da categoria de depleção abiótica, que fornece dados a respeito do consumo de recursos minerais e combustíveis fósseis. Além disso, outros tipos de cimento Portland nacionais competitivos em termos de pegada ecológica podem ser objetivos de novas comparações com o cimento LC^3

- A viabilidade econômica do cimento LC^3 deve ser considerada, já que caracteriza-se como fator decisivo para sua aceitação e implementação industrial, além de ferramentas relacionadas a consistência dos dados utilizados e análises de sensibilidade, que também podem ser exploradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Mapeamento Tecnológico do Cimento, 2014. Disponível em: <https:// http://www.abcp.org.br/>. Acesso em: maio de 2017.

ABCP, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Pilares da sustentabilidade, 2014. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil/>. Acesso em: maio de 2017.

ABCP, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Programa Setorial da Qualidade de Cimento Portland, 2015. Disponível em: <http://pbqp-h.cidades.gov.br/download.php>. Acesso em: maio de 2017.

ABCP, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, Coprocessamento, contribuição efetiva da indústria do cimento para a sustentabilidade, 2012. Disponível em:<http://www.abcp.org.br/cms/wpcontent/files_mf/folder_coprocessamento_2012.pf/>. Acesso em: maio de 2017.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: cimento Portland composto – especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisites e orientação. Rio de Janeiro, 2014.

ANTONI, M., ROSSEN, J., MARTIRENA, F., SCRIVENER, K.L., Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, Cement and Concrete Research, v.42, 2012, p.1579-1589.

BAUER, L. A. F.; Materiais de Construção. Rio de Janeiro: LTC, Vol.1, 5ª Ed., 1994. 488 p.

BENHALAL, E, ZAHEDI, G, SHAMSAEI, E & BAHODORI, A 2013, Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry, Journal of Cleaner Production, v. 51, p. 142-161.

BERRIEL, S.S., DÍAZ, Y.C., MARTIRENA, J.F.H., e HABERT, G., Assessment of sustainability of low carbon cement in Cuba. Cement pilot production and prospective case, 2015, p.189-194.

BOESCHAND, M. E., e HELLWEG, S., Identifying Improvement Potentials in Cement Production with Life Cycle Assessment, Environmental Science & Technology, v.44, 2010, p. 9143–9149.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). MME – Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2015: ano base 2014. Brasília, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em junho de 2017.

CABEZA, L.F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. Life cycle assessment and life cycle energy analysis of buildings and the building sector: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, v.29, p. 394-416.

CALDAS, L. R. Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO2 de uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing para Diferentes Dados de Inventário. 2016. 177p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2016.

CALDEIRA, A. P.; Princípios do GaBi 4 para Estudos de ACV. Curso de Especialização em "Gerenciamento de Tecnologias Ambientais para a Produção Limpa. Departamento de Engenharia Ambiental – UFES, 2006.

CALDEIRA-PIRES, A. Introdução a Ecologia Industrial. 27 abr. 2011. Notas de aula.

CARVALHO, J. Análise de Ciclo de Vida ambiental aplicada a construção civil - Estudo de caso: Comparação entre Cimentos Portland com adição de resíduos. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 104 p. 2002.

CEMBUREAU, European Cement Association, Key Facts and Figures about Cement, 2007. Disponível em: <https://cembureau.eu/cement-101/>. Acesso em: maio de 2017.

CEMBUREAU, Main characteristics of the cement industry. Key facts., Tech. rep. 2005.

CHAU, C.K.; LEUNG, T.M.; NG, W.Y. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. Applied Energy, 2015, v.143. p. 395-413.

CNI, Confederação Nacional da Indústria; ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland.

COLTRO, L. Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

CSI, Cement Sustainability Initiative. CSI Progress Report, 2012. Disponível em: <http://csiprogress2012.org/>. Acesso em: maio de 2017.

DAI, Z., KUNTHER, W., FERREIRO, S., HERFORT, D. e SKIBSTED, J., Phase assemblages in hydrated portland cement, calcined clay and limestone blends from solid-state 27Al and 29Si MAS NMR, XRD, and thermodynamic modeling, Advances in cement research, 2015, p.109-115.

DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER E. M., Sustainable development and climate change initiatives, Cement and Concrete Research, v.38, 2008, p.115-127.

DUTTA B.; MAITY S., Role of Blended Cement in Reducing Energy Consumption, Advances in cement research, 2015, p.585.

EMMAUEL, A.C., PARASHAR, A., e BISHNOI, S., The role of calcined clay cement vis a vis construction practices in India and their effects on sustainability, Advances in cement research, 2015, p.411-417.

ENCICLO SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS, 2015. Disponível em: <http://blog.enciclo.com.br/5-softwares-para-realizar-analise-de-ciclo-de-vida-acv-dos-seus-produtos/>. Acesso em: maio de 2017.

FERREIRA, J. V. R. Gestão ambiental – Análise de ciclo de vida dos produtos. Instituto Politécnico de Viseu. 2004.

GABI, Paper Clip Tutorial. Part 1: Introduction to LCA and modelling using GaBi. Disponível em: http://www.gabi-software.com/international/support/gabi-learning-center/gabi-6-learning-center/part-1-lca-and-introduction-to-gabi/. Acesso em: setembro de 2017

GARTNER, E., Industrially interesting approaches to "low-CO2" cementes, Cement and Concrete Research v.34, 2004, p.1489-1498.

GUERREIRO, A. Q., Avaliação do ciclo de vida dos cimentos de produção mais significativa no brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G., Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. Environnmental Science & Technology, v. 45, n. 1, 2011, p. 90-96.

GURSEL, A. P.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A., Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review: Cement and Concrete Composites, v. 51, 2014, p. 38-48.

HENDRIKS, C.A.; WORRELL, E.; JAGER, D.; BLOK, K.; RIEMER, P.; Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry, IEA greenhouse gas control technologies conference, 2004.

IBICT, Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. Desenvolvimento sustentável e avaliação do ciclo de vida. Brasília, 2014. Disponívem em: <http://acv.ibict.br/documentos/publicacoes/>. Acesso em: maio de 2017.

IEA – International Energy Agency – Energy Technology Transitions for Industry, 2009.

IEA, CO2 emissions from fuel combustion. 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/>. Acesso em: maio de 2017.

IEA, WBCSD, Cement technology roadmap 2009 carbon emissions reductions up to 2050., OECD/IEA; WBCSD, Paris; Conches - Geneva, Switzerland, 2009. Disponível em: <http://wbcsdcement.org/pdf/technology/WBCSD-IEA_Cement%20Roadmap.pdf.>. Acesso em: maio de 2017.

IMBABI, M.S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S.; Trends and developments in green cement and concrete technology, International Journal of Sustainable Built Environment, v.1, 2012, p.194–216.

JOHN, V.M.; OLIVEIRA, D.P.; AGOPYAN, V., Critérios de sustentabilidade para a seleção de materiais e componentes – uma perspectiva de países em desenvolvimento. Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, USP, 2008. Disponível em <http://pcc2540.pcc.usp.br/>. Acesso em: junho de 2017.

JOSEPH, A.M., SHAH, V., e BISHNOI, S., Protocol for prediction of durability of new cements: application to LC3, Advances in cement research, 2015, p.403-409.

JOSEPH, S., JOSEPH, A. M., e BISHNOI, S., Economic implications of limestone clinker calcined clay cement (LC3) in India, Advances in cement research, 2015, p.501-507.

KARSTENSEN, K. H., Formation and Release of POPs in the Cement Industry, 2nd Edition, SINTEF – Fundação para a Pesquisa Científica e Industrial da Noruega, WBCSD-CSI, 2006.

KRISHNAN S.; EMMANUEL A.C.; Shashank BISHNOI S., Effective Clinker Replacement Using SCM in Low Clinker Cements, Advances in cement research, 2015 p. 516-521.

LIRA, J. S. M. M. (2017). Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-04A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p.

LOQUES, R. Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada do Cimento Portland. (Projeto de Graduação) Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 49p. 2013.

MAITY, S.; BISHNOI, S.; KUMAR, A., Field application of limestone-calcined clay cement in India, Advances in cement research, 2015, p.435-441.

MARTIRENA, J.F.; SCRIVENER K.L., Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba. Advances in cement research, 2015, p.323-329.

MENDES, N., Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, USP, São Carlos, 2013.

MCTI, Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014.

MMANUEL, A. C.; PARASHAR, A.; BISHNOI S., The Role of Calcined Clay Cement vis a vis Constrution Practices in India and Their Effects on Sustainability, Advances in cement research, 2015, p. 411-418.

MELLO, R.Z. Avaliação do ciclo de vida de concreto auto adensável: comparação com diferentes teores de adição de escória de alto-forno. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 108p. 2015.

PARASHAR, A., KRISHNAN, S., e BISHNOI, S., Testing of suitability of supplementary materials mixed in ternary cements, Advances in cement research, 2015, p.419-425.

PAULA, L. G. Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Misturas de Resíduos. Dissertação (Mestrado em Conversão de Enegia)- Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 158 p. 2009.

PEREIRA, M.F., Conteúdo energético e emissões de CO2 em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso. 2014. Dissertação (Mestrado) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

PEREZ, A.; FAVIER, A.; MARTIRENA, A. F. e SCRIVENER K.L., Influence of the manufacturing process on the performance of low clinker, calcined clay-limestone portland cement, Advances in cement research, 2015, p.283-289.

RIBEIRO, C. M; GIANNETI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. Avaliação do ciclo de vida: uma ferramenta importante da ecologia industrial. Disponível em: <www.hottopos.com/regep12/art4.htm>. Acesso em: junho de 2017.

SAADE, M. R. M., Influência da alocação de impactos na indústria siderúrgica sobre a avaliação de ciclo de vida de cimentos. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2013.

SAADE, M., SILVA, M; GOMES, V., et al. A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. Natureza on line, v. 3, p. 109-116, 2014.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO H., Sustainable cement production – present and future. Cement and Concrete Research, 2011, v.41, p.642-650.

SCRIVENER, K. L.; FAVIER, A. R., Calcined Clays for Sustainable Concrete, 2015, p.6.

SCRIVENER, K.L., Options for the future of cement. Indian Concrete Journal, 2014, v.88(7), p.11-21.

SCRIVENER, K.L.; JOHN M.J.; GARTNER E.M.; Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO2, cementbased materials industry. United Nations Environment Programme (UNEP), 2016.

SHAH, V.; JOSEPH A.M.; and BISHNOI S., Durability Characteristics of Sustainable Low Clinker Cements: A Review, Advances in cement research, 2015, p.523-530.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.

SILVA, R. J. (1994), *Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 242p.

SNIC, 2010. Press Kit 2009. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Rio de Janeiro, RJ.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento, 2012. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/>. Acesso em: abril de 2017.

SNIC, SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2008. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/>. Acesso em: abril de 2017.

SNIC, SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - 2010. 2011. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: maio de 2017.

SOUZA, D. M.; SOARES, S. R.; SOUSA, S. R., A life cycle impact assessment method for the Brazilian context. In: Conferência Internacional do Ciclo de Vida – CILCA 2007. São Paulo, 2007.

STANO, L. C. Avaliação do ciclo de vida: uma ferramenta que merece ser mais conhecida. Disponível em: <http://www.brasilpnuma.org.br/pordentro/artigos>. Acesso: maio de 2017.

Technology Roadmap: Low carbon technology for Indian cement industry. International energy agency In: 95th report on performance of cement industry, Department of Commerce, Government of India (2012).

TIRONI, A., SCIAN, A.N., e IRASSAR, E. F., Ternary blended cement with limestone filler and kaolinitic calcined clay, Advances in cement research, 2015, p.195-201.

TONGBO, S.; BIN W.; LIJUN Z.; ZHIFENG C., Meta-Kaolin for High Performance Concrete, Advances in cement research, 2015, p.467-477.

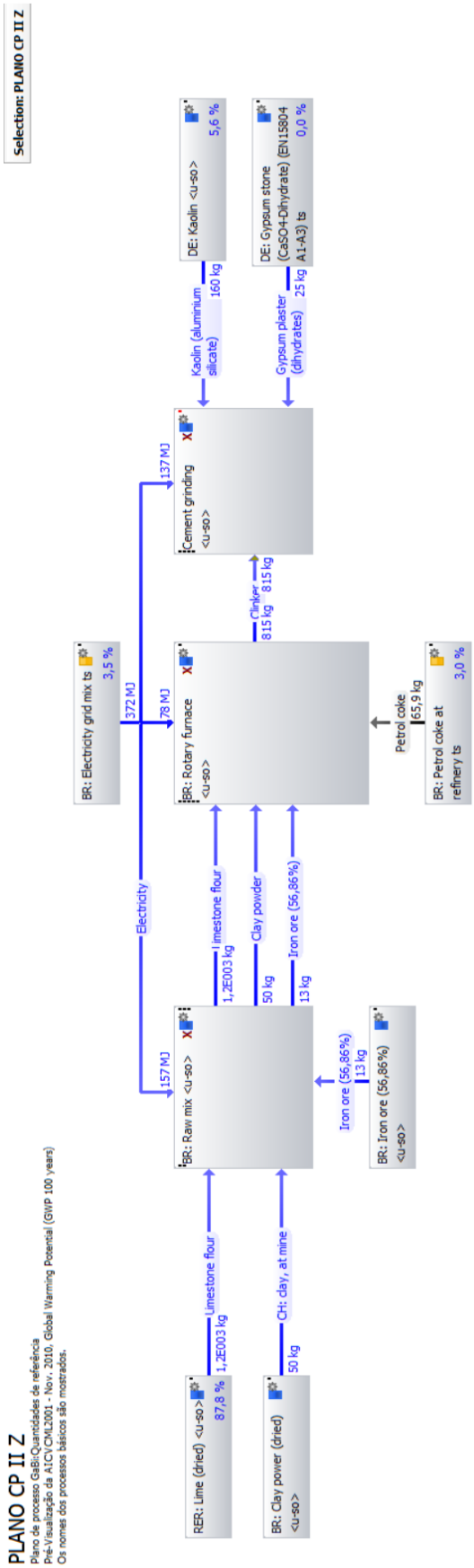
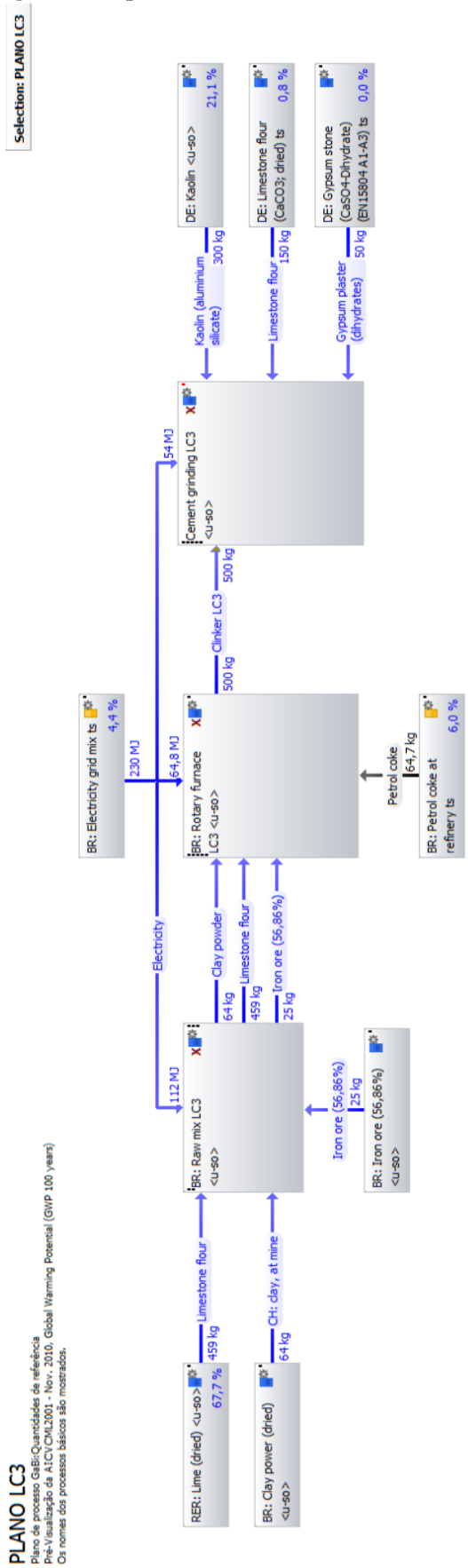
VIZCAINO, A.L.; ANTONI, M.G.; ALUJAS, A.D.; MARTIRENA, J.F.; SCRIVENER, K.L. Industrial Manufacture of a Low-Clinker Blended Cement Using Low-Grade Calcined Clays and Limestone as SCM: The Cuban Experience. Advances in cement research, 2015, p.347-358.

WBCSD, World Business Council for Sustainable Development, Cement Technology Roadmap, 2009.

WBCSD, World Business Council for Sustainable Development. Explore Cement. 2012. Disponível em: < https://www.wbcsdcement.org/>. Acesso em: maio de 2017.

ANEXO

ANEXO A: Fluxograma do processamento do cimento Portland composto com pozolana no software GaBi.



ANEXO B: Fluxograma do processamento do cimento LC^3 no software GaBi.