

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

Igor Marin Magno da Cruz

**IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DE CIMENTOS DE
DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO PRODUZIDOS NO BRASIL:
ANÁLISE PROBABILÍSTICA**

Porto Alegre, Dezembro de 2018

Igor Marin Magno da Cruz

**IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DE CIMENTOS DE
DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO PRODUZIDOS NO BRASIL:
ANÁLISE PROBABILÍSTICA**

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

Orientadora: Ana Carolina Badalotti Passuello

Orientadora: Ana Paula Kirchheim

Porto Alegre, Dezembro de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Cruz, Igor Marin Magno da
Impactos ambientais do ciclo de vida de cimentos de diferentes teores de adição: análise probabilística / Igor Marin Magno da Cruz. -- 2018.
79 f.
Orientadoras: Ana Carolina Badalotti Passuello, Ana Paula Kirchheim.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Cimento. 3. Adições Minerais. 4. Sustentabilidade. 5. Simulação de Monte Carlo. I. Passuello, Ana Carolina Badalotti, orient. II. Kirchheim, Ana Paula, orient. III. Título.

Igor Marin Magno da Cruz

**IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DE CIMENTOS DE
DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO PRODUZIDOS NO BRASIL:
ANÁLISE PROBABILÍSTICA**

Porto Alegre, Dezembro de 2018

Ana Paula Kirchheim
Dr^a. pela UFRGS
Orientadora

Ana Carolina Badalotti Passuello
Dr^a pela Universidade Rovira i Virgili
Orientadora

Banca Examinadora

Seiiti Suzuki (InterCement)
Mestre pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Prof. Daniel Pagnussat (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ana Carolina Badalotti Passuello (UFRGS)
Dr^a pela Universidade Rovira i Virgili

Ana Paula Kirchheim (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais e minha irmã, Carlos, Maria e Camila, pelo apoio incondicional durante minha trajetória acadêmica e por todo carinho e amor ao longo de toda minha vida sem os quais jamais me tornaria quem sou hoje.

Agradeço as minhas orientadoras Ana Paula Kirchheim e Ana Carolina Passuello pelos ensinamentos passados, pelas oportunidades oferecidas e claro por toda orientação neste trabalho e durante minha iniciação científica.

Agradeço também aos doutorandos Michele Dias e Gustavo Moraga e ao professor João Ricardo Masuero pelos ensinamentos, pelas conversas e por toda a ajuda recebida nesses últimos anos.

Por fim, agradeço aos meus amigos, em especial Rech, Lorenzo, Catarina, Yudi, Oliveira, Soledade, Sacco, Martins e Mylena, companheiros de trajetória, por todo suporte, pelas risadas e pelos abraços.

Não tenhamos pressa, mas
não percamos tempo.

José Saramago

RESUMO

Diversos esforços têm sido realizados no intuito de tornar as relações entre o ser humano e a natureza mais sustentáveis em diversos setores, entre os quais destaca-se a construção civil. Nesse setor, é de extrema importância a utilização de métricas que possibilitem avaliar e comparar o desempenho ambiental de produtos, fornecendo informações que suportem a tomada de decisão. A avaliação de ciclo de vida (ACV) é a ferramenta de sustentabilidade mais utilizada para esse fim, avaliando as características ambientais e os potenciais impactos ao longo de todo ciclo de vida de produtos, processos e serviços. Neste aspecto, este trabalho avalia os impactos ambientais potenciais associados ao ciclo de vida dos cimentos produzidos em maior volume no Brasil (CPII Z, CPII E, CPII F, CPIII, CPIV e CPV), seguindo as diretrizes da NBR 14044, com intuito de traçar o perfil ambiental destes cimentos. O cimento Portland é composto por clínquer, sulfato de cálcio e adições minerais, que podem variar sua quantidade dentro de uma determinada faixa como especificado na NBR 16697, gerando uma alta variabilidade quanto à composição. Considerando isto, realizou-se uma análise probabilística, utilizando a simulação de Monte Carlo e comparando diversos cenários com as possíveis composições de um mesmo tipo de cimento. O trabalho ainda levou em consideração a definição de resíduo e subproduto especificada pela diretiva 98 da União Europeia para as adições minerais consideradas. Alocou-se impactos à produção das adições através de relações físicas, econômicas. Para realizar o estudo foi utilizado o *Software OpenLCA* e os dados necessários foram obtidos através de relatórios da indústria nacional e da base de dados *Ecoinvent*. Para avaliar os impactos utilizou-se o método CML 2001 e são apresentados os resultados para 11 categorias de impacto. Os resultados mostraram que um mesmo tipo de cimento pode ter diferentes impactos potenciais associado a ele de acordo com sua composição, bem como que cimentos tradicionalmente considerados sustentáveis podem ter um alto impacto associado à sua produção. Observou-se, também, que há categorias de impactos extremamente sensíveis a pequenas variações na composição do cimento. Por fim, nota-se que o teor de adições influencia diretamente nos resultados. Alocando impactos através de relações físicas, o uso de adições é inviável devido ao alto impacto associado. Já relações econômicas expressam melhor o interesse na adição mineral utilizada, mas o resultado tende a variar de acordo com flutuações de mercado. Conclui-se que é necessária uma maior transparência da indústria quanto a composição do cimento e que os estudos de ACV devem levar em consideração a variabilidade associada a cada cimento, utilizando uma metodologia clara, de forma a auxiliar a tomada de decisões na engenharia quanto à composição do cimento.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Cimento. Simulação de Monte Carlo. Alocação. Análise de incerteza. Análise de sensibilidade.

ABSTRACT

Many efforts have been made to make human-nature relations more sustainable in a number of sectors, among which civil construction stands out. For this sector, it is extremely important to use metrics to evaluate and compare the environmental performance of products, providing information that contributes to better decision making. Life cycle assessment (LCA) is the most used sustainability tool for this purpose, evaluating the environmental characteristics and potential impacts throughout the life cycle of a product. In this aspect, the following study evaluates the potential environmental impacts associated to the life cycle of the cements with higher production in Brazil (CPII Z, CPII E, CPII F, CPIII, CPIV and CPV) following the guidelines of NBR 14044, with the intention of map the environmental profile of these cements. Portland cement is composed of clinker, calcium sulphate and supplementary cementitious materials (SCM), which can vary their quantity within a certain range as specified in NBR 16697 generating a high variability in the cement composition. Considering this, a probabilistic analysis was performed using the Monte Carlo simulation, comparing several scenarios with the possible compositions of the same type of cement. The study also took into account the definition of waste and by-product specified by Directive 98 of the European Union for SCM under consideration. Impacts were allocated to SCM's through physic and economic relations. To carry out the study, *OpenLCA* Software was used and data were obtained through reports from the national industry and the *Ecoinvent* database. To evaluate the impacts, CML 2001 method was used and the results are presented for 11 impact categories. The results showed that the same type of cement can have different potential impacts according to its composition, as well as that traditionally sustainable cements can have a high impact associated with their production. Also, there are extremely sensitive categories to small variations in the cement composition. Furthermore, the selection of the allocation method directly influences the results. When allocating impacts through physical relations, the use of SCM is not viable due to the high impact associated, In contrast, economic relations express a better relation between the mineral addition and its market interest, but results may vary according to market fluctuations. In conclusion, greater transparency of cement composition is necessary and LCA studies should take into account the variability associated with each cement, using a clear methodology to assist the decision making in engineering regarding cement composition.

Keywords: Life Cycle Assessment. Cement. Monte Carlo Simulation. Allocation. Uncertainty Analysis. Sensitivity Analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Dia de sobrecarga da terra.....	12
FIGURA 2 - Emissões de GHG por setor econômico.....	14
FIGURA 3 - Fases de um estudo de ACV.....	20
FIGURA 4 - Diferentes escopos em ACV.....	22
FIGURA 5 - Etapas para levantamento de inventário.....	23
FIGURA 6 - Processo de fabricação do cimento.....	31
FIGURA 7 - Distribuição geográfica das adições minerais e indústrias cimenteiras...	38
FIGURA 8 - Emissão de CO ₂ por tonelada de clínquer no Brasil e no mundo.....	43
FIGURA 9 - Sistema de produto do cimento.....	46
FIGURA 10 - Sistema de produto do cimento CPIII dentro do software OpenLCA..	49
FIGURA 11 - Inserção dos parâmetros de variabilidade do cimento CPIII no software OpenLCA.....	55
FIGURA 12 - Desvio padrão dos cimentos CPII F e CPV.....	58
FIGURA 13 - Desvio padrão dos cimentos pozolânicos.....	59
FIGURA 14 - Desvio padrão dos cimentos de alto forno.....	60
FIGURA 15 - Impactos potenciais para as categorias de ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana.....	61
FIGURA 16 - Diferença dos impactos potenciais nos cenários com alocação para os cimentos pozolânicos em relação ao cenário sem alocação.....	63
FIGURA 17 - Diferença dos impactos potenciais nos cenários com alocação para os cimentos de alto forno em relação ao cenário sem alocação.....	64
FIGURA 18 - Impactos potenciais dos cimentos para a categoria de mudança climáticas.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Principais métodos de AICV.....	25
TABELA 2 - Critérios para avaliação dos dados em uma matriz Pedigree	29
TABELA 3 - Quantidade de clínquer e adições em cimentos europeus e brasileiros. Linhas de mesma coloração indicam cimentos de características similares.....	34
TABELA 4 - Tipos de cimento comerciais e sua composição	35
TABELA 5 - Principais categorias de impacto do método CML 2001 e unidades de medidas empregadas.....	50
TABELA 6 - Inventário para produção de 1 kg de clínquer.....	52
TABELA 7 - Inventário para produção de 1 kg de ferro gusa.....	53
TABELA 8 - Relações físicas e econômicas entre adições minerais e seus processos de origem.....	53
TABELA 9 - Impactos potenciais dos cimentos CPII-F e CPV pelo método CML 2001 com 10.000 iterações utilizando a simulação de Monte Carlo.....	56
TABELA 10 - Impactos potenciais dos cimentos CPII-Z, CPII-E, CPIII e CPIV pelo método CML 2001 com 10.000 iterações utilizando a simulação de Monte Carlo....	57

LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira da Cimento Portland
ABCV – Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida
AICV – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ARI – Alta Resistência Inicial
CEN – Comitê Europeu de Normalização
CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CML – *Institute of Environmental Sciences*
CNI – Confederação Nacional das Indústrias
CP – Cimento Portland
CSI – *Cement Sustainability Initiative*
DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral
EC – *European Commission*
EPD – *Environmental Product Declaration*
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FA – Fator de Alocação
GHG – *Greenhouse Gases*
GNR – *Getting Numbers Right*
GWP – *Global Warming Potencial*
ICV – Inventário de Ciclo de Vida
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
ISO – *International Standard Organization*
LEED- *Leadership in Energy and Environmental Design*
PNMC – Política Nacional de Mudança Climática
SCM – *Supplementary Cementitious Materials*
WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
2.3 Delineamento da pesquisa	16
3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	18
3.1 Histórico e Referencial Técnico	18
3.2 Definição	20
3.2.1 Objetivo e escopo	21
3.2.2 Inventário do ciclo de vida	22
3.2.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida	24
3.2.4. Interpretação dos resultados	27
3.3 Análise de Incertezas	27
4. CIMENTO	30
4.1 Processo de Fabricação	30
4.2 Tipos de Cimento	34
4.3 Adições Minerais	36
4.3.1 Escórias	39
4.3.2 Materiais Pozolânicos	40
4.3.3 Materiais Carbonáticos	41
4.4 Sustentabilidade no Setor	42
5. ACV APLICADA À PRODUÇÃO DO CIMENTO	45
5.1 Objetivo e Escopo	45
5.1.1 Sistema de produto e unidade funcional	45
5.1.2 Procedimentos de alocação	47
5.1.3 Metodologia de avaliação dos impactos	48
5.1.4 Análise de incertezas	50
5.1.5 Requisito de qualidade dos dados	51
5.2 Análise de Inventário	51
5.2.1 Levantamento de dados	51
5.2.2 Incerteza e variabilidade dos dados	54

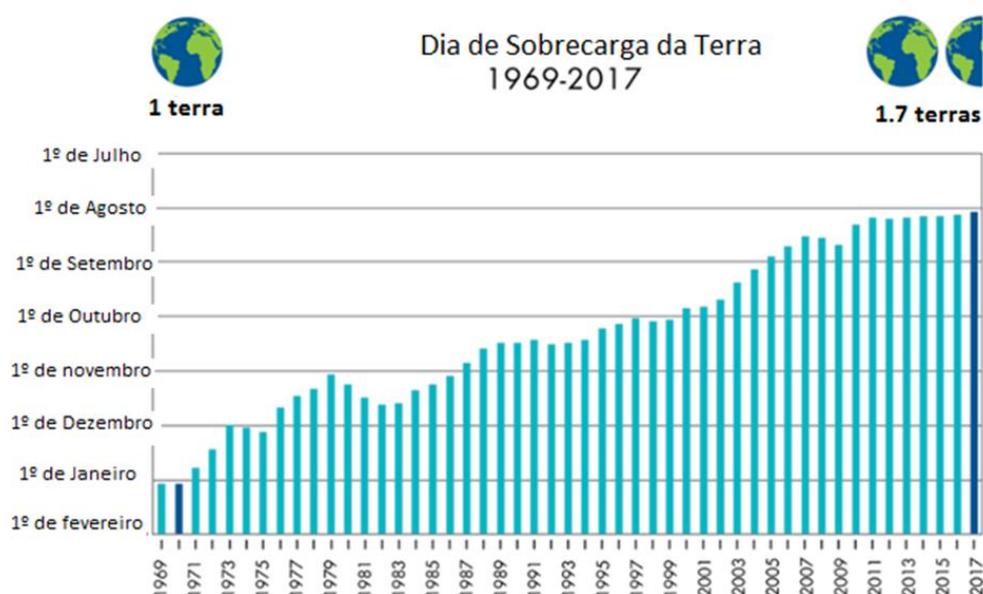
5.3 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida	55
5.4 Interpretação dos Resultados	58
5.4.1 – Variabilidade do cimento	58
5.4.2 – Diferença entre os cenários de alocação	62
5.4.3 – Potencial de Aquecimento Global	66
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1. INTRODUÇÃO

A revolução industrial, no século XIX, fomentou o desenvolvimento econômico, tecnológico e social; levando a um incremento populacional exponencial. Atualmente, o mundo conta com mais de 7 bilhões de habitantes, podendo atingir a marca de 9 bilhões em 2050 (BRYAN WALSH, 2011). Tamanho desenvolvimento em um curto espaço de tempo alterou completamente as relações entre o planeta e o homem.

Neste contexto, a organização internacional *'Global Footprint Network'* estima, anualmente, o dia de sobrecarga da Terra, data representativa de quando nossa demanda por recursos naturais extrapola tudo o que planeta pode gerar ao longo de um ano. A figura 1 apresenta as datas estimadas para o período 1969 - 2017. A partir do ano de 1971, a humanidade passou a consumir mais recursos do que a Terra pode oferecer, atualmente são consumidos 1,7 'Terras' por ano. Observa-se, assim, que o desenvolvimento alcançado nos últimos séculos é totalmente incompatível com a capacidade de nosso planeta (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2017).

FIGURA 1 – Dia de sobrecarga da terra



Fonte: Adaptado de Global Footprint Network (2017)

Boa parte da pegada ecológica está relacionada à pegada de carbono (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2016). Neste sentido, o painel intergovernamental de mudanças climáticas (IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change* – na sigla em inglês) é uma organização científico política que tem como objetivo sintetizar e divulgar o conhecimento em mudanças climáticas. No relatório '*Global Warming of 1,5 ° C*,' o IPCC alerta que apesar do aumento de políticas para diminuição de gases do efeito estufa (GHG: *Greenhouse Gases* - na sigla em inglês), a emissão destes aumentou 2,2% por ano de 2000 a 2010, sendo que o crescimento anterior era de 1,3% entre 1970 e 2000. A temperatura média da Terra aumentou 1,0 ° C quando comparada às temperaturas anteriores ao período da revolução industrial. Estima-se, ainda, que este aumento atingirá 1,5 ° C entre 2030 e 2052. O aquecimento gerado pela ação antrópica continuará impactando o meio ambiente por milênios e se faz necessárias novas medidas para mitigação de gases poluentes. (IPCC,2018).

Considerando as projeções do IPCC, nota-se que o desenvolvimento sustentável é uma necessidade imediata em todos os setores da sociedade. De acordo com o relatório de Brundtland (1987), o desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. Como destacado nos parágrafos acima, a ação antrópica já traz consequências catastróficas para o futuro. Desta forma, é necessário encontrar o equilíbrio ambiental, econômico e social nas ações de todos os âmbitos visando minimizar os efeitos adversos já causados, e amenizar as consequências para a gerações futuras.

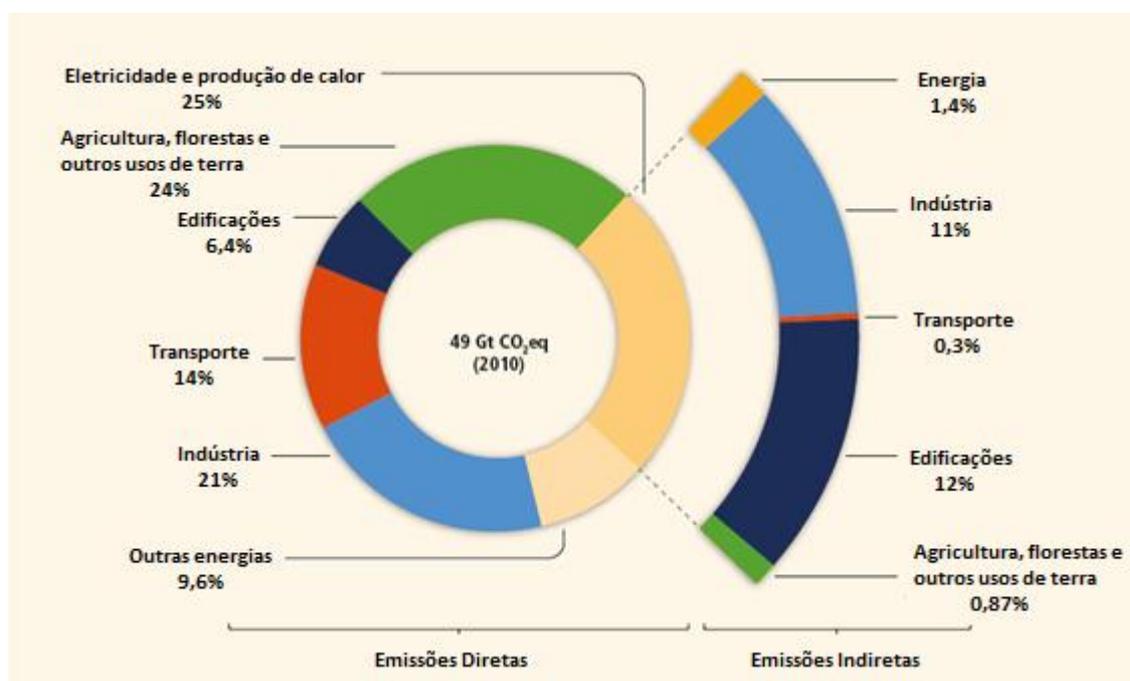
Como consequência deste cenário, o governo federal sancionou em 2009 a lei nº 12.187, onde estabelece a política nacional sobre mudança climática (PNMC), na qual o país adota um compromisso voluntário de mitigar as emissões de gases do efeito estufa entre 36,1% (1,168 Mt CO₂-eq) e 38,9% (1,259 Mt CO₂-eq) até o ano de 2020 (BRASIL,2009).

Neste aspecto, a construção civil tem um importante papel na mitigação de gases do efeito estufa. Estima-se que a construção e o uso de edificações foram responsáveis por 18,4% de todas as emissões de CO₂-eq no planeta, o que equivale

a mais de 9 Gt CO₂-eq, como mostra a figura 2 (IPCC, 2014). O cimento é um dos principais insumos da construção civil, sendo o principal constituinte do concreto que é o material industrializado mais consumido no planeta (WBCSD, 2009). Desta forma, percebe-se a importância de trabalhos que estudem formas de reduzir o impacto ambiental do cimento.

Devido ao elevado consumo de concreto e abundante disponibilidade de suas matérias primas, a indústria do cimento é altamente desenvolvida em praticamente todos os países (METHA E MONTEIRO, 2014). Na figura 2, as emissões deste setor são consideradas juntamente com a indústria em geral que representa 21% das emissões diretas de CO₂-eq (IPCC,2014).

FIGURA 2 – Emissões de GHG por setor econômico



Fonte: Adaptado de IPCC (2014)

Porém, existem outros impactos relacionados à produção do cimento que não devem ser negligenciados (WBCSD, 2009). Para sua correta avaliação, é necessária uma ferramenta que considere os impactos ambientais gerados em diferentes etapas de seu ciclo de vida. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) visa quantificar e interpretar os impactos ambientais associados a um determinado produto ao longo do seu ciclo

de vida. Em uma ACV é feita a compilação e avaliação das entradas e saídas e dos potenciais impactos ambientais de um produto (ABNT, 2009a).

Em 2012, o Brasil foi o quinto maior produtor de cimento no mundo, com um parque constituído de 79 unidades, sendo 51 fábricas e 28 unidades de moagem, responsáveis pela produção de 68,80 milhões de toneladas de cimento (CNI, 2012a; SNIC, 2013). O cimento Portland é constituído pela mistura de clínquer, sulfato de cálcio e adições minerais.

As adições minerais são matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland especificados pela NBR 16697 (ABNT,2018). Estas adições normalmente são subprodutos de outras indústrias, como a siderúrgica e termoelétrica. Do ponto de vista ambiental seu uso é considerado benéfico pela diminuição do teor de clínquer no cimento (METHA E MONTEIRO, 2014).

A quantidade de adições e de clínquer presente no cimento também é definida pela NBR 16697 (ABNT, 2018), a qual especifica a quantidade de cada constituinte através de faixas de variação em porcentagem, sendo que há cimentos em que um mesmo componente pode variar até 40% do seu percentual em massa (ABNT, 2018), gerando uma alta variabilidade associada à composição do cimento.

Neste contexto, este trabalho visa identificar os impactos potenciais associados à produção dos cimentos e suas adições minerais, utilizando a ACV como ferramenta. Ela será utilizada com o objetivo de levantar informações relevantes sobre o processo produtivo do cimento, traçando o perfil ambiental destes materiais, identificando os impactos potenciais associados, considerando a influência do uso de adições minerais e a variabilidade da composição do cimento por meio de uma análise probabilística.

2. DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do uso de adições minerais nos impactos ambientais potenciais associados aos cimentos de maior volume de produção no Brasil. Ainda, por meio de uma análise probabilística, avaliar a influência da variabilidade do teor de clínquer do cimento no seu comportamento ambiental.

2.2 Objetivos Específicos

a) quantificar os impactos da produção de cimento em 11 categorias de impacto para os seis tipos de cimento em estudo.

b) realizar análise probabilística por meio da simulação de Monte Carlo, avaliando diversos cenários para a composição do cimento.

c) avaliar os impactos ambientais potenciais das principais adições minerais utilizadas pela indústria do cimento brasileira (cinza volante, escória de alto forno, e filler calcário).

d) alocar impactos ambientais a adições que são subprodutos de outras indústrias.

2.3 Delineamento da pesquisa

Para a realização do trabalho, o mesmo foi dividido nas seguintes etapas:

- a) revisão bibliográfica;
- b) definição do objetivo e escopo;
- c) levantamento e adaptação de dados;
- d) avaliação do impacto do ciclo de vida;
- e) interpretação dos resultados;

f) considerações finais.

A revisão bibliográfica forneceu todo embasamento teórico utilizado para a realização da pesquisa, ela foi dividida em dois capítulos, onde no primeiro explicou-se como a avaliação do ciclo de vida é estruturada e os referenciais técnicos necessários, o segundo capítulo contempla informações sobre o cimento brasileiro, como seu processo produtivo, as adições minerais presentes e iniciativas de sustentabilidade da indústria.

As etapas b), c), d), e) referem-se à avaliação do ciclo de vida aplicada ao processo produtivo do cimento, estas etapas foram realizadas visando cumprir os objetivos elencados com o embasamento teórico adquirido na revisão bibliográfica. Vale ressaltar que a **metodologia** utilizada, **pressupostos** e **limitações** encontradas foram citadas durante o desenvolvimento destas etapas.

Na etapa b), foi delimitado o escopo do trabalho e refinado o seu objetivo, na etapa c) foram levantados os dados necessários para atingir o objetivo do trabalho, para tal, buscou-se o auxílio de base de dados internacionais e relatórios fornecido pela indústria nacional.

Na etapa d) é aplicada a metodologia da ACV, explicada na revisão bibliográfica para obtenção dos resultados, onde utilizou-se um software especializado em ACV (*OpenLCA*) e a simulação de Monte Carlo para análise probabilística. Com os resultados obtidos, na etapa e) eles foram discutidos e interpretados através de observações, gráficos e tabelas.

Por fim, a última etapa consiste nas considerações finais, onde foi feita uma análise crítica do trabalho, citando as dificuldades encontradas, a importância, a confiabilidade dos resultados e eventuais conclusões.

3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

3.1 Histórico e Referencial Técnico

A norma NBR ISO 14001 (ABNT, 2009b) versa sobre sistemas de gestão ambiental. De acordo com a norma é fundamental o equilíbrio entre o meio ambiente, a sociedade e a economia, onde o objetivo do desenvolvimento sustentável é obtido através do equilíbrio entre estes 3 pilares. Socialmente, as expectativas têm evoluído em relação ao desenvolvimento sustentável, nota-se um avanço na transparência dos sistemas de gestão por meio de uma legislação cada vez mais rigorosa. Neste aspecto, a tendência é que a sustentabilidade torne-se um dos principais fatores nos sistemas de gestão atuais devido às crescentes pressões sobre o meio ambiente.

A gestão ambiental é uma prática relativamente nova, os primeiros estudos de impacto ambiental surgiram por volta do fim dos anos 60 e início dos anos 70, mas o escopo destes estudos ainda era muito limitado, restringindo-se a análises energéticas (GUINÉE, 2012). Na década de 80, de forma lenta e gradual, surgiram estudos mais complexos que ampliaram o escopo e a metodologia utilizada (CURRAN, 2006). O período de 1970 a 1990 contemplou os anos de concepção da ACV, no entanto a metodologia precária, falta de discussões científicas e partilha de informações impediu o desenvolvimento e uso generalizado deste tipo de estudo (GUINÉE, 2012).

No fim dos anos 80 e início dos anos 90, a crise do petróleo e a preocupação com a geração de resíduos gerou uma demanda por estudos ambientais (CURRAN, 2006). A década de 1990 a 2000 foi caracterizada pela normatização dos estudos de ACV. Em 1993, a ISO (*International Organization for Standardization*) criou o comitê técnico TC 207, responsável por elaborar as normas ISO 14000, uma série de normas que estabeleceram as diretrizes para um sistema de gestão ambiental e desenvolvimento sustentável (BEBER, 2011).

Com base no trabalho desenvolvido pelo comitê TC 207, destacam-se as seguintes normas, que foram utilizadas como referencial técnico para este trabalho e

traduzidas pelo Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- a) NBR ISO14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura (ABNT, 2009a).
- b) NBR ISO 14044 ¹: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações (ABNT, 2009c).
- c) NBR ISO14045: Gestão Ambiental – Avaliação da Ecoeficiência de Sistemas de Produto - Princípios, Requisitos, e Orientações(ABNT, 2014a).
- d) NBR ISO14064 ²: Gases de Efeito Estufa (ABNT, 2007)
- e) NBR ISO/TS 14067: Gases de Efeito Estufa – Pegada de Carbono de Produtos – Requisitos e Orientações sobre quantificação e comunicação (ABNT, 2015a).

Além das normas desenvolvidas, neste período também surgiram os primeiros métodos de avaliação do impacto ambiental, responsáveis por padronizar os resultados obtidos em diferentes estudos de ACV (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015).

No início do século XXI, a consolidação normativa da ACV juntamente com uma crescente conscientização ambiental, aumentaram os estudos de ACV exponencialmente (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015). No contexto nacional, o Comitê brasileiro de gestão ambiental apoiou a criação da Associação Brasileira do Ciclo de Vida (ABCV) criada em 2002 que tem, desde então, como objetivo difundir a ACV no país (BARBOSA JÚNIOR et al., 2008). A quantidade de estudos nesta linha no Brasil ainda são tímidos quando comparados com a Europa, no entanto há um claro aumento no número de publicações na última década, além de congressos nacionais e criação de novos grupos de pesquisa na área (ZANGHELINI et al., 2014).

¹ As normas ISO 14041, 14042 e 14043 são contempladas pela NBR ISO 14044

² A NBR 14064 contempla 3 partes que englobam a elaboração de relatórios, validação e verificação de declarações e melhoria das remoções de gases do efeito estufa.

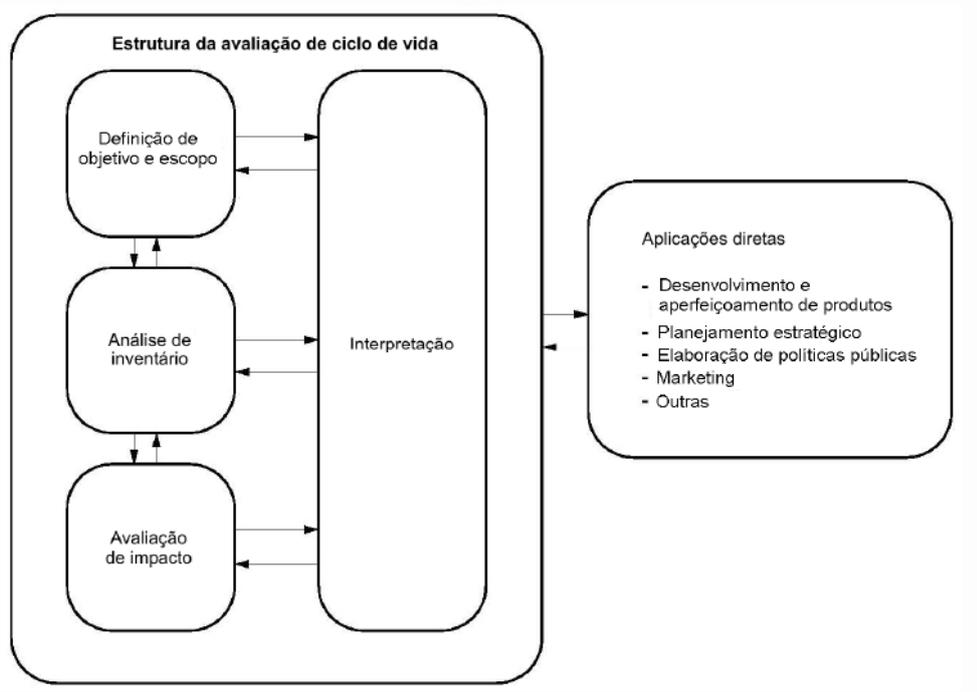
3.2 Definição

A ACV é uma ferramenta de **gestão ambiental** que visa quantificar e interpretar os **impactos ambientais** associados a um determinado produto ao longo do seu **ciclo de vida**. Em uma ACV é feita a compilação e avaliação das entradas e saídas e dos potenciais impactos ambientais de um produto, através do seu ciclo de vida (ABNT, 2009a).

De acordo com a NBR 14040, um estudo de ACV é dividido em quatro fases, sendo elas:

- 1 - Definição de objetivo e escopo;
- 2- Análise de inventário (ICV);
- 3- Avaliação de impactos (AICV);
- 4- Interpretação.

FIGURA 3 - Fases de um estudo de ACV



Fonte:(ABNT, 2009c)

3.2.1 Objetivo e escopo

Na primeira fase de uma ACV, deve ser esclarecido o **objetivo** do estudo de forma clara e consistente, e definido o **escopo**, onde determina-se o nível de detalhamento da pesquisa (ABNT, 2009a).

No **objetivo** deve-se constar a aplicação pretendida, as razões para execução do estudo, o público alvo do estudo e as pretensões comparativas dos resultados obtidos (ABNT, 2009c).

Já no **escopo** do trabalho devem constar o sistema de produto, a unidade funcional, os procedimentos de alocação, a metodologia para AICV, o requisito da qualidade dos dados e as limitações do estudo (ABNT, 2009c).

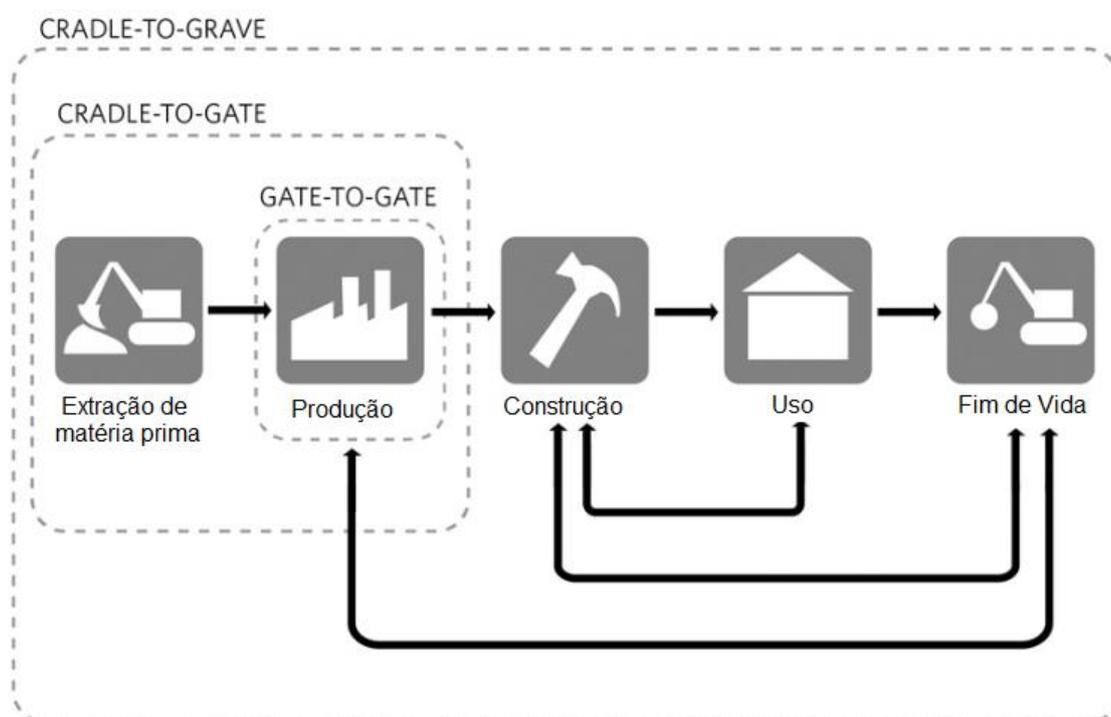
O **Sistema de produto** é o conjunto de processos elementares que modela o ciclo de vida de determinado produto, normalmente representado de forma gráfica, onde determina-se a fronteira do sistema que delimita quais processos fazem parte do estudo, o que é essencial para o grau de confiabilidade que o estudo busca abranger (ABNT, 2009a). Há três abordagens para modelar um sistema de produto, que podem ser do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) onde se analisa todo ciclo de vida do produto desde da extração da matéria prima até seu descarte, do berço ao portão (*cradle-to-gate*) onde avalia-se o ciclo de vida do produto até a porta da indústria, excluindo a fase de uso e fim de vida, e do portão ao portão (*gate-to-gate*) onde se analisa apenas o processo produtivo dos elementos em estudo (FELLER, 2014). Estas modelagens podem ser observadas graficamente na figura 4.

A **unidade funcional** tem como objetivo estabelecer uma referência para cálculo dos dados de inventário de um determinado estudo, assegurando a comparabilidade do estudo realizado com demais estudos na área (ABNT, 2009c).

Cabe destacar que, durante o cálculo do inventário, **procedimentos de alocação** podem ser utilizados quando há processos que geram mais que um produto de interesse, os chamados processos multifuncionais. A alocação visam subdividir os impactos destes processos aos seus diferentes produtos. A determinação das regras de alocação deve ser realizada na fase de objetivo e escopo (ABNT, 2009c).

Na definição da **metodologia para AICV** devem constar as categorias de impacto e seus indicadores que serão analisadas, bem como o método escolhido para o cálculo destas categorias (ABNT, 2009c). Por fim é necessário especificar as **limitações** da pesquisa devido às considerações realizadas ao longo das demais etapas (ABNT, 2009a).

FIGURA 4 - Diferentes escopos em ACV



Fonte: Adaptado de (FELLER, 2014)

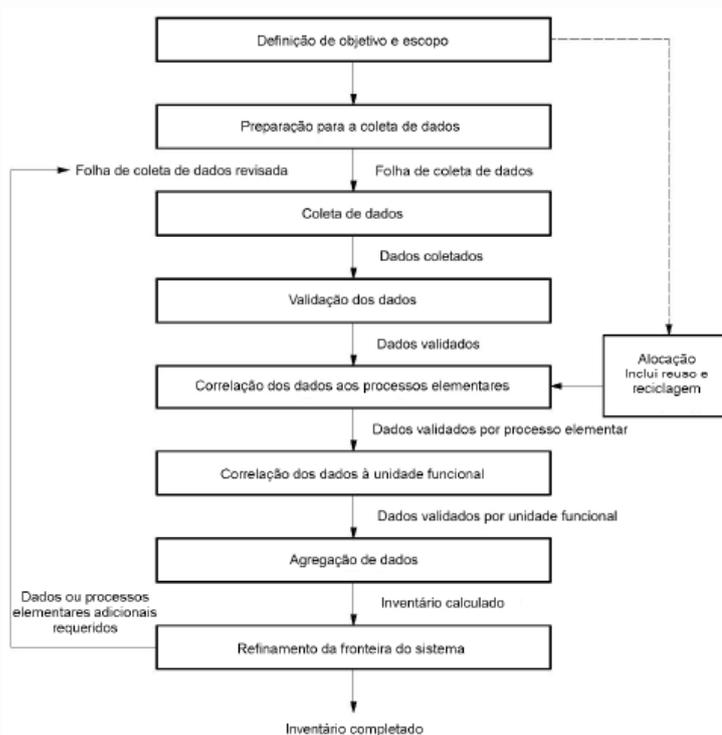
3.2.2 Inventário do ciclo de vida

A definição do objetivo e escopo do trabalho provê as condições para o início da segunda fase de um estudo de ACV onde realiza-se a análise do **inventário do ciclo de vida** (ICV). Esta etapa envolve a **coleta dos dados** necessários para a pesquisa, compilados em um conjunto de entradas e saídas do sistema de produto em estudo (ABNT, 2009a).

De acordo com a NBR 14044 (ABNT, 2009c), a **qualidade dos dados** adotados deve contemplar cobertura temporal, geográfica e tecnológica, a representatividade, incerteza e reprodutibilidade do dado. Ainda, de acordo com a ISO 14067 (ABNT, 2015a), os dados coletados podem ser classificados como dados primários ou secundários. **Dados primários** são quantificados através de medição direta ou com um cálculo baseado nessas medições. **Dados secundários** são dados obtidos por outras fontes como banco de dados ou literatura publicada e validada por autoridades competentes.

Todos processos elementares que fazem parte do sistema de produto devem ter seus dados de entrada e saída levantados. O processo de levantamento de dados é iterativo, pois a medida que se estuda um sistema, novos requisitos ou limitações podem aparecer. A figura 5 estabelece o correto procedimento para o levantamento de dados, que incluem a coleta de dados propriamente dita, a validação dos dados coletados, a correlação da informação levantada com os processos elementares em estudo, a correlação dos dados com a unidade funcional do sistema, e pôr fim a compilação dos dados e refinamento da fronteira do sistema (ABNT, 2009c).

Figura 5 - Etapas para levantamento de inventário



Fonte: (ABNT, 2009c)

Como citado na seção anterior, para processos que geram mais que um produto de interesse, podem ser aplicados procedimentos de **alocação**, os quais visam subdividir os impactos associados a um processo multifuncional entre seus diversos produtos criados. A NBR 14044 (ABNT, 2009c) declara que a alocação deve ser evitada sempre que possível através da subdivisão dos processos elementares multifuncionais em dois ou mais processos ou através da expansão do sistema de produto de forma a incluir funções adicionais relacionadas aos coprodutos. Quando não for possível realizar estes procedimentos, a norma recomenda que a alocação seja realizada através de relações físicas e quando não for possível estabelecer estas relações, a alocação deve ser realizada através de relações econômicas. Ainda, quando mais de um método de alocação pode ser aplicável, uma análise de sensibilidade deve ser realizada para ilustrar as consequências das diferentes alternativas (ABNT, 2009).

3.2.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida

A terceira fase é a **avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV)**, onde utiliza-se métodos de análise com base no ICV levantado, quantificando os impactos associados ao sistema em estudo (ABNT, 2009a).

A AICV deve ser cuidadosamente planejada a fim de satisfazer os objetivos do estudo. Nesta fase são calculados os impactos associados ao ciclo de vida nas **categorias de impactos** definidas no escopo. De acordo com NBR ISO 14044 (ABNT, 2009c):

“A seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização deve ser justificada e consistente com o objetivo e escopo da ACV.

A seleção de categorias de impacto deve refletir um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas ao sistema de produto em estudo, levando em consideração o objetivo e escopo.”

A NBR ISO 14044 elenca os procedimentos adequados para correlação e modelagem dos resultados apropriados do ICV e recomenda que se utilizem métodos e categorias de impacto aceitos internacionalmente.

Os primeiros métodos de avaliação de impactos surgiram há 30 anos, atualmente existem diversos métodos desenvolvidos e consagrados em estudos de ACV que contemplam diferentes categorias de impacto, cabe a escolha adequada do pesquisador ao método que melhor se encaixe na linha de estudo (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015). Da mesma forma, não existe metodologia predefinida para escolher as categorias de impacto que serão analisadas, cabe ao autor escolhas que melhor representem seus resultados dentro de padrões aceitos internacionalmente (STRANDDORF et al., 2005). A tabela 1, produzida por Hischier et al. (2010) traz os principais métodos empregados e suas publicações de referência.

TABELA 1 – Principais métodos de AICV

Método	Publicação
CML 2001	Guinée et al. 2001
Demanda Acumulada de Energia (CED)	<i>Own Concept</i>
Demanda Acumulada de Exergia (CExD)	Boesch et al. 2007
Eco-indicator 99	Goedkoop & Spriensmaa. 2000
Pegada Ecológica	Huijbregts et al. 2006
Escassez Ecológica 1997	Brand et al. 1998
Escassez Ecológica 2006	Frischknecht et al. 2009
Dano Potencial Ecológico (EDP)	Köllner & Scholz. 2007
Design Ambiental de Produtos Industriais 1997 (EDIP)	Hauschild & Wenzel. 1997
Design Ambiental de Produtos Industriais 2003 (EDIP)	Hauschild & Potting. 2005
Estratégias de prioridade ambiental (EPS)	Steen. 1999
IMPACT 2002+	Jolliet et al. 2003
IPCC 2001 (Aquecimento Global)	Albritton & Meira-Filho 2001; IPCC 2001
IPCC 2007 (Aquecimento Global)	IPCC 2017
ReciPe (Abordagem com pontos médios e finais)	Goedkoop et al. 2009
TRACI	Bare 2004; Bare J. C. et al. 2007
USEtox	Rosenbaum et al. 2008
Indicadores Selecionados LCI	<i>Ecoinvent final reports</i>

Fonte: Adaptado de Hischier et al., (2010)

Entre os métodos citados na figura, pode-se destacar o **CML 2001** e o **IPCC 2007**. O método IPCC é o mais utilizado em análises de ACV, e baseia-se no cálculo das emissões de gases poluentes com base no seu potencial de mudança climática (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015). Ele mede os impactos na categoria de **mudança climática** ou **potencial de aquecimento global** (GWP: *Global Warming Potential* – em inglês) que estima a contribuição para o aquecimento global em kg CO₂-eq que as emissões atmosféricas geram (HISCHIER et al., 2010). O método CML desenvolvido

em 2001 por um grupo de pesquisadores do centro de ciências ambientais da universidade de Leiden, consiste em um conjunto de categorias de impacto (HISCHIER et al., 2010).

As categorias referentes à **acidificação** versam sobre o potencial de acidificação terrestre ou aquático, frente à emissão de óxidos de nitrogênio e enxofre. Em ambientes terrestres, a acidificação impede o crescimento adequado de florestas ocasionando desequilíbrios ambientais. Em ambientes aquáticos, esta impede o desenvolvimento adequado de diversas espécies além de impossibilitar o uso da água para consumo. Já a **eutrofização** refere-se à contaminação de corpos d'água e solo pelo excesso de nutrientes devido a emissões de nitrogênio e fósforo (STRANDDORF et al., 2005).

As categorias de **ecotoxicidade e toxicidade humana** tratam dos efeitos agudos e crônicos da toxicidade devido a substâncias químicas em diferentes espécies no solo, na água e no ar, levando em consideração o destino das substâncias químicas como sua biodegradabilidade, potencial de acumulação e contaminação (STRANDDORF et al., 2005). Já a categoria **uso de terra**, leva em consideração o uso do solo pela indústria, agricultura, mineração e construção, visando quantificar os impactos na biodiversidade local e na qualidade do solo (MILÀ I CANALS et al., 2007).

A **oxidação fotoquímica** ocorre através de reações de óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis e luz solar, gerando reações complexas que resultam na produção de ozônio. Essa reação produz uma fumaça chamada de '*summer fog*' ou '*smog*', comum em grandes cidades, prejudicando a vegetação local e podendo causar problemas respiratórios (STRANDDORF et al., 2005).

A **depleção do recurso abióticos** refere-se aos impactos associados à utilização de recursos ao longo de todo ciclo de vida do produto como água, metais, carvão, entre outros. Já a categoria **depleção da camada de ozônio** versa sobre o potencial de diminuição da camada de ozônio através da emissão de gases como metano, óxido de nitrogênio entre outros gases comumente associados à depleção desta camada (STRANDDORF et al., 2005).

3.2.4. Interpretação dos resultados

Como exemplificado na figura 3, a **interpretação dos resultados** é um processo iterativo, que deve acontecer simultaneamente às demais etapas, onde os resultados são discutidos a fim de apontar questões significativas, alcançar conclusões, recomendações, limitações e suporte para tomadas de decisões (ABNT, 2009a).

Deve-se, também, analisar como as escolhas metodológicas influem no resultado obtido, como por exemplo, as regras de alocação e a fronteira do sistema. É essencial também a realização de verificações para estabelecer o grau de certeza e a confiabilidade dos resultados, garantindo que todas informações relevantes estejam disponíveis e comparando ou justificando o estudo com base em outras pesquisas ou parecer de especialistas (ABNT, 2009c).

3.3 Análise de Incertezas

De acordo com a NBR 14044 (ABNT, 2009c), a análise de incertezas é um procedimento sistemático que visa quantificar a incerteza introduzida nos resultados de uma análise de inventário pelos efeitos cumulativos da imprecisão dos modelos, incerteza das entradas e variabilidade dos dados. Esta incerteza pode ser expressada em distribuições de probabilidade e/ou faixas de probabilidade.

O resultado de uma ACV quando analisado de forma singular pode levar a conclusões falsas ou limitadas devido a uma série de possibilidades ignoradas. Uma análise de incerteza levando em consideração opções de modelagem, a qualidade e variabilidade dos dados, aumenta a confiabilidade de um estudo de ACV (BJÖRKLUND, 2002).

A incerteza pode ocorrer por imprecisões na medição dos dados, dados incompletos ou falsos, decisões de modelagem como a fronteira do sistema ou procedimentos de alocação, além da variabilidade natural dos sistemas em estudo. O principal método utilizado para realizar a análise de incerteza nos estudo de ACV é a **simulação de Monte Carlo** (GROEN et al., 2014).

Esta simulação consiste em estabelecer dados de saída baseando-se em um domínio pré-estabelecido através de funções de probabilidade dos dados de entrada. Em cada interação, o modelo utiliza amostras aleatórias do domínio de entrada e calcula os valores de saída através do modelo computacional adotado. O processo é repetido diversas vezes até obtenção de resultados suficientemente relevantes. Para aplicar o método é preciso conhecer a distribuição probabilística dos parâmetros de entrada (ex: distribuição normal, distribuição uniforme), seu valor central (ex: média) e sua dispersão (ex: desvio padrão) (GROEN et al., 2014; HELTON et al., 2006; HONGXIANG; WEI, 2013). Como vantagem, os resultados obtidos pelo método podem ser estatisticamente comparados pelos valores de média e dispersão, no entanto o método exige bastante capacidade computacional (GROEN et al., 2014)

A distribuição probabilística dos dados pode ser estimada pela matriz de Pedigree. A matriz é um método onde o autor do dado converte indicadores de qualidade em parâmetros estatísticos levando em consideração confiabilidade, completude, correlação temporal, geográfica e tecnológica. As incertezas calculadas são associadas aos dados através de uma distribuição log-normal (WEIDEMA et al., 2013). A tabela 2 traz uma matriz como exemplo evidenciando os critérios para quantificação da qualidade dos dados.

TABELA 2 – Critérios para avaliação dos dados em uma matriz *Pedigree*

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5 (padrão)
Confiabilidade	Dados verificados baseados em medições	Dados verificados parcialmente baseados em hipótese OU dados não verificados baseados em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativas qualificadas (Ex.: por um perito industrial)	Estimativas não qualificadas
Compleitude	Dados representativos de todos os pontos relevantes do mercado em questão, mais e nível adequado para nivelar flutuações normais	Dados representativos de >50% dos pontos relevantes do mercado em questão, mais e nível adequado para nivelar flutuações normais	Dados representativos de alguns dos pontos relevantes do mercado em questão (>>50%), OU >50% dos pontos, mas de períodos curtos	Dados representativos de apenas um dos pontos relevantes do mercado em questão (>>50%), OU de alguns dos pontos, mas de períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de poucos pontos E de períodos curtos
Correlação temporal	< 3 anos de diferença para o período de tempo do conjunto de dados	< 6 anos de diferença para o período de tempo do conjunto de dados	< 10 anos de diferença para o período de tempo do conjunto de dados	< 15 anos de diferença para o período de tempo do conjunto de dados	Idade dos dados desconhecida ou > 15 anos de diferença para o período de tempo do conjunto de dados
Correlação geográfica	Dados da área de estudo	Dados médios de uma área maior onde está incluída a área de estudo	Dados de uma área com condições de produção similares	Dados de uma área com condições de produção pouco similares	Dados de área desconhecida OU de áreas com condições de produção muito distintas
Correlação tecnológica	Dados de empresas, processos e materiais sob estudo	Dados de processos e materiais sob estudo (mesma tecnologia), mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais sob estudo, mas de tecnologias diferentes	Dados de processos e materiais relativos	Dados de processos relativos em escala laboratorial OU de tecnologias diferentes

Fonte: (RODRIGUES,2015)

4. CIMENTO

Aglomerantes hidráulicos são aqueles que endurecem através de reações na presença de água, formando um produto resistente à água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O principal aglomerante hidráulico utilizado para fins estruturais no mundo é o cimento Portland, de acordo com Mehta e Monteiro (2014) este material é obtido a partir da moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e a partir de 5% de calcário como adição na moagem. Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado que é produzido pela calcinação e fusão de um material constituído aproximadamente de 94% de calcário, 4% de argilas e 2% de óxidos de ferro e alumínio em um forno rotativo operando em temperaturas de 1450°C (ROCHA et. Al, 2011).

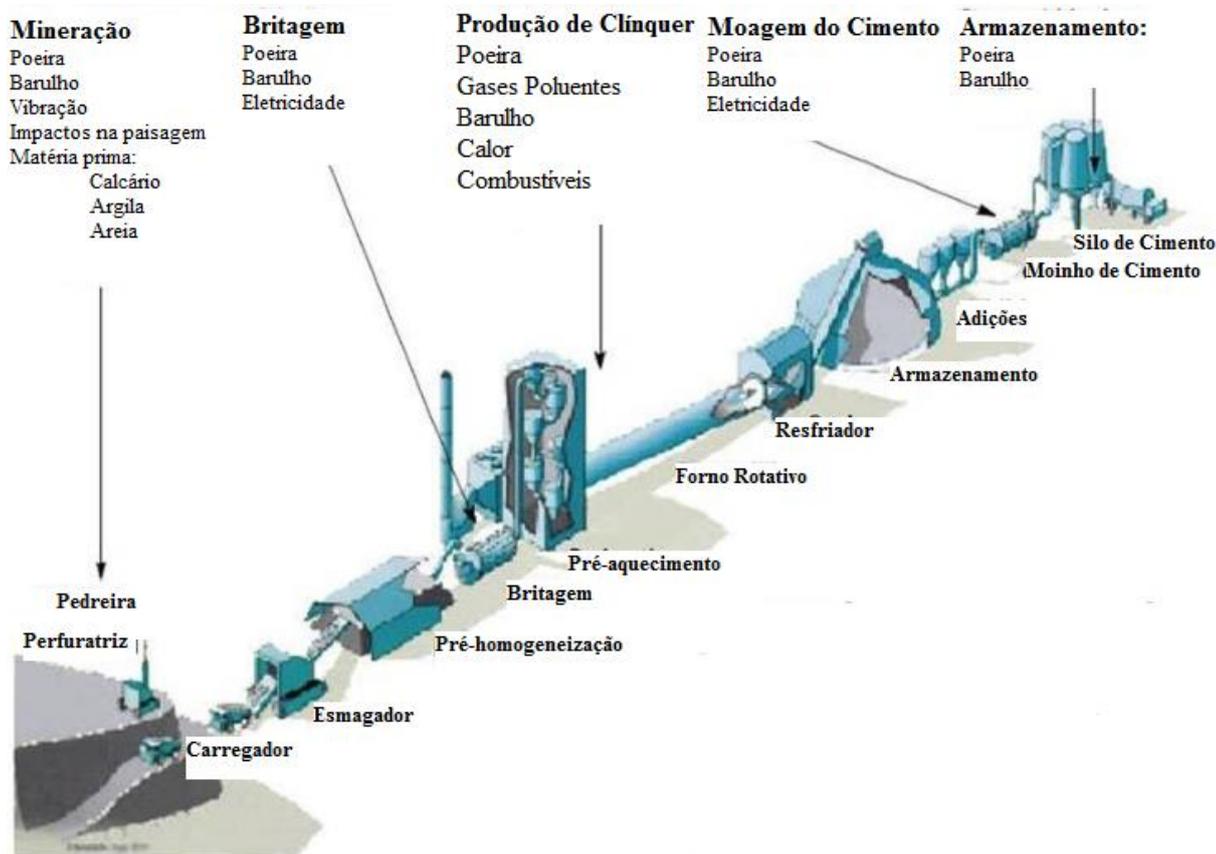
A composição do cimento Portland, requisitos físicos, mecânicos e químicos são definidos pelas norma NBR 16697 (ABNT, 2018) que foi desenvolvida pelo Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT/ CB-018) e substituiu uma série de normas que estabelecia estes requisitos.

O cimento é o insumo mais utilizado atualmente na construção civil, sua principal aplicação é como matéria prima para produção de concretos, que é o segundo produto mais consumido no mundo depois da água (WBCSD, 2009). Devido ao seu amplo uso e abundância de suas matérias primas, este material é produzido praticamente em todos os países (WORRELL et al., 2001).

4.1 Processo de Fabricação

A indústria de cimento caracteriza-se por uma complexa cadeia produtiva com alta demanda energética (CNI, 2010). O processo esquemático da fabricação do cimento junto com alguns impactos em sua cadeia produtiva, pode ser observado na figura 6.

FIGURA 6 - Processo de fabricação do cimento



Fonte: Adaptado de WBCSD, (2002)

A primeira etapa de fabricação do cimento consiste na **extração de matérias primas**. O cimento é formado primariamente por silicatos de cálcio, assim são necessários materiais que forneçam a proporção adequada de cálcio e sílica para formação dos compostos. Comumente são utilizados calcário e argila na proporção de 80% e 20%, respectivamente. No entanto, diferentes proporções ou materiais, como minerais de ferro e alumínio podem ser utilizados de acordo com a composição química dos produtos disponíveis. Como o calcário é o material mais utilizado, as fábricas de cimento, usualmente, instalam-se próximas às jazidas de calcário, visando otimizar a produção e diminuir os gastos com o transporte nesta etapa (CNI, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A segunda etapa corresponde à **britagem** do calcário, o qual é diminuído a dimensões adequadas ao processamento industrial, reduzindo assim suas impurezas.

A seguir, a argila e o calcário são depositadas separadamente e **pré-homogeneizados**, nessa etapa são realizados os ensaios necessários para averiguar a qualidade do material.

O calcário e a argila então são misturados na fase de **dosagem**. A mistura resultante recebe o nome de **cru** sendo que próxima etapa corresponde à **moagem do cru**, que ocorre em um moinho, o qual diminui o tamanho das partículas para aproximadamente 0,05 mm (CNI, 2010)

A farinha crua é então estocada em grande **silos de homogeneização** onde garante-se a uniformidade da farinha através de processos pneumáticos e por gravidade. A homogeneização antes da mistura passar por um tratamento térmico é fundamental para garantir que o clínquer que será formado tenha os compostos desejados para garantir suas características cimentícias (CNI, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Todo o processamento descrito acima pode ocorrer de duas formas, por via seca ou via úmida. O processo via seca ocorre com um baixo teor de umidade, enquanto na via úmida as matérias-primas são preparadas e homogeneizadas com água, formando uma espécie de lama, antes de serem aquecida no forno onde ocorrerá a **clinkerização**. O processo via úmida permite um maior controle sobre as reações que ocorrerão durante esta fase, no entanto requer uma maior demanda energética, estima-se que o processo por via seca diminua em até 50% o uso de combustíveis na fase de clinkerização (CNI, 2012a). No Brasil, mais de 98% da produção ocorre por via seca devido à eficiência energética do processo (CNI, 2010).

Na fase **clinkerização**, a farinha é introduzida no **forno rotativo**, passando antes por **pré-aquecedores**, equipamentos que aproveitam o calor gerado pelo forno para começar o aquecimento da mistura. Os fornos rotativos são grandes cilindros que variam de 50 a 150 metros de comprimento com 6 metros de diâmetro e que atingem temperaturas de até 1500 °C no seu interior. O material submetido a estas altas temperaturas sofre uma série de reações que mudam suas características químicas e físicas, formando o clínquer (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As reações consistem basicamente em converter óxidos de cálcio e silício em silicatos de cálcio. Nesta etapa ocorre o processo de **calcinação** representado pela seguinte reação:



A calcinação ocorre quando o carbonato de cálcio atinge uma temperatura de 900°C liberando CO₂ e óxido de cálcio que será futuramente transformado em silicato de cálcio (CNI, 2010). Esta reação é a principal responsável pela liberação de CO₂ na atmosfera, estima-se que 52% do CO₂ emitido pelo cimento, ocorra nesta fase (WORRELL et al., 2001).

Ao sair do forno, o clínquer é resfriado bruscamente e depositado em um silo, são então adicionadas as demais matérias primas do cimento, o sulfato de cálcio, na forma de gipsita ou anidrita e as adições minerais, dependendo o tipo de cimento a ser produzido. A mistura é introduzida no **moinho de cimento**, onde há significativo consumo de energia elétrica, resultando no cimento tal como o conhecemos (CNI, 2010). O cimento então é estocado e são realizados os ensaios para determinação dos requisitos exigidos pelas normas técnicas. Por fim, o cimento é ensacado e distribuído.

O sulfato de cálcio adicionado ao cimento visa aumentar o tempo de pega durante a hidratação do cimento. No Brasil, toda produção deste material ocorre na região nordeste, sendo o estado de Pernambuco o maior produtor brasileiro, (LINHALES, 2004 *apud* CANUT, 2006). A indústria cimenteira utiliza 43% do sulfato de cálcio produzido no país. Como alternativa à utilização deste material, algumas fábricas cimenteiras da região Sul e Sudeste utilizam o fosfogesso (CANUT, 2006).

O **fosfogesso** é um resíduo da produção de fertilizantes, que apresenta características físico químicas similares ao sulfato de cálcio. Estima-se que o Brasil gera 5,6 Mt de fosfogesso (DE ARAUJO; FERNANDES, 2013) das quais a indústria cimenteira utiliza cerca de 1,7 Mt (CANUT, 2006). A utilização deste material diminui os gastos com transporte do sulfato de cálcio e apresenta um aspecto ambiental positivo pela utilização de um resíduo que seria descartado.

4.2 Tipos de Cimento

Cada país tem sua própria regulamentação quanto à composição do cimento. Para países da União Europeia, por exemplo, a composição do cimento é especificada pela norma EN 197 (CEN, 2000). Esta norma prevê mais tipos de cimentos comerciais e diferentes tipos de adição do que a norma brasileira. A tabela 3 compara alguns cimentos europeus com cimentos brasileiros equivalentes (mesmo tipo de adição). Nota-se que a maioria dos cimentos brasileiros tem em média menos clínquer e maior teor de adição do que os cimentos europeus.

TABELA 3 – Quantidade de clínquer e adições em cimentos europeus e brasileiros. Linhas de mesma coloração indicam cimentos de características similares.

Tipo de Cimento	Quantidade de Clínquer		Quantidade de Adições	
	% possível	Valor médio	% possível	Valor médio
Cimentos Europeus				
CEM I	95-100	97,5%	0-5	2,5%
CEM II/A-M	80-94	87,0%	06-20	13,0%
CEM II/B-M	65-79	72,0%	21-35	28,0%
CEM II/A-L	80-94	87,0%	06-20	13,0%
CEM III/A	35-64	49,5%	36-65	50,5%
CEM IV/A	65-89	77,0%	11-35	23,0%
Cimentos Brasileiros				
CP I	95-100	97,5%	0-5	2,5%
CP II-Z	71-94	82,5%	6 - 29	17,5%
CP II-E	51-94	72,5%	6 - 49	27,5%
CP II-F	75-89	82,0%	11 - 25	18,0%
CP III	25-65	45,0%	35 - 85	60,0%
CP IV	45-85	65,0%	15 - 65	40,0%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em EN 197 (CEN, 2000), NBR 16697 (ABNT, 2018)

A norma NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece os tipos de cimento comerciais brasileiros, onde especifica-se a quantidade de clínquer, sulfato de cálcio e adições minerais que cada um deve conter através de faixas de variação em massa de cada componente, como descrito na tabela 4. Uma das principais mudanças em relação ao que era normatizado anteriormente é a permissão de um maior percentual de adições minerais no cimento.

TABELA 4 - Tipos de cimentos comerciais e sua composição

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB		75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural			–	–	–	26 – 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: (ABNT, 2018)

Existem ao todo 10 cimentos comerciais que variam de acordo com seu uso e composição. Cada tipo de cimento estrutural deve especificar sua classe de resistência, que indica o valor da resistência à compressão obtido por meio de ensaio realizado seguindo as especificações da NBR 7215 (ABNT, 1996). O sufixo de cada cimento refere-se à sua resistência a sulfatos (RS) e ao seu baixo calor de hidratação (BC) de acordo com os requisitos especificados na NBR 16697 (ABNT, 2018).

O cimento CP I é o cimento mais puro, comumente, sua composição inclui apenas clínquer moído e sulfato de cálcio. No entanto, este cimento é comercializado em baixas quantidades no país. Em 2013, sua produção representou apenas 0,4% do cimento produzido no Brasil (SNIC, 2013). Os demais cimentos são denominados Cimentos Portland compostos devido às adições minerais neles presentes.

Os Cimentos CII são os mais consumidos no país e representam 62,1% da produção nacional (SNIC, 2013). Há três tipos diferentes deste cimento (CP II-E, CII-Z e CII-F), onde variam seu teor de clínquer e o tipo de adição mineral utilizada.

Os Cimentos CPIII e CPIV têm o maior teor de adições minerais na sua composição e representam 14,15% e 14,80% da produção nacional, respectivamente (SNIC, 2013). São chamados de cimentos lentos, por possuírem menor calor de hidratação e desenvolvem sua resistência lentamente. O CPIII tem a escória de alto forno como adição e é utilizado, principalmente na região Sudeste, devido à disponibilidade local da escória. O CP IV tem materiais pozolânicos como adição e é utilizado principalmente nas regiões Sul e Nordeste.

O cimento CP V, também denominado cimento de alta resistência inicial (ARI), representa 8,5% da produção nacional e possui apenas materiais carbonáticos como adição. O clínquer utilizado na sua composição recebe uma moagem mais fina de modo que reagindo com a água ele adquire elevadas resistências com maior velocidade. Seu uso é empregado principalmente em pré-moldados e obras de rápida desforma (CNI, 2010).

Como observa-se na tabela 4, a norma não especifica a quantidade exata de cada constituinte do cimento e sim uma faixa de variação onde cada constituinte deve se encontrar. A existência dessas faixas é uma necessidade prática, pois a indústria cimenteira não controla o volume de oferta, tampouco a composição química das adições. Quando a demanda por cimento aumenta no mercado, e as indústrias de energia e aço não acompanham o crescimento, há proporcionalmente menos adições disponíveis (OLIVEIRA et al., 2014) .

Estas situações geram alta variabilidade quanto à composição do cimento. O cimento CPIII por exemplo, pode ter uma variação de 40% no seu teor de clínquer, enquanto o CPIV pode ter uma variação de 35% no teor de material pozolânico. Uma das motivações do trabalho é compreender como essa variabilidade influencia no perfil ambiental de determinado cimento.

4.3 Adições Minerais

A substituição parcial do clínquer por adições minerais é considerada benéfica do ponto de vista ambiental e se tornou uma prática comum na indústria cimenteira

mundial (VAN DEN HEEDE; DE BELIE, 2012). Neste contexto, o Brasil se destaca pelo alto grau de substituição utilizado, devido à grande disponibilidade destes materiais, aliado à legislação favorável (SAADE; SILVA; GOMES, 2015).

Tradicionalmente, em ACVs de cimento, o impacto associado à produção das adições minerais do cimento era desprezado, por estas serem consideradas **resíduos** de outras indústrias (CHEN et al., 2010). No entanto, em 2008, a União Europeia lançou a resolução '*Directive 2008/98/EC*' (EUROPEAN COMMISSION, 2008) onde afirma que um objeto ou substância originado de um processo que não visa a sua fabricação deve ser considerado como **subproduto** quando:

- a) o uso futuro da substância é certo;
- b) a substância ou objeto pode ser diretamente utilizado sem nenhum tratamento especial, além daqueles de prática comum na indústria;
- c) a substância ou objeto é produzido como parte integral do processo de produção;
- d) o uso da substância ou objeto é legal.

As principais adições minerais utilizadas no cimento encaixam-se nesta classificação, uma das motivações do trabalho é aplicar esta diretiva aos processos que originam as adições e analisar a influência do seu uso nos impactos associados ao ciclo produtivo do cimento.

As principais adições minerais utilizadas no cimento brasileiro são: a escória granulada de alto forno; materiais pozolânicos, representados principalmente pela cinza volante, e materiais carbonáticos, também chamados de filler, onde é utilizado calcário finamente moído. Escórias tem características cimentantes e o material pozolânico na presença de água e hidróxido de cálcio também. Para essas adições, é permitido um maior teor de substituição enquanto o filler que têm apenas contribuições mecânicas, o teor de substituição é menor (AÏTCIN; BENTUR; MINDESS, 2008).

No entanto, a produção destas adições não acompanha o crescimento na produção do cimento. Em 2012, foram produzidos 68,8 milhões de toneladas de cimento (SNIC,2013) e 7,3 milhões de toneladas de escória de alto forno

(CGEE,2014). Considerando estes números, caso fosse utilizada toda produção de escória na substituição do clínquer obteríamos um teor de 10,4% de substituição, enquanto a norma permite substituições de até 75% (ABNT, 2018). Estima-se ainda que, considerando toda cinza volante produzida no país, teríamos um teor de substituição de 7,5% (ABRÃO,2018).

Neste aspecto, outros subprodutos industriais e pozolanas vêm sendo utilizados pela indústria cimenteira. Entre eles destacam-se as escórias ácidas, de cobre, manganês e níquel. Essas escórias podem ser obtidas por diversos processos metalúrgicos. Também são utilizados materiais pozolânicos alternativos como terras diatomáceas e as argilas caulínicas. Ressalta-se que a utilização destes materiais ainda é incipiente no país e além de características químicas o uso destas adições vai depender da sua disponibilidade geográfica (ABRÃO, 2018). A figura 7 traz um mapa com a disponibilidade das adições utilizadas pela indústria nacional e sua proximidade com os polos cimenteiros do país. A seguir, são detalhados os principais tipos de adições utilizadas no cimento.

FIGURA 7 - Distribuição geográfica das adições minerais e indústrias cimenteiras



Fonte: (ABRÃO, 2018)

4.3.1 Escórias

Escórias são resíduos silicosos formados a partir da fusão de determinados materiais. A escória granulada de alto forno é a principal escória utilizada como adição mineral, ela é um subproduto da produção de **ferro gusa** produzido com carvão mineral. O ferro gusa é utilizado para produção do aço e é obtido através da redução do minério de ferro em altos fornos que utilizam carvão como agente redutor. Da escória gerada no processo de fabricação do ferro gusa, 97% é vendida, destas, 99% é destinada à indústria do cimento (CNI, 2012b). Praticamente toda escória de alto forno produzida no Brasil é utilizada para substituição parcial do teor de clínquer nos cimentos nacionais.

A granulação da escória de alto forno ocorre pela interceptação de um jato de água quando a escória ainda está em estado líquido (alta temperaturas). A escória é então armazenada em um tanque de água. Este processo gera um rápido resfriamento do material e o proporciona uma característica vítrea (JOHN; AGOPYAN, 2000). Quimicamente, sua estrutura é similar à do cimento Portland, e da mesma forma é um aglomerante hidráulico que quando em contato com água ganha características ligantes (AÏTCIN; BENTUR; MINDESS, 2008).

O ferro gusa também pode ser obtido utilizando carvão vegetal nos altos fornos. Em 2010, cerca de 20% da produção nacional (7 milhões de toneladas) utilizou carvão vegetal (CGEE, 2014). Quando utilizado este tipo de carvão, é gerado como subproduto a escória ácida, que também pode ser utilizada na substituição do clínquer. A escória ácida tem maior teor de sílica e alumina e menor teor de cálcio quando comparada à escória de alto forno, apresentando assim características pozolânicas. Destaca-se, também, as escórias oriundas da produção de ferro-manganês, ferro-níquel e do beneficiamento do cobre, que apresentam características ácidas, podendo ser utilizadas como substituintes do clínquer. No entanto, estas escórias não apresentam grande disponibilidade no território nacional (ABRÃO, 2018).

4.3.2 Materiais pozolânicos

Materiais pozolânicos são aqueles que possuem uma certa porcentagem de sílica vítrea. Estes materiais não possuem características ligantes, mas, na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos cimentícios (AÏTCIN; BENTUR; MINDESS, 2008). O principal material pozolânico utilizado como adição do cimento é a cinza volante, mas, de acordo com a disponibilidade regional, outras pozolanas podem ser utilizadas.

A cinza volante é um subproduto derivado da queima do carvão mineral na produção de eletricidade em termoelétricas. De acordo com ANEEL (2017), 26,5% da matriz elétrica brasileira é composta por termoelétricas das quais 34% utilizam carvão mineral.

As principais cinzas produzidas no processo de geração de energia são a cinza volante e a cinza pesada. A cinza volante tem partículas com tamanhos inferiores a 100µm que são transportadas junto aos gases de combustão. Já a cinza pesada ou de fundo têm partículas mais grosseiras que ficam depositadas no fundo do forno com um maior número de contaminantes (FROENER, 2016).

O carvão brasileiro, devido à sua composição e qualidade quando utilizado em termelétricas, pode gerar até 50% de cinzas (BROWN, 2011). No sistema de combustão mais comumente utilizado, 75% das cinzas geradas são volantes e 25% pesadas (ROHDE et al., 2006). Em 2014, o país consumiu mais do que 8,8 Mt de carvão mineral para a produção de eletricidade (DNPM, 2015), o que gerou um grande volume de cinzas disponíveis.

No entanto, para ser utilizada como adição no cimento, a cinza volante e demais materiais pozolânicos devem atender os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015c) e NBR 5752 (ABNT, 2014b). Estas normas especificam parâmetros como a granulometria, o índice de pozolanicidade, início de pega, expansibilidade entre outros, que estes materiais devem atender para garantir a qualidade do cimento.

A disponibilidade de cinzas volantes depende da proximidade de termoelétricas e da gestão energética do país, que prioriza o uso de hidroelétricas de acordo com as

condições climáticas (CHRISTÓFOLLI, 2010). No Brasil, a grande maioria das termoelétricas localizam-se no sul do país pela disponibilidade do carvão (ANEEL, 2008). Devido a estes fatores, em algumas localidades do país é comum a utilização de outros materiais pozolânicos, como as terras diatomáceas e as argilas calcinadas.

As argilas calcinadas são provenientes da calcinação da argila (normalmente caulínica) através de um processo térmico, onde adquirem características pozolânicas. Este tipo de adição é utilizado nos cimentos pozolânicos produzidos na região nordeste onde a disponibilidade de cinzas volantes é muito baixa (ABRÃO, 2018).

As terras diatomáceas são solos sedimentares compostos por argilominerais, quartzo, óxido de ferro e diatomito. O diatomito é um material fossilizado rico em sílica. As principais reservas deste material encontram-se na Bahia e ele é utilizado na produção de cimentos pozolânicos nesta região (ABRÃO, 2018).

4.3.3 Materiais carbonáticos

Os Materiais carbonáticos utilizados são denominados *fillers*, sendo utilizado principalmente calcário finamente moído. Por ser um material abundante e requerer pouco processamento, o uso de calcário na composição do cimento é comum e difundido em diversos países. Quando utiliza-se até 5% de calcário na composição do cimento em massa, não há nenhuma mudança significativa nas características macroscópicas do concreto sendo que suas propriedades mecânicas podem ter melhora pouco pronunciada (AÏTCIN; BENTUR; MINDESS, 2008; COURARD; MICHEL, 2014; LOTHENBACH et al., 2008).

A presença do calcário influencia diretamente as reações de hidratação do cimento e melhora a distribuição granulométrica do concreto, sem demandar mais água e reduzindo a permeabilidade quando em pequenas porcentagens (MENÉNDEZ; BONAVETTI; IRASSAR, 2003).

Na norma NBR 16697 (ABNT, 2018), os materiais carbonáticos foram os que tiveram a maior ampliação em seu percentual permitido. Na versão anterior da norma,

o teor máximo permitido era de 10%. Atualmente, para o CII-F, por exemplo, é permitido utilizar até 25% de filler calcário na composição do cimento. Ressalta-se que os benefícios de desempenho mecânico comprovados da utilização deste material se restringem a pequenos teores.

4.4 Sustentabilidade no Setor

A indústria do cimento é uma das principais responsáveis pela emissão de CO₂ no planeta, devido à sua alta demanda atual e ao seu processo produtivo energeticamente dependente.

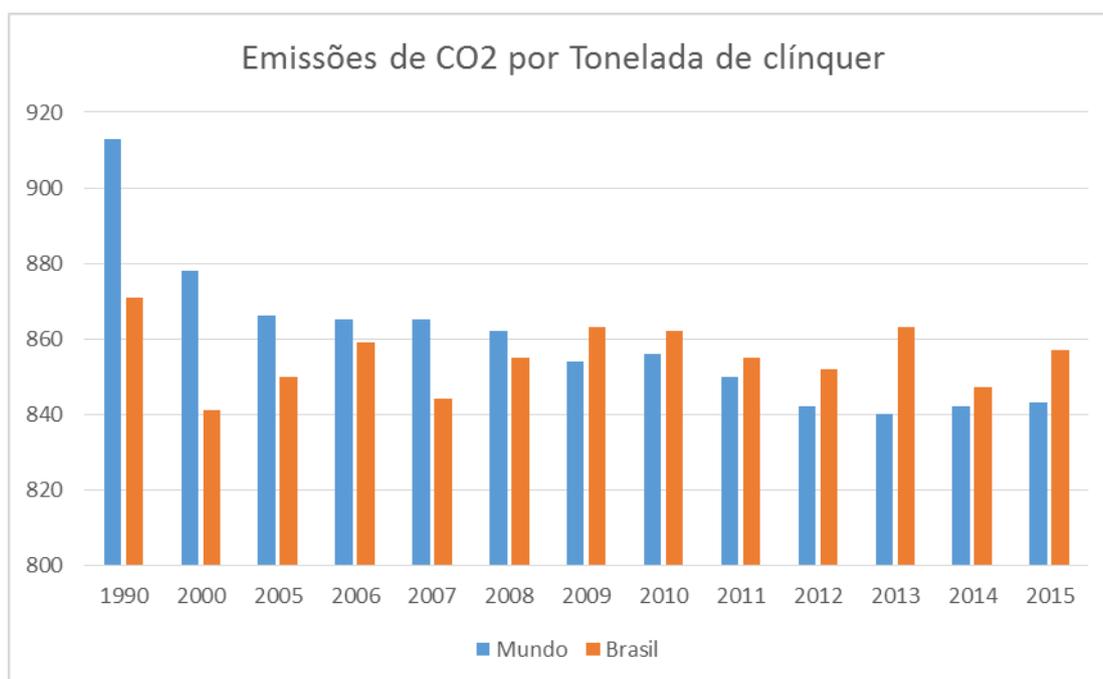
O *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), criado durante a Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO 92), no Rio de Janeiro em 1992, é formado por diretores empresariais que promovem ações e projetos para desenvolver o conceito de sustentabilidade. Este conselho criou, em 1999, a Iniciativa Sustentável do Cimento (CSI: Cement Sustainability Initiative – na sigla em inglês) com o intuito de contribuir com o desenvolvimento sustentável (CSI, 2002).

A CSI é um esforço global composto pelos 24 maiores produtores de cimento que atuam em mais de 100 países. O projeto visa entender, controlar e minimizar os impactos causados pela indústria do cimento. Em 2002, foi publicado o relatório *'Toward a Sustainable Cement Industry'* (WBCSD, 2002), baseado em uma comissão formada por 10 companhias de cimento, as quais comprometeram-se a entender e diminuir as emissões causadas por esta indústria até 2022.

Ao longo dos anos, a CSI realizou diversas iniciativas e publicações, das quais destaca-se a base de dados, denominada *'getting numbers right'* e explicada na publicação *'Cement Industry Energy and CO₂ Performance - Getting the Numbers Right (GNR)'* (WBCSD, 2016). Esta base contempla as emissões de CO₂ e o desempenho energético das indústrias de cimento participantes. Os dados podem ser analisados através de uma média mundial ou discretizados por países participantes, dos quais o Brasil está incluso. Pode-se comparar, como exemplifica a figura 8, a

emissão de CO₂ por tonelada de clínquer no Brasil e no mundo. A emissão brasileira de 1990 a 2015 oscilou entre 841 e 871 toneladas de CO₂, enquanto a média mundial teve um gradual decréscimo ao longo dos anos atingindo um valor de 843 t CO₂ em 2015.

FIGURA 8 - Emissão de CO₂ por tonelada de clínquer no Brasil e no mundo



Fonte: Elaborada pelo autor com base em WBCSD (2016)

No âmbito nacional, nas práticas de sustentabilidade, destaca-se as **declarações ambientais de produto** da empresa brasileira *Votorantim Cimentos*®, elaboradas pela consultoria suíça *‘Quantis’*. As declarações ambientais de produto (DAPs ou EPDs – *Environmental Product Declaration*, na sigla em inglês) são certificações obtidas através do levantamento de informações transparentes sobre o ciclo de vida de um produto, regulamentada pela NBR ISO 14025 (ABNT, 2015b). Estas declarações apresentam uma ‘etiqueta’ onde são apresentados os principais impactos associados ao produto em estudo e podem ser acessadas pelo sistema internacional de EPD’s³, responsável por verificar e registrar as declarações.

Certificações ambientais como o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design– na sigla em inglês) a qual classifica edifícios sustentáveis

³ <https://www.environdec.com>

também considera o uso de EPD's nos materiais utilizados. O LEED classifica as edificações de acordo com uma pontuação que leva em consideração inovações, sistemas construtivos, eficiência energética e de recursos além de transporte e localização (GELOWITZ; MCARTHUR, 2016).

Destaca-se também, certificações de gestão ambiental, como a obtida pela empresa *InterCement*®. Estas certificações são conquistadas através de uma gestão que prioriza o desenvolvimento sustentável de acordo com as diretrizes da NBR ISO 14001 (ABNT,2009). Dentre as ações realizadas pode-se citar a parceria com universidades públicas para a produção de concretos com baixa emissão e estudos para a captação biológica de CO₂ durante a produção de clínquer (INTERCEMENT, 2017).

Outra prática da indústria nacional considerada sustentável é o **co-processamento de resíduos**, que se baseia na substituição dos combustíveis fósseis tradicionalmente utilizados na fase de clínquerização por resíduos industriais. Estes resíduos podem ser incinerados para geração de calor ou compor a matéria prima do clínquer. O tipo de resíduos incinerados dependem da geografia e disponibilidade, entre os mais utilizados destacam-se bagaço de cana, casca de arroz, casca de coco, resíduos de madeira, e rejeitos de pneu (CNI, 2010). No entanto, ressalva-se que é necessária uma análise mais crítica deste procedimento com base nos resíduos utilizados, sua eficiência energética e quais emissões associadas à sua queima.

5. ACV APLICADA À PRODUÇÃO DO CIMENTO

5.1 Objetivo e Escopo

A ACV realizada tem como objetivo quantificar os potenciais impactos associados à produção de 1 kg dos cinco principais cimentos produzidos no Brasil (CPII-E, CPII-F, CPII-Z, CPIII, CP IV e CPV). Para tanto, foi aplicada a ferramenta avaliação do ciclo de vida (ACV) por meio de uma análise probabilística, levando em consideração as incertezas associadas à qualidade dos dados e da variabilidade da composição do cimento, sendo esta realizada através da simulação de Monte Carlo. Ainda foram considerados cenários de alocação física e econômica para as principais adições minerais utilizadas no cimento (cinza volante e escória granulada de alto forno) de forma a analisar à sua influência no impacto do cimento.

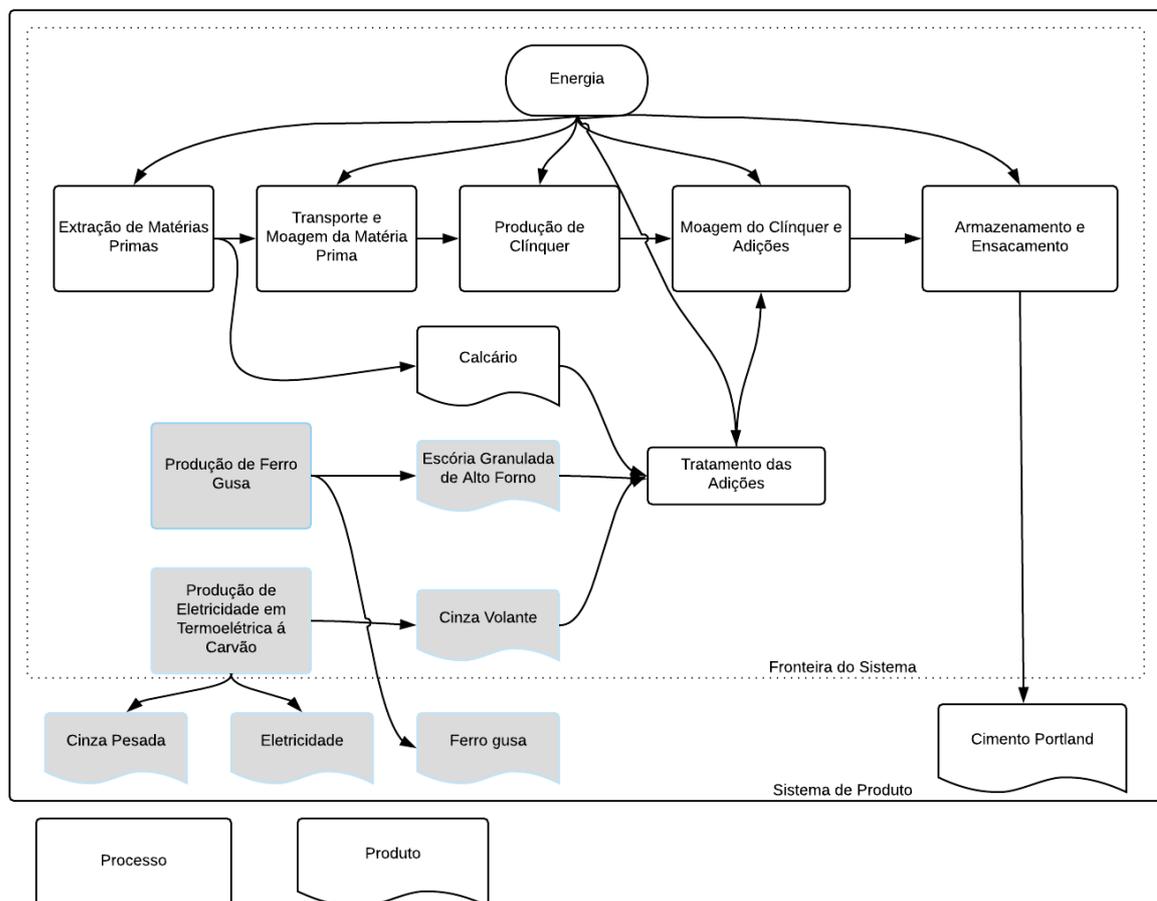
Através desta análise, pretende-se traçar o perfil ambiental destes cimentos, auxiliar na tomada de decisão quanto à escolha do tipo de cimento mais adequado para profissionais da área, e estabelecer dados para futuras pesquisas com base nos resultados encontrados.

Os seis tipos de cimentos escolhidos para análise (CP II-E, CP II-Z, CP II-F, CP III, CP IV e CPV) representaram 99,6% da produção nacional em 2013 (SNIC, 2013). Não serão analisados o CP-I e o CPB, por não apresentarem volume de produção significativo no país.

5.1.1 Sistema de produto e unidade funcional

Para atingir os objetivos da pesquisa, foi realizada uma análise **Cradle-to-Gate**, onde foram levantados dados desde a extração da matéria prima necessária para a produção do cimento, até a finalização do seu processo produtivo na porta da indústria. Na figura 9 é apresentado o fluxograma do sistema de produto que foi estudado.

FIGURA 9 - Sistema de produto do cimento



Fonte: Própria do autor

Pelo sistema de produto, observa-se que o ciclo de vida de uma análise *Cradle-to-gate* engloba os processos descritos no capítulo 3.1 da produção do cimento, além dos processos que geram as adições minerais presentes no cimento. Para o estudo, considerou-se a três principais adições minerais utilizadas na indústria: escória de alto forno, cinza volante e filler calcário (CNI,2010).

A **fronteira do sistema** delimita os processos e produtos de interesse dentro da ACV realizada. Para produção de eletricidade em termoeletricitricas, apenas a produção de cinza volante é de interesse, de tal forma que a destinação da cinza pesada e o uso e distribuição da eletricidade não são contemplados pelo estudo. Da

mesma forma, na produção de ferro gusa, não se considera o uso do ferro para produção de aço, apenas a produção de escória granulada de alto forno.

A **unidade funcional** adotada é de 1kg de cimento Portland. Vale ressaltar que cada tipo de cimento possui composições diferentes, como demonstrado na tabela 4, e, conseqüentemente, diferente desempenho. Desta forma, a unidade funcional escolhida visa quantificar os impactos potenciais associados a 1 kg de cimento e possibilitar a comparação dos resultados com outros estudos realizados e não a comparação entre os cimentos avaliados.

5.1.2 Procedimentos de alocação

Pela figura 9, observa-se que os processos destacados em cinza (produção de ferro gusa e produção de eletricidade em termoelétricas a carvão) são processos multifuncionais os quais geram mais que um produto. Adotando a resolução '*Directive 2008/98/EC*' (EUROPEAN COMMISSION, 2008) da União Europeia, abordada na seção 4.3, observa-se que tanto a cinza volante como a escória de alto forno cumprem os quatro requisitos e devem ser consideradas subprodutos. Assim, impactos potenciais devem ser associados à sua produção.

Para considerar o impacto das adições, seguiu-se as diretrizes da NBR 14044 (ABNT,2009) conforme explicado na seção 3.2.2. Para os processos de produção da cinza volante e da escória de alto forno, não é possível subdividi-los em mais processos, já que a produção dos produtos principais (ferro gusa e eletricidade) está integralmente relacionada com a produção destas adições. A expansão do sistema de produto aumentaria demasiadamente a complexidade do estudo, pois seria necessária incluir na análise toda produção de aço que utiliza ferro gusa além da distribuição e consumo da eletricidade produzida em termoelétricas. Desta forma, optou-se por realizar uma análise de sensibilidade utilizando diferentes procedimentos de alocação aplicáveis, onde foi realizado tanto alocação física através dos valores de massa dos produtos e subprodutos, quanto a alocação econômica a partir dos valores de mercado dos produtos de interesse.

As relações são estabelecidas através do fator de alocação, definido pela equação (1) para alocação física e pela equação (2) para alocação econômica. Determinado o fator de alocação para o produto de interesse, multiplica-se este valor pelas emissões associadas ao processo multifuncional, e assim subdivide-se as emissões do processo para os respectivos produtos de interesse (PASSUELLO et al., 2018).

$$FA_{m_a} = \frac{m_a}{m_a + m_b + m_c + \dots + m_n} \quad \text{equação (1)}$$

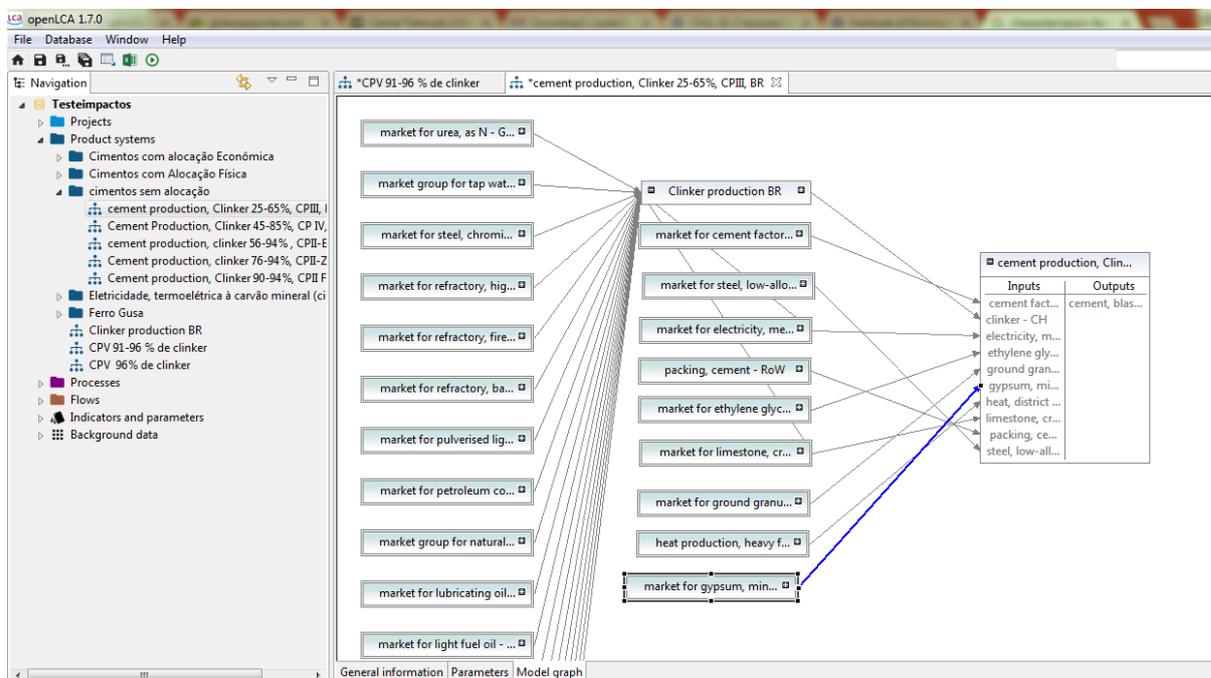
$$FA_{\$_a} = \frac{m_a * \$_a}{m_a * \$_a + m_b * \$_b + m_c * \$_c + \dots + m_n * \$_n} \quad \text{equação (2)}$$

Onde FA_{m_a} e $FA_{\$_a}$ representam o fator de alocação mássico e econômico do produto a, m_a , m_b , m_c e m_n representam a massa dos 'n' produtos gerados pelo mesmo processo multifuncional e $\$_a$, $\$_b$, $\$_c$, $\$_n$ representam o valor econômico por unidade de massa dos 'n' produtos gerados.

5.1.3 Metodologia de avaliação dos impactos.

A modelagem do sistema de produto e cálculo dos impactos potenciais foram realizados no software *OpenLCA*. Trata-se de um programa especializado em avaliação do ciclo de vida, desenvolvido pela consultoria alemã *GreenDelta* e disponibilizado gratuitamente na internet. O *layout* do software bem como a modelagem do sistema de produto pode ser observado na figura 10.

FIGURA 10 - Sistema de produto do cimento CPIII dentro do software OpenLCA



Fonte: Própria do autor

Os impactos foram quantificados através do método CML 2001 para as onze categorias apresentadas na tabela 5. O cálculo dos impactos é feito através dos fatores de caracterização. Cada categoria de impacto possui uma unidade equivalente que é calculada com base na emissão do processo em análise, multiplicado pelo fator de caracterização. Por exemplo, um processo que emita 2 Kg de metano, para a categoria de mudança climática, teria um impacto potencial de 50 Kg de CO₂-eq, já que nesta categoria pelo método CML 2001 o fator de caracterização do metano é de 25. Desta forma, o software calcula os impactos potenciais com base no método escolhido.

TABELA 5 - Principais categorias de impacto do método CML 2001 e unidades de medidas empregadas

Categoria	Unidade
Potencial de Acidificação - Média Europeia	Kg SO ₂ - eq
Potencial de Eutrofização - Média Europeia	Kg NO _x -eq
Mudança Climática - GWP 100a	Kg CO ₂ - eq
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce - FAETP 100a	Kg 1,4-DCB-eq
Ecotoxicidade Aquática Marinha - MAETP 100a	Kg 1,4-DCB-eq
Toxicidade Humana - HTP 100a	Kg 1,4-DCB-eq
Uso de Terra - <i>Competition</i>	m ² .a
Oxidação Fotoquímica - <i>Low Nox</i> POCP	Kg etileno-eq
Recursos - Depleção de recursos abióticos	Kg antimônio -eq
Depleção da Camada de Ozônio - ODP <i>steady state</i>	Kg CFC -11-eq
Ecotoxicidade Terrestre - TAETP 100a	Kg 1,4-DCB-eq

Fonte: Adaptado de Guinée (2001)

5.1.4 Análise de incertezas

A análise de incertezas foi feita através da simulação de Monte Carlo. O próprio software realiza esta simulação empregando os métodos de impacto escolhidos. A simulação determina valores aleatórios para os dados de entrada de acordo com a distribuição probabilística informada para cada dado. Para as entradas de clínquer e adições minerais foram definidas funções de probabilidade de acordo com os intervalos definidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para cada constituinte. Para os demais dados é estimado um valor de incerteza referente à sua qualidade e determinado através da matriz Pedigree. Foram realizadas 10.000 iterações para cada tipo de cimento em cada uma das categorias associadas ao método CML 2001, simulando ainda três cenários. O primeiro sem alocação, desconsiderando o impacto das adições e os demais cenários com alocação física e econômica, resultando em 1.980.000 dados de saída que foram compilados e apresentados através de seus valores estatísticos (média e desvio padrão).

O número de iterações foi estipulado com o intuito de simular o maior número possível de cenários da composição do cimento baseando-se na capacidade computacional disponível e o número de interações utilizadas em outros estudos de ACV (BLENGINI; DI CARLO, 2010; LO; MA; LO, 2005; SONNEMANN; SCHUHMACHER; CASTELLS, 2003).

5.1.5 Requisito de qualidade dos dados

Para realização do estudo foram utilizados dados secundários obtidos através da base de dados internacional *Ecoinvent*, que é um banco de dados comumente utilizado em estudos de ACV, devido ao alto grau de confiabilidade e compatibilização com os softwares da área. Buscou-se dados brasileiros, com no máximo 10 anos da data de publicação, que representem a tecnologia utilizada no país, com uma representatividade significativa da produção nacional e que traga informações claras sobre o levantamento realizado e as incertezas associadas.

Quando estes requisitos não foram observados, adaptou-se os dados para a realidade nacional com base em médias do setor calculadas através dados primários publicados em relatórios fornecidos pela indústria nacional. As adaptações realizadas são apresentadas na próxima sessão.

5.2 Análise de Inventário

5.2.1 Levantamento de dados

Buscou-se dados que cumpram os requisitos de qualidade na versão 3.3 do *Ecoinvent*. A partir dos dados disponíveis, optou-se por utilizar o dado “*Electricity production, hard coal – BR*”, para representar a produção de eletricidade em termoelétricas a carvão mineral no Brasil. Para produção do clínquer, do ferro gusa e dos cimentos também se utilizou vetores disponíveis na base mas os mesmos foram adaptados de forma a representar a realidade brasileira.

Utilizou-se o dado da base “*clinker production –CH*” que representa o clínquer produzido por via seca na Suíça e partir dele adaptou-se suas entradas de acordo com a produção de clínquer no Brasil. O dado apresenta infraestrutura similar à brasileira, no entanto, não representa o mesmo consumo energético devido à diferença da matriz energética de cada país, e os diferentes combustíveis utilizados na fase de clínquerização.

Para o consumo de combustíveis fósseis e energia elétrica na produção de 1 kg clínquer, foram levantadas as quantidades necessárias apresentadas na tabela 6 sendo que para as demais entradas foram utilizados os dados do *Ecoinvent*, por uma questão de confidencialidade a quantidade destes vetores não podem ser divulgados. As entradas adaptadas para a realidade nacional representam médias do setor cimenteiro com base em relatórios setoriais da indústria cimenteira e do balanço energético nacional (CNI, 2010; EPE, 2017).

TABELA 6 – Inventário para produção de 1 kg de clínquer

PRODUÇÃO DE CLÍNQUER - BRASIL				
Entrada	Processo Correspondente na Base	Qtde.	Uni.	Bibliografia
Diesel	<i>diesel, burned in building machine</i>	0,0406	MJ	(EPE, 2017)
Eletricidade	<i>electricity, mediumvoltage</i>	0,0857	Kwh	(CNI, 2010)
Carvão Mineral	<i>Hard Coal</i>	0,0045	Kg	(CNI, 2010)
Carvão Vegetal	<i>Charcoal</i>	0,0128	Kg	(CNI, 2010)
Óleo Combustível	<i>Heavy FuelOil</i>	0,0002	Kg	(EPE, 2017)
Gás Natural	<i>Natural gas</i>	0,0005	m ³	(EPE, 2017)
Coque de Petróleo	<i>PetroleumCoke</i>	0,0834	Kg	(CNI, 2010)
Amônia	<i>ammonia, liquid</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Bauxita	<i>bauxite, without water</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Argila	<i>calcareous marl</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Calcário	<i>limestone, crushed, for mill</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Maquinário	<i>industrial machine, heavy, unspecified</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Óleo Lubrificante	<i>lubricating oil</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Transporte e ensacamento	<i>refractory, fireclay, packed</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Aço Cromado	<i>steel, chromium steel 18/8, hot rolled</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Água	<i>Tap water</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)
Nitrogênio	<i>urea, as N</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)

Fonte: Própria do Autor

Para a produção do ferro gusa também foi feito um processo similar. Onde adaptou-se o dado da base “*Pig Iron Production – CH*” alterando a matriz energética

para a brasileira com base em relatórios da indústria (CGEE, 2014; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014). As entradas são apresentadas na tabela 7.

TABELA 7 – Inventário para produção de 1 kg de ferro gusa

PRODUÇÃO DE FERRO GUSA - BRASIL					
Entrada	Processo Correspondente na Base	Qtde.	Uni.	Bibliografia	
Coque	<i>Coke</i>	10,8300	MJ	(INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014)	
Coque de Petróleo	<i>Petroleum Coke</i>	0,0345	MJ	(INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014)	
Carvão Mineral	<i>Hard Coal</i>	0,5849	Kg	(CGEE,2014)	
Carvão Vegetal	<i>Charcoal</i>	0,0621	Kg	(CGEE,2014)	
Alto Forno	<i>blast furnace</i>	Mantido	Item	(WEIDEMA,2013)	
Gás de Alto Forno	<i>blast furnace gas</i>	Mantido	MJ	(WEIDEMA,2013)	
Minério de Ferro	<i>iron ore, beneficiated, 65% Fe</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)	
Pelota de Ferro	<i>iron pellet</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)	
Sínter	<i>sinter, iron</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)	
Água	<i>Water, cooling, unspecified</i>	Mantido	m ³	(WEIDEMA,2013)	
Resíduos	<i>sludge, pig iron production</i>	Mantido	Kg	(WEIDEMA,2013)	

Fonte: Própria do Autor

Com os processos de produção do clínquer e adições minerais adaptados, os mesmos foram utilizados para adaptação dos cinco cimentos em estudo onde considerou-se sua composição de acordo com a NBR 16697 (ABNT,2009).

Para os cenários de alocação, foram levantadas informações referente às relações físicas e econômicas entre o produto principal e seu subproduto e calculado o fator de alocação (FA) conforme as equações (1) e (2). Os resultados são apresentados na tabela 8 (ANEEL, 2008, 2018; BROWN, 2011; FOUNDRY GATE, 2018; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014; SAADE et al., 2016; TRACTEBEL, 2014).

TABELA 8 – Relações físicas e econômicas entre adições minerais e seus processos de origem

Produção de Ferro Gusa						
	Alocação Física			Alocação Econômica		
	Qtde.	FA	Bibliografia	Valor	FA	Bibliografia
Ferro Gusa	1 kg	0,822	(Instituto Aço Brasil, 2014)	R\$ 2/kg	0,9960	(Foundry Gate, 2018)
Escória de Alto Forno	0,217 kg	0,178	(Instituto Aço Brasil, 2014)	R\$0,037/kg	0,0040	(Saade et al, 2016)
Produção de Eletricidade em Termoelétricas a Carvão Mineral						
	Alocação Física			Alocação Econômica		
	Qtde.	FA	Bibliografia	Valor	FA	Bibliografia
Eletricidade	1 kwh		(ANEEL, 2008)	R\$ 0,531/Kwh	0,9957	(ANEEL,2018)
Cinza Volante	0,164 kg	0,273	(Brown, 2011)	R\$0,014/kg	0,0043	(Tractbel, 2014)
Carvão Mineral	0,436 Kg	0,727	(ANEEL, 2008)			

Fonte: Própria do autor

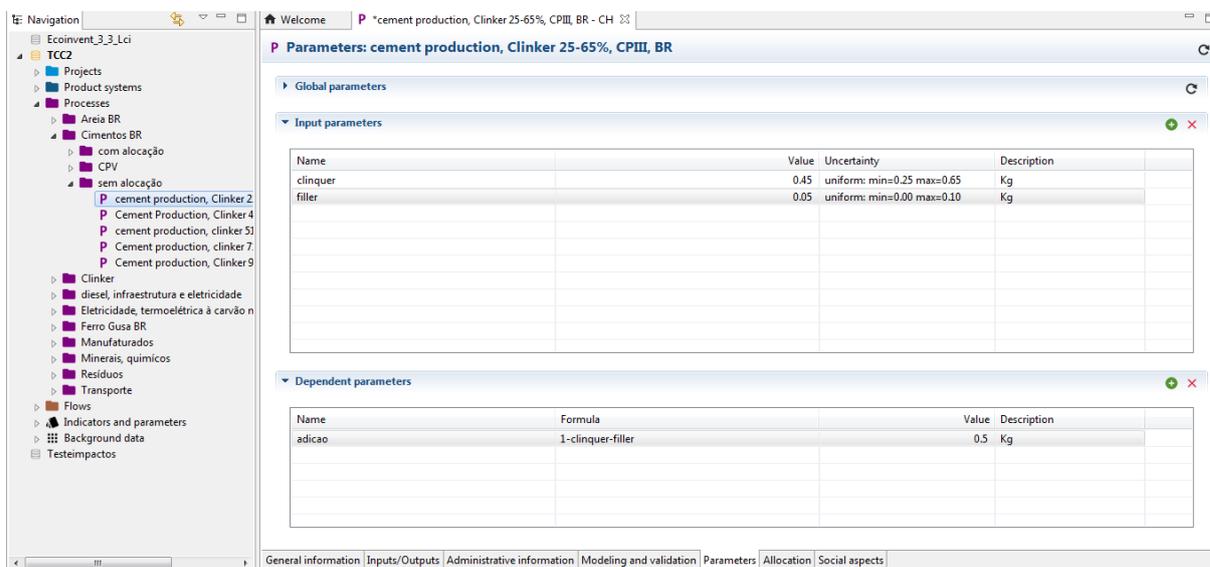
5.2.2 Incerteza e variabilidade dos dados

Para avaliar as incertezas e variabilidade do cimento foram atribuídas distribuições probabilísticas aos dados utilizados. Utilizou-se a matriz Pedigree para atribuir aos dados valores padronizados de incerteza básica e incerteza adicional de acordo com a qualidade do dado especificada na base de dados utilizada.

Como um dos objetivos do trabalho é avaliar a influência da variabilidade da composição do cimento no seu comportamento ambiental, além da incerteza associada à qualidade dos dados, considerou-se também a variabilidade do clínquer e das adições minerais de acordo com o que é especificado em norma. Para tal, foi associado a estes itens uma distribuição uniforme, onde um determinado valor tem a mesma chance de ocorrência dentro de um intervalo pré-estabelecido. O intervalo utilizado foi o mesmo da NBR 16697 (ABNT, 2018), que especifica a composição do cimento.

O software OpenLCA permite inserir estas informações através de parâmetros que depois são associados aos dados em estudos. A figura 11 mostra como as informações foram inseridas dentro do software para o cimento CPIII. No exemplo, este cimento tem na sua composição clínquer (25% a 65%), escória de alto forno (35% a 75%) e filler (0 a 10%). Uma variável independente com distribuição uniforme de acordo com os intervalos da norma foi associada ao clínquer e ao filler. Foi associada à escória uma variável dependente calculada com base nos valores das demais variáveis, fechando o balanço de massa em 1 kg de cimento. Apesar de não estar diretamente associada a uma distribuição uniforme, os valores associados à escória também variam uniformemente dentro do intervalo definido pela norma. Os cálculos dos demais cimentos foram realizados através de processos similares, considerando uma distribuição uniforme nos intervalos determinados e um balanço de massa de 1 kg de cimento, como demonstra a equação 3.

FIGURA 11 – Inserção dos parâmetros de variabilidade do cimento CPIII no software OpenLCA



Fonte: Própria do autor

$$M_{adição} = 1kg - (M_{cimento} + M_{filler}) \quad \text{equação (3)}$$

Onde $M_{cimento}$ e M_{filler} são variáveis independentes que assumem valores de acordo com a distribuição uniforme associada a elas e que representam a massa do cimento e do filler calcário em kg, respectivamente. $M_{adição}$ é uma variável dependente que representa a massa da principal adição mineral do cimento em estudo onde o valor obtido pela equação está sempre dentro do intervalo definido em norma para a adição do cimento em estudo.

5.3 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida

Como citado ao longo do trabalho, a avaliação dos impactos do ciclo de vida foi feita pelo método CML 2001 utilizando a simulação de Monte Carlo para avaliação das incertezas. Foram realizadas 10.000 interações para cada tipo de cimento simulando três cenários. O primeiro sem alocação, desconsiderando o impacto das adições e os demais cenários com alocação física e econômica.

Nos cenários de alocação, para as adições de cinza volante e escória de alto forno, foi aplicado a fator de alocação definido na tabela 6, o qual associa emissões à produção das adições subdividindo-a entre o produto principal (eletricidade e ferro gusa) e o subproduto (cinza volante e escória de alto forno). Já para o material carbonático não foi considerada alocação, pois o mesmo não é originado de um processo multifuncional. É possível considerar sua extração e beneficiamento separadamente, associando diretamente os impactos de sua produção, de acordo com o que preconiza a NBR 14044 (ABNT, 2009c).

Com os vetores de cada tipo de cimento modelado, calculou-se os impactos potenciais associados a cada um nos cenários estipulados. A tabela 9 traz os resultados para os cimentos CII-F e CPV, os quais não tem nenhum cenário de alocação, e a tabela 10 traz os resultados para os demais cimentos.

TABELA 9 – Impactos potenciais dos cimentos CII-F e CPV pelo método CML 2001 com 10.000 iterações utilizando a simulação de Monte Carlo

Categoria	Unidade	CII F		CP V	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Potencial de Acidificação - Avarege European	kg SO ₂ -Eq	1,34E-03	1,78E-04	1,55E-03	2,01E-04
Mudança Climática - GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	7,20E-01	4,61E-02	8,33E-01	4,37E-02
Potencial de Eutrofização - Avarege European	kg NO _x -Eq	1,40E-03	4,04E-04	1,61E-03	4,67E-04
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce - FAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	5,00E-02	2,37E-03	5,90E-02	3,94E-03
Ecotoxicidade Aquática Marinha - MAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,07E-01	5,08E-03	1,26E-01	8,18E-03
Toxicidade Humana - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	8,16E-02	1,33E-01	9,74E-02	1,36E-01
Uso de Terra - <i>Competition</i>	m ² a	1,02E-01	4,04E-03	1,01E-01	3,18E-03
Oxidação Fotoquímica - <i>Low Nox</i> POCP	kg ethylene-Eq	1,08E-04	5,79E-06	1,24E-04	4,81E-06
Recursos - Depleção de recursos abióticos	kg antimony-Eq	1,68E-03	8,69E-05	1,94E-03	7,21E-05
Depleção da Camada de Ozônio - ODP <i>steady state</i>	kg CFC-11-Eq	2,63E-08	1,41E-09	3,03E-08	1,20E-09
Ecotoxicidade Terrestre - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,50E-04	4,98E-04	1,67E-04	4,82E-04

Fonte: Própria do Autor

TABELA 10 - Impactos potenciais dos cimentos CPII-Z, CPII-E, CPIII e CPIV pelo método CML 2001 com 10.000 iterações utilizando a simulação de Monte Carlo

CPII Z							
Categoria	Unidade	Sem Alocação		Alocação Econômica		Alocação Física	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Potencial de Acidificação - Avarege European	kg SO2-Eq	1,35E-03	1,94E-04	1,40E-03	1,88E-04	2,45E-03	5,92E-04
Mudança Climática - GWP 100a	kg CO2-Eq	7,26E-01	6,52E-02	7,51E-01	5,48E-02	9,02E-01	6,53E-02
Potencial de Eutrofização - Avarege European	kg NOx-Eq	1,40E-03	4,07E-04	1,45E-03	4,20E-04	1,95E-03	4,73E-04
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce - FAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	5,08E-02	3,65E-03	5,28E-02	2,68E-03	9,24E-02	2,16E-02
Ecotoxicidade Aquática Marinha - MAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,09E-01	7,83E-03	1,13E-01	5,77E-03	1,95E-01	4,47E-02
Toxicidade Humana - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	8,16E-02	1,57E-01	8,73E-02	1,68E-01	1,00E-01	1,66E-01
Uso de Terra - <i>Competition</i>	m ² a	1,03E-01	6,63E-03	1,05E-01	5,21E-03	1,07E-01	4,59E-03
Oxidação Fotoquímica - Low Nox POCP	kg ethylene-Eq	1,08E-04	8,89E-06	1,12E-04	7,21E-06	1,14E-04	6,08E-06
Recursos - Depleção de recursos abióticos	kg antimony-Eq	1,70E-03	1,35E-04	1,77E-03	9,96E-05	3,00E-03	6,55E-04
Depleção da Camada de Ozônio - ODP <i>steady state</i>	kg CFC-11-Eq	2,66E-08	2,16E-09	2,74E-08	1,75E-09	2,77E-08	1,59E-09
Ecotoxicidade Terrestre - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,56E-04	1,07E-03	1,53E-04	4,83E-04	1,88E-04	3,66E-04

CPII E							
Categoria	Unidade	Sem Alocação		Alocação Econômica		Alocação Física	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Potencial de Acidificação - Avarege European	kg SO2-Eq	1,22E-03	2,44E-04	1,23E-03	2,37E-04	1,97E-03	3,64E-04
Mudança Climática - GWP 100a	kg CO2-Eq	6,43E-01	1,11E-01	6,48E-01	1,07E-01	8,89E-01	7,79E-02
Potencial de Eutrofização - Avarege European	kg NOx-Eq	1,25E-03	4,10E-04	1,26E-03	4,08E-04	1,87E-03	4,28E-04
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce - FAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	4,56E-02	6,84E-03	4,68E-02	5,99E-03	1,04E-01	3,29E-02
Ecotoxicidade Aquática Marinha - MAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	9,79E-02	1,47E-02	1,01E-01	1,28E-02	2,22E-01	6,91E-02
Toxicidade Humana - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	7,30E-02	1,19E-01	8,16E-02	1,22E-01	4,34E-01	5,39E-01
Uso de Terra - <i>Competition</i>	m ² a	9,26E-02	1,25E-02	9,42E-02	1,13E-02	1,65E-01	3,67E-02
Oxidação Fotoquímica - Low Nox POCP	kg ethylene-Eq	9,57E-05	1,63E-05	1,04E-04	1,30E-05	4,79E-04	3,76E-04
Recursos - Depleção de recursos abióticos	kg antimony-Eq	1,52E-03	2,48E-04	1,56E-03	2,21E-04	3,34E-03	9,79E-04
Depleção da Camada de Ozônio - ODP <i>steady state</i>	kg CFC-11-Eq	2,41E-08	3,89E-09	2,44E-08	3,70E-09	3,71E-08	8,23E-09
Ecotoxicidade Terrestre - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,32E-04	3,31E-04	1,29E-04	2,99E-04	2,00E-04	3,11E-04

CPIV							
Categoria	Unidade	Sem Alocação		Alocação Econômica		Alocação Física	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Potencial de Acidificação - Avarege European	kg SO2-Eq	1,14E-03	2,24E-04	1,20E-03	2,10E-04	4,64E-03	1,08E-03
Mudança Climática - GWP 100a	kg CO2-Eq	5,86E-01	1,03E-01	5,97E-01	1,01E-01	1,09E+00	8,51E-02
Potencial de Eutrofização - Avarege European	kg NOx-Eq	1,14E-03	3,71E-04	1,17E-03	3,69E-04	2,83E-03	5,78E-04
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce - FAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	4,70E-02	6,10E-03	4,92E-02	5,45E-03	1,78E-01	4,08E-02
Ecotoxicidade Aquática Marinha - MAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,01E-01	1,31E-02	1,06E-01	1,18E-02	3,74E-01	8,42E-02
Toxicidade Humana - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	7,53E-02	1,30E-01	7,49E-02	1,01E-01	1,27E-01	1,53E-01
Uso de Terra - <i>Competition</i>	m ² a	9,10E-02	1,15E-02	9,13E-02	1,16E-02	9,50E-02	1,02E-02
Oxidação Fotoquímica - Low Nox POCP	kg ethylene-Eq	8,68E-05	1,50E-05	8,72E-05	1,51E-05	9,52E-05	1,24E-05
Recursos - Depleção de recursos abióticos	kg antimony-Eq	1,42E-03	2,29E-04	1,49E-03	2,09E-04	5,49E-03	1,23E-03
Depleção da Camada de Ozônio - ODP <i>steady state</i>	kg CFC-11-Eq	2,25E-08	3,61E-09	2,26E-08	3,64E-09	2,38E-08	3,19E-09
Ecotoxicidade Terrestre - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,22E-04	3,20E-04	1,32E-04	4,33E-04	2,27E-04	2,80E-04

CPIII							
Categoria	Unidade	Sem Alocação		Alocação Econômica		Alocação Física	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Potencial de Acidificação - Avarege European	kg SO2-Eq	8,12E-04	2,04E-04	8,51E-04	1,95E-04	2,70E-03	3,45E-04
Mudança Climática - GWP 100a	kg CO2-Eq	4,10E-01	1,02E-01	4,22E-01	9,74E-02	1,03E+00	6,88E-02
Potencial de Eutrofização - Avarege European	kg NOx-Eq	8,02E-04	2,97E-04	8,33E-04	2,92E-04	2,35E-03	3,11E-04
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce - FAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	3,44E-02	6,91E-03	3,76E-02	6,30E-03	1,82E-01	2,93E-02
Ecotoxicidade Aquática Marinha - MAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	7,36E-02	1,47E-02	8,04E-02	1,34E-02	3,84E-01	6,15E-02
Toxicidade Humana - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	5,52E-02	6,13E-02	7,82E-02	8,10E-02	9,61E-01	8,69E-01
Uso de Terra - <i>Competition</i>	m ² a	6,65E-02	1,16E-02	7,04E-02	1,06E-02	2,48E-01	3,22E-02
Oxidação Fotoquímica - Low Nox POCP	kg ethylene-Eq	6,10E-05	1,49E-05	6,28E-05	1,84E-05	1,03E-03	6,76E-04
Recursos - Depleção de recursos abióticos	kg antimony-Eq	1,00E-03	2,29E-04	1,10E-03	2,04E-04	5,55E-03	8,63E-04
Depleção da Camada de Ozônio - ODP <i>steady state</i>	kg CFC-11-Eq	1,57E-08	3,59E-09	1,64E-08	3,42E-09	4,87E-08	1,52E-08
Ecotoxicidade Terrestre - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	8,57E-05	1,96E-04	9,04E-05	1,87E-04	2,61E-04	2,45E-04

Fonte: Própria do Autor

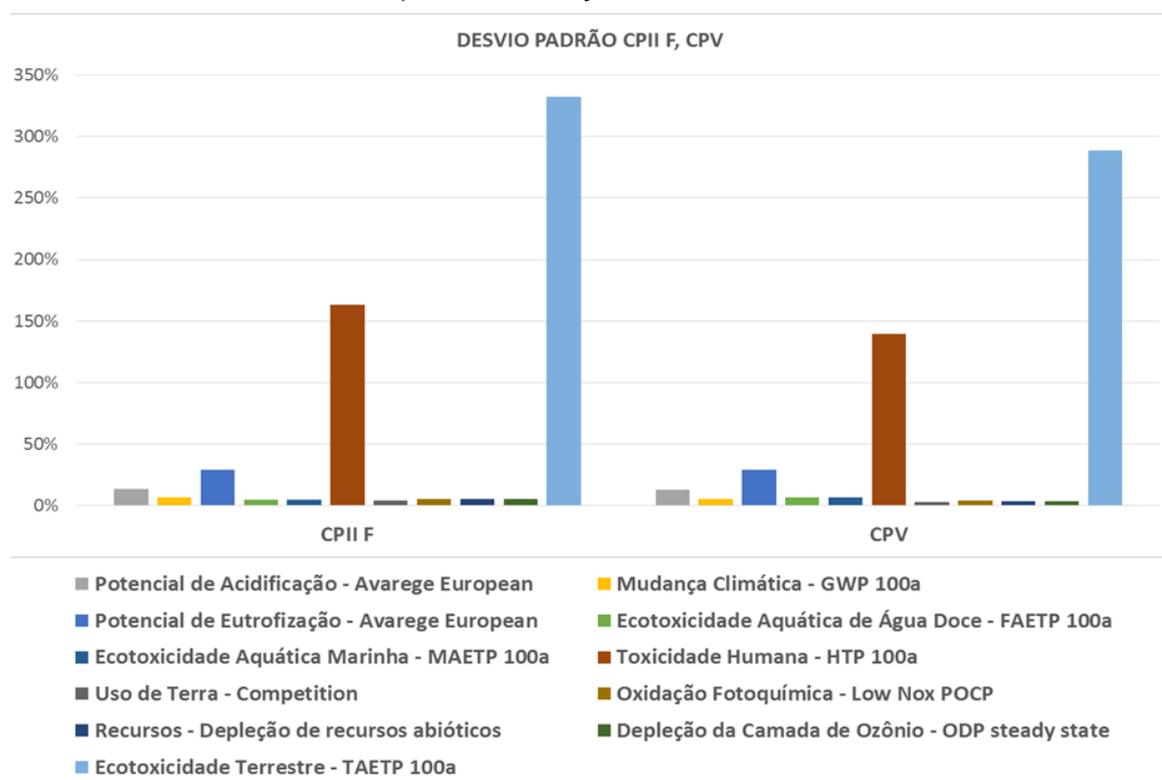
5.4 Interpretação dos Resultados

5.4.1 Variabilidade do cimento

O desvio padrão é uma medida de dispersão e o seu valor reflete a variabilidade das observações em relação ao valor médio, quanto maior seu valor, maior a dispersão entre os dados e maior a variabilidade associada a distribuição em análise (LUNET; SEVERO; BARROS, 2006).

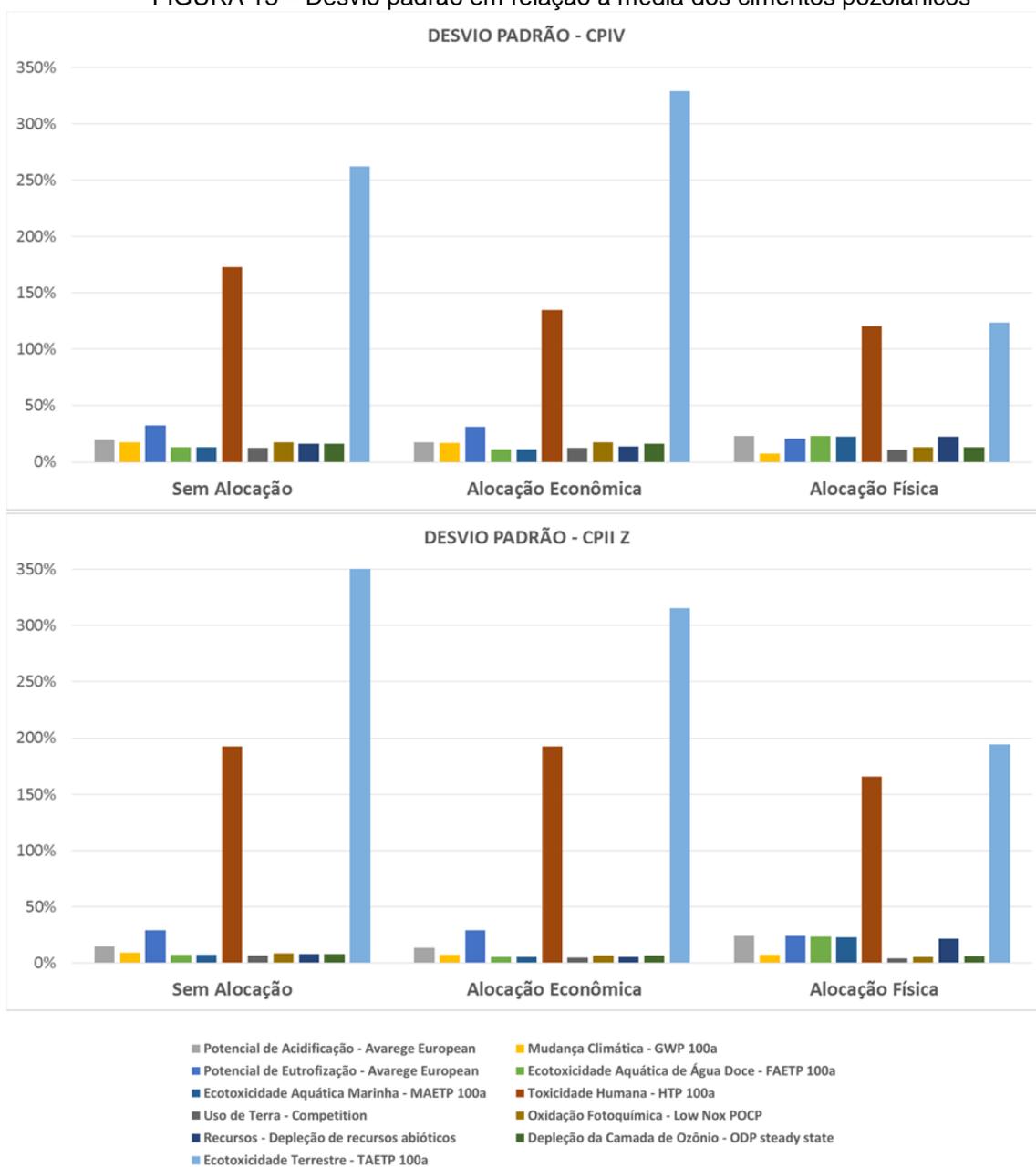
Para analisar os desvios encontrados para os cinco cimentos em análise foram elaborados os gráficos das figuras 12, 13 e 14. Para fins de comparação, os valores dos desvios foram normalizados em relação ao valor médio de cada categoria de impacto.

FIGURA 12 – Desvio padrão em relação à média dos cimentos CPII F e CPV



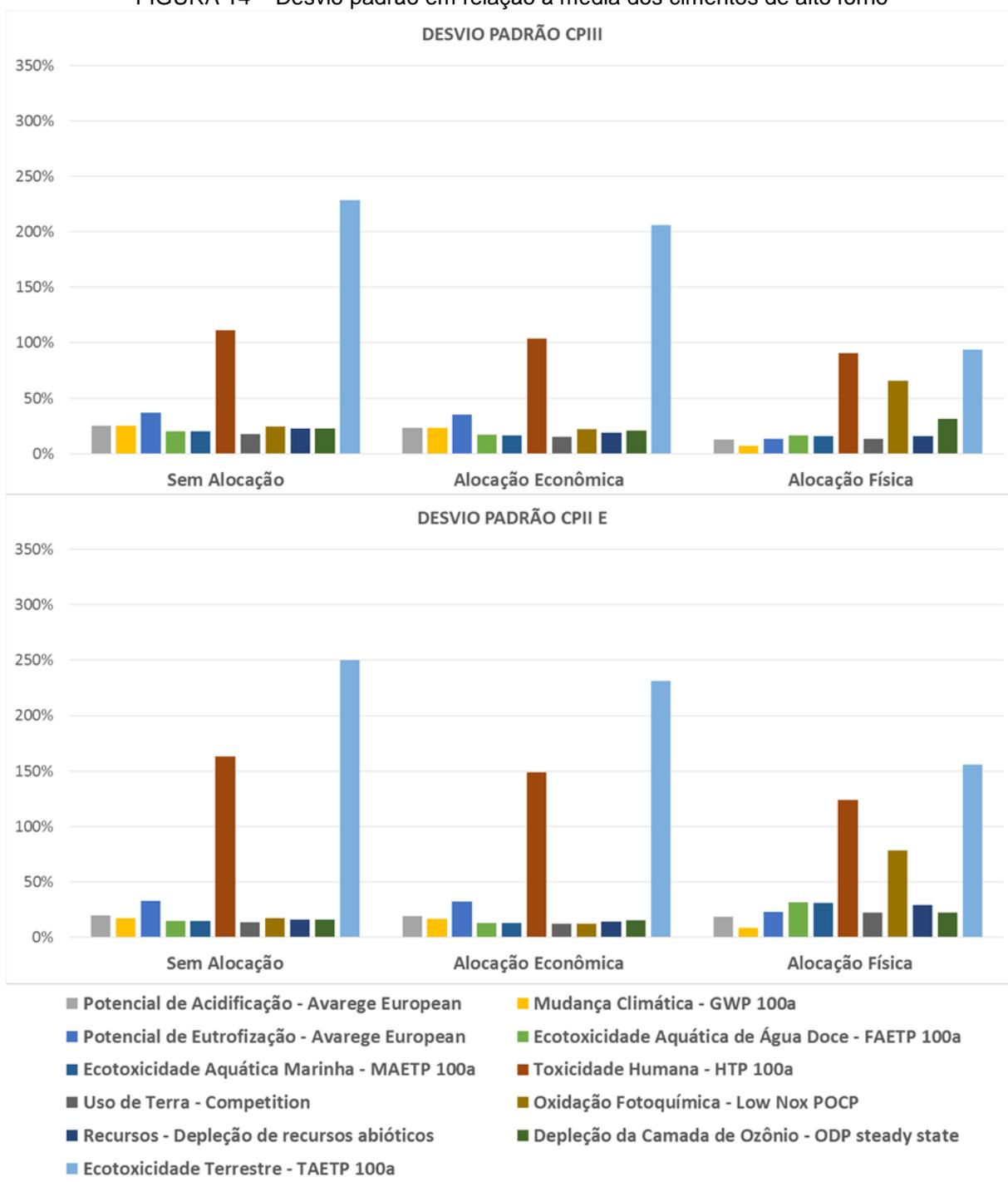
Fonte: Própria do Autor

FIGURA 13 – Desvio padrão em relação à média dos cimentos pozolânicos



Fonte: Própria do autor

FIGURA 14 – Desvio padrão em relação à média dos cimentos de alto forno



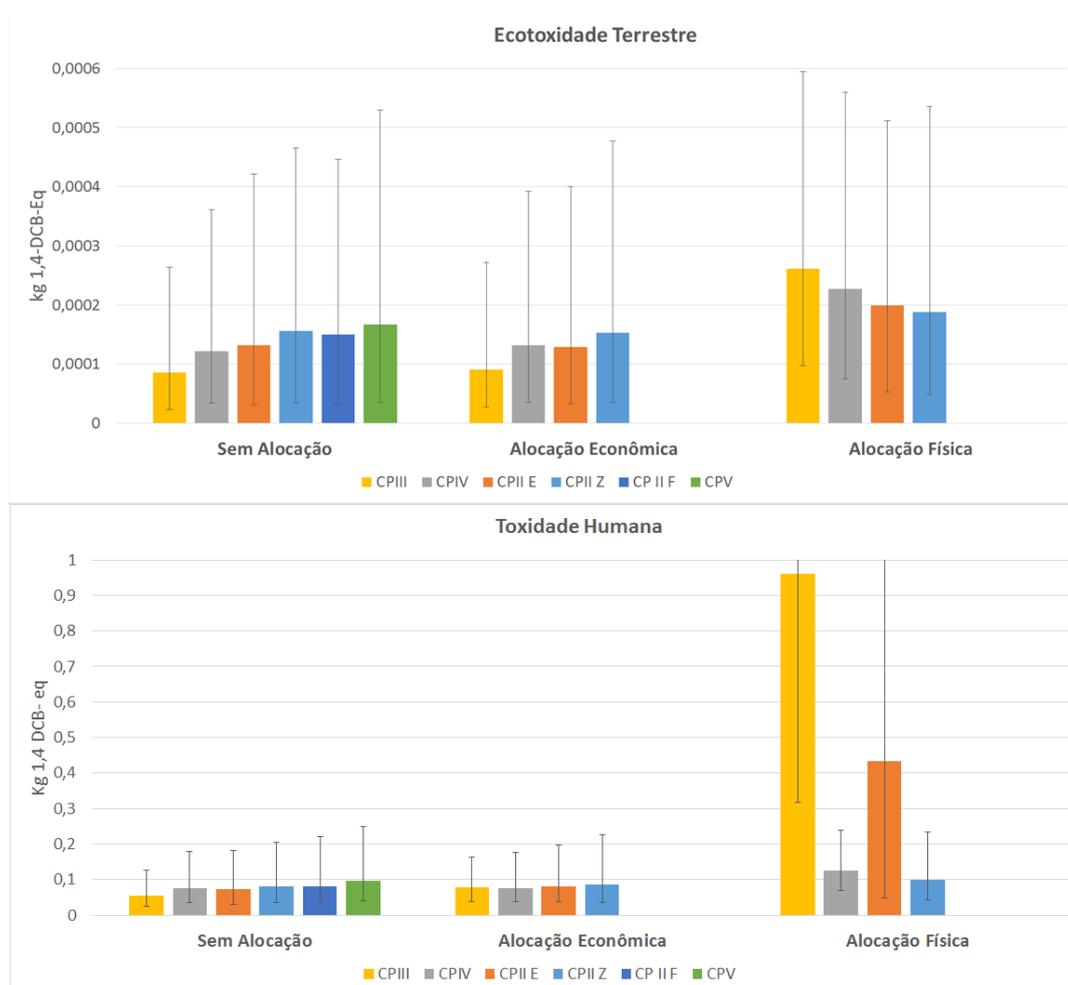
Fonte: Própria do autor

Em termos gerais, os DPs dos cimentos variam entre 0% e 25% em relação ao valor médio, no entanto, observa-se claramente pelos gráficos abaixo que as categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade terrestre apresentam alta variabilidade.

A categoria de toxicidade humana é extremamente sensível a algumas emissões liberadas durante a fase de clínquerização, como emissão de arsênio, cobre e cádmio. Apesar destas emissões ocorrerem em pequenas quantidades, o fator de impacto associadas a elas é muito alto (o arsênio tem um fator de impacto de 347.700 kg 1,4-DCB-eq/kg, por exemplo), desta forma pequenas variações na quantidade de clínquer considerado geram grandes variações nos resultados encontrados.

Para a categoria de ecotoxicidade terrestre, a análise é análoga e sua variabilidade também ocorre devido à variação na quantidade de clínquer. No entanto, o principal responsável é o mercúrio emitido durante a clínquerização (fator de impacto de 3.171,9 kg 1,4-DCB-eq/kg). A figura 15 traz os resultados para estas duas categorias, apresentando seus valores médios e um intervalo de confiança de 90%.

FIGURA 15 – Impactos potenciais para as categorias de ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana



Fonte: Própria do autor

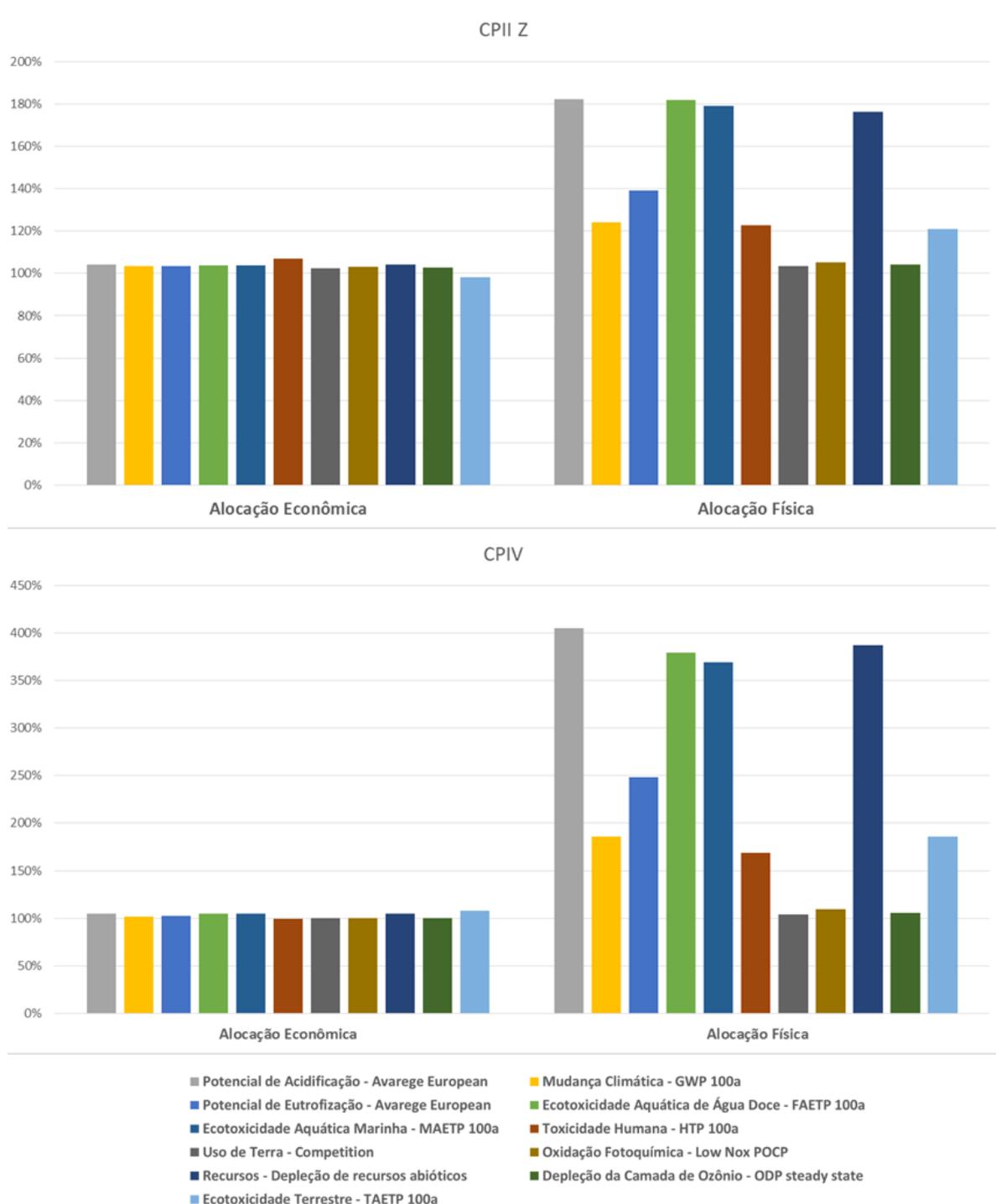
Observa-se que ambas as categorias têm grandes intervalos de potenciais impactos nos três tipos de alocação considerados. Logo, percebe-se que para estas duas categorias os resultados encontrados são extremamente sensíveis à qualidade dos dados e à metodologia de análise adotada. Ainda, os valores médios não necessariamente correspondem a determinada indústria e os valores encontrados devem ser tratados com cautela.

5.4.2 Diferença entre os cenários de alocação

Para os cimentos com dois cenários de alocação, observa-se um aumento no impacto potencial em todas as categorias de acordo com o tipo de alocação utilizado. As figuras 16 e 17 trazem gráficos comparando os resultados médios. O cenário sem alocação foi normalizado com o valor de 100% e é indicada a variação da médias dos outros cenários a partir deste valor. Observa-se que, para os quatro cimentos, os impactos com alocação econômica são superiores ao cenário sem nenhuma alocação, este aumento varia de 0 a 36%. Já na alocação física, os impactos potenciais sobem consideravelmente.

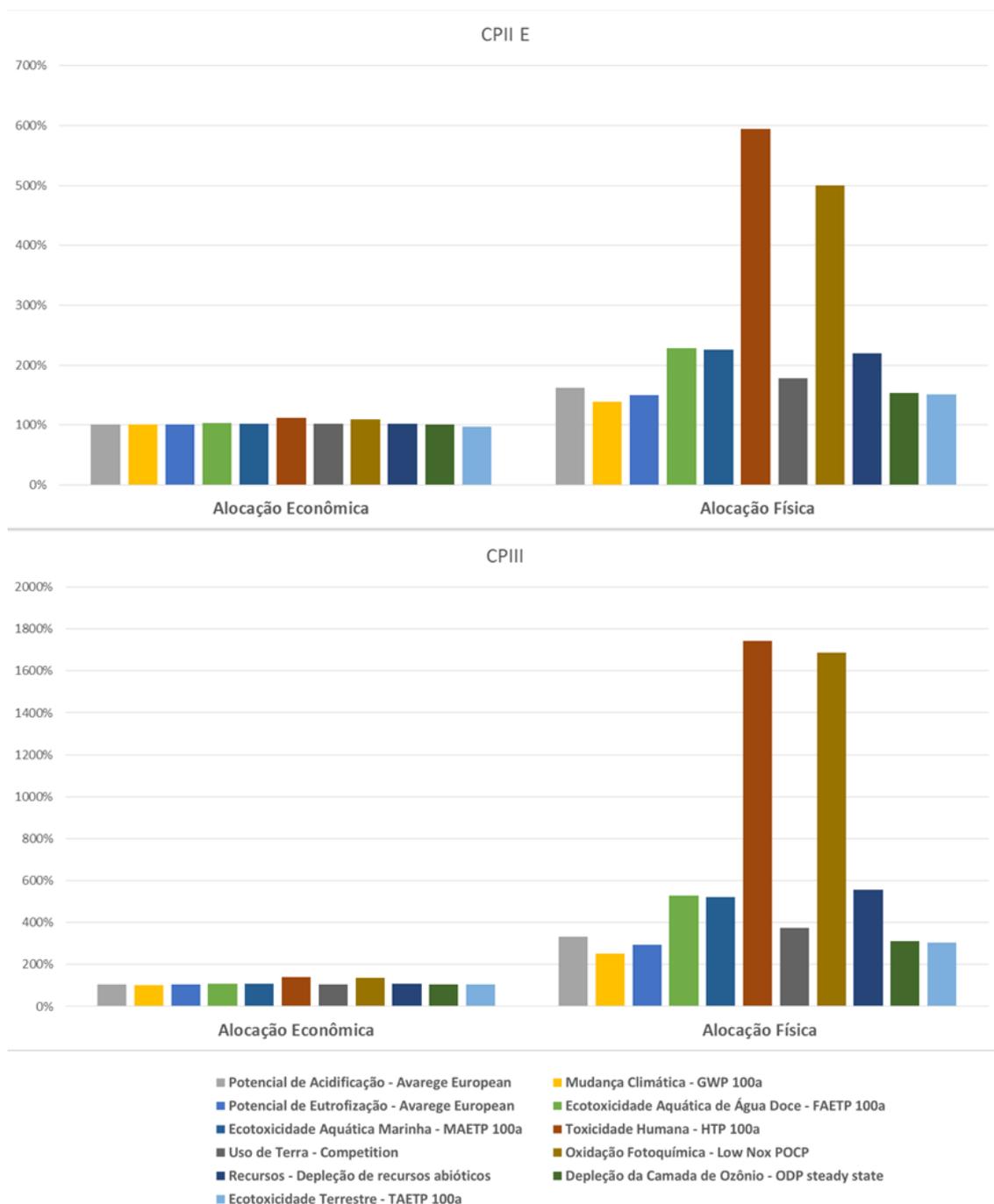
Este comportamento era esperado, quando se utiliza relações físicas para o processo de alocação, os produtos originados de um processo multifuncional, equivalem-se entre si, como o interesse na produção do produto principal fosse o mesmo que o do seu subproduto. Desta forma, no sistema em estudo, boa parte do impacto da produção de eletricidade em termoeletricas é associado à cinza volante (27,3% de acordo com FA calculado), e boa parte do impacto da produção de ferro gusa é associado à escória de alto forno (17,8% de acordo com o FA calculado)

FIGURA 16 – Diferença dos impactos potenciais médios nos cenários com alocação para os cimentos pozolânicos em relação ao cenário sem alocação



Fonte: Própria do autor

FIGURA 17 – Diferença dos impactos potenciais médios nos cenários com alocação para os cimentos de alto forno em relação ao cenário sem alocação



Fonte: Própria do autor

Para o CII-Z e o CIV, que utilizam a cinza volante como adição, as principais categorias afetadas na alocação física são o potencial de acidificação, a ecotoxicidade aquática de água marinha e doce e a depleção de recursos abióticos, que aumentam respectivamente 82%,79%, 82% e 76% para o CII Z e 305%, 269%, 279% e 287% para o CIV quando comparadas com o cenário sem alocação. Esse aumento também ocorre na alocação econômica, porém em uma proporção menor, pois o fator de alocação é pequeno. O potencial de acidificação é especialmente afetado nestes dois cimentos devido ao Dióxido de Enxofre e Óxidos de Nitrogênio emitidos durante o processo de produção de eletricidade em termoelétrica a carvão mineral. Já as categorias de ecotoxicidade são afetadas pelos metais pesados liberados durante a extração de carvão mineral para produção de eletricidade e a depleção de recursos abióticos acontece pelo uso do carvão.

Comparando as escalas entre os gráficos da figura 16 e 17, observa-se que para os cimentos que utilizam escória como adição, a diferença entre o cenário sem alocação e com alocação física é maior do que para os cimentos pozolânicos. Para o CII-E e CIII as principais categorias afetadas são a toxicidade humana e a oxidação fotoquímica, que aumentam respectivamente 495% e 401% para o CII-E e 1641% e 1588% para o CIII quando comparadas com o cenário sem alocação. Este aumento na categoria de toxicidade humana deve-se principalmente ao benzeno emitido durante a produção do coque utilizado como combustível para produção de ferro gusa. Já na categoria de oxidação fotoquímica, o aumento ocorre pela emissão de monóxido de carbono durante a produção de sinter que será futuramente utilizado para produzir ferro gusa. Nota-se, tanto para os cimentos pozolânicos quanto os de alto forno, o aumento do impacto nos cenários de alocação está diretamente relacionado com os processos de produção das adições minerais.

Uma das motivações para associar impactos potenciais à utilização de adições foi a diretiva 2008/98 da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2008) que determina que as adições não devem ser consideradas resíduos, conforme explicado na seção 4.3. Por isto, foram testados dois cenários de alocação. Utilizando relações físicas o impacto associado ao cimento sobe exponencialmente, pois o fator de alocação física leva em consideração apenas aspectos tecnológicos. Deste modo, considera-se o mesmo impacto por unidade de massa para o produto principal e seu

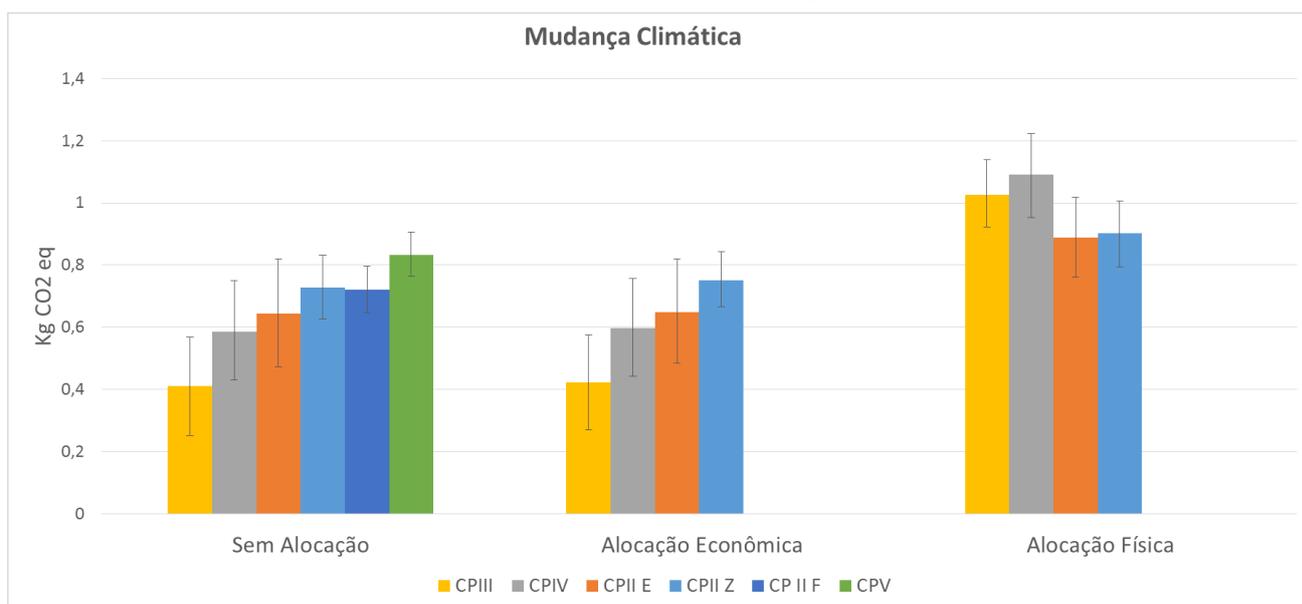
subproduto, não ponderando o interesse no uso destes materiais. Já para alocação econômica, este interesse é considerado através do valor econômico dos coprodutos, e os impactos associados às adições são proporcionalmente menores. Desta forma, utilizar alocação física desmotiva o uso de adições no cimento, já que os impactos alocados a estes coprodutos são, por vezes, superiores aos do clínquer.

Portanto, observa-se que, neste caso, a alocação econômica expressa melhor o interesse entre o produto principal e seu subproduto, no entanto, seu valor pode variar em pequenos períodos de acordo com flutuações econômicas, enquanto o valor de alocação física tende a permanecer constante enquanto não há mudanças tecnológicas.

5.4.3 Potencial de Aquecimento Global

A categoria mais difundida na avaliação de impactos em ACV é a de mudança climática (também chamada de potencial de aquecimento global) que mede os impactos em kg-CO₂-eq. O método CML 2001 utiliza a mesma metodologia do método IPCC 2007, os resultados são apresentados na figura 18 para os três cenários de alocação com um intervalo de confiança de 90%.

FIGURA 18 – Impactos potenciais dos cimentos para a categoria de mudança climática



Fonte: Própria do Autor

Tradicionalmente, muitos estudos de ACV do cimento apresentam apenas resultados médios, sem considerar a alocação de impactos a coprodutos. Nestas condições, observa-se que os cimentos com mais teor de substituições têm uma menor emissão de carbono já que nenhum impacto é associado as adições. Assim, os chamados cimentos lentos (CPIII e CPIV) são considerados cimentos sustentáveis por possuírem uma menor emissão de carbono média quando comparados com os demais cimentos (GUERREIRO, 2014; WBCSD, 2016). Neste cenário, o cimento de maior impacto ambiental é o CPV-ARI. Além de possuir o maior teor de clínquer, este cimento tem maior superfície específica que os demais devido ao menor tamanho de suas partículas, conseqüentemente há um maior gasto energético na sua produção e um maior impacto associado. Nestas condições, a principal responsável pela liberação de carbono na atmosfera é a reação de calcinação que ocorre na fase de clínquerização conforme explicado na seção 4.1.

Quando é realizado a alocação econômica, a mesma interpretação se mantém, aumentando um pouco a emissão média de cada cimento. Já no cenário com alocação física, os cimentos com maior teor de substituição passam a ter maior impacto médio variando em um patamar em torno de 1 kg-CO₂-eq por kg de cimento produzido, onde além do carbono emitido durante a clínquerização também são consideradas as emissões originadas pela produção das adições.

Adicionando a incerteza dos dados e a variabilidade da composição do cimento na análise, observa-se pela figura 12 que existe um intervalo de possíveis impactos que cada tipo de cimento pode assumir. Por exemplo, o cimento CPIV, considerado sustentável, pode emitir até 0,75 kg-CO₂-eq por kg de cimento produzido no cenário sem alocação, enquanto um CPII-F com teor de clínquer médio emite 0,72 kg-CO₂-eq.

Nos três cenários, os possíveis intervalos de impacto de cada cimento sobrepõe-se entre si, logo é possível concluir que independentemente da metodologia utilizada para considerar os impactos das adições, não é possível afirmar qual impacto específico de um cimento tendo como informações apenas a composição informada pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Esta análise é análoga para as demais categorias de impacto do método utilizado, tal fato evidencia a necessidade de uma maior transparência da indústria quanto a composição do cimento. Iniciativas como as declarações de produtos ambientais (EPD – *Environmental Product Declaration*, na sigla em inglês) são um passo certo nesta direção. Atualmente, a sustentabilidade é um fator importante em decisões na construção civil, informações adequadas quanto à composição do cimento e o impacto associado à sua produção devem ser utilizadas como ferramenta de decisão para soluções técnicas adotadas no setor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos resultados encontrados, observa-se que o teor de adição de um cimento bem como o procedimento de alocação utilizado para associar impactos às adições influenciam diretamente nos resultados. Seguindo a diretiva 98 da União Europeia (2008), é preciso definir o método mais adequado para associar impactos a subprodutos de processos multifuncionais. No caso do cimento, utilizar a alocação física desmotiva o uso de adições pela indústria cimenteira devido ao alto impacto associado a estes coprodutos. Isto porque a alocação física considera o mesmo impacto por unidade (de massa, energia, ...) aos produtos gerados por um processo multifuncional. Desta forma, sua utilização é mais adequada para indústrias que geram produtos similares. No caso das adições estudadas, ao aplicar a alocação física, entende-se que o interesse no uso da escória de alto forno e da cinza volante é o mesmo que o interesse no uso do ferro gusa e de eletricidade, respectivamente. Por tal razão, um alto impacto é associado ao uso das adições.

Já a alocação econômica aumenta os impactos médios dos cimentos estudados em uma escala bem inferior quando comparada com a alocação física. Essa metodologia expressa melhor a relação de interesse entre o produto principal e o seu subproduto por considerar o valor de mercado destes materiais. No entanto, ressalva-se que seu valor sofre variações de acordo com flutuações.

Os resultados também mostram que há uma alta variabilidade associada ao cimento, o mesmo pode ter diferentes impactos associados de acordo com a sua composição. Cimentos com alto grau de substituição, tradicionalmente considerados sustentáveis, tem alta variabilidade e podem ter um alto impacto associado à sua produção. A análise probabilística ainda permitiu realizar uma análise de sensibilidade identificando categorias de impacto (Toxicidade Humana e Ecotoxicidade Terrestre) extremamente sensíveis a pequenas variações na quantidade de clínquer considerada, devido à características de produção das adições.

Tal fato ilustra que conhecer a composição exata de um cimento é informação fundamental para determinar o impacto associado a ele. Uma solução neste aspecto, seria um rótulo mais transparente por parte da indústria do cimento, que além de

indicar o tipo de cimento comercializado, de acordo com as especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018), deveria trazer informações claras quanto à composição do cimento e o impacto associado à sua produção. As declarações ambientais de produto, ainda incipientes no país, são fundamentais para uma relação de maior transparência entre produtor e consumidor, principalmente na indústria do cimento onde devem ser utilizadas como auxílio para a tomada de decisões.

Neste aspecto, a consciência ambiental do consumidor vem se desenvolvendo ao longo dos anos devido aos altos impactos associados à construção civil, conseqüentemente a demanda por produtos sustentáveis cresce e a indústria deve se adaptar a este novo cenário. A administração pública também pode auxiliar nas mudanças necessárias para um consumo mais sustentável. Entre as possíveis políticas públicas que podem ser adotadas, destaca-se os incentivos fiscais, o imposto sobre carbono e as compras públicas sustentáveis. Essas políticas podem ser criadas de forma a fomentar a sustentabilidade no mercado da construção civil.

Neste cenário de conscientização ambiental, a ACV mostrou ser uma ferramenta competente para análise dos processos e produtos em estudo. No entanto, entre as principais dificuldades deparadas durante o desenvolvimento do trabalho, pode-se citar o levantamento de dados realizado. Nota-se que dados para estudos de ACV que representem a realidade brasileira ainda são escassos em muitas áreas. Para o caso do cimento foi possível adaptar os dados com base em relatórios divulgados pela indústria nacional. Sendo que o levantamento de inventário aqui exposto pode servir como base para futuros estudos de ACV nacionais que envolvam o uso de ferro gusa ou escória e clínqueres de cimento Portland.

Além dos dados levantados, o trabalho realizado também traz um panorama importante sobre os impactos na produção de cimento no Brasil. No entanto, uma das limitações do trabalho foi não considerar a disponibilidade das adições no mercado e os diferentes tipos de adições também utilizadas pela indústria do cimento, que variam de acordo com a demanda de energia elétrica e de aço, além de condições geográficas. No trabalho, considerou-se os diferentes cenários de composição do cimento com a mesma chance de ocorrência, uma sugestão para trabalhos futuros é realizar uma análise do mercado de adições a fim de determinar

as composições mais prováveis para um determinado tipo de cimento considerando fatores econômicos e geográficos e assim diminuir a variabilidade encontrada nos resultados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 18 jun 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações gerenciais.** Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-gerenciais>> Acesso em: 20 jun 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Ranking de tarifas.** 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em: 21 set 2018.

AÏTCIN, P.-C.; BENTUR, A.; MINDESS, S. **Binders for durable and sustainable concrete.** 1. ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14064:** Gases de efeito estufa. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001:** Sistemas de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso. tecnologia da informação: técnicas de segurança: sistemas de gestão de segurança da informação: requisitos. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044:** Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14045:** Gestão ambiental: avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto: princípios requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Materiais pozolâncios: determinação do índice de desempenho com cimento portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 14067:** Gases de efeito estufa: pegada de carbono de produtos: requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação. Rio de Janeiro, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14025** : Rótulos e declarações ambientais: declarações ambientais de tipo iii: princípios e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653** : Materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018. p. 16.

BARBOSA JÚNIOR, A. F. et al. Conceitos e Aplicações de Análise do Ciclo Vida (ACV) no Brasil. **Revista Gerenciais**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 39–44, 2008. Disponível em: <<http://www.revistaiberoamericana.org/ojs/index.php/ibero/article/viewFile/972/1280>> Acesso em: 15 maio 2018

BEBER, A. O. Implantação de Sistema de Gestão Ambiental na Empresa. **Revista Científica Acadêmica**, Uberlândia, v. 1, p. 1–15, 2011. Disponível em: <<https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/implantacaodesistemadegestaoambientalnaempresa.pdf>> Acesso em: 18 maio 2018

BJÖRKLUND, A. E. Survey of Approaches to Improve Reliability In Lca. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 64–72, 2002. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02978849>> Acesso em: 20 maio 2018

BLENGINI, G. A.; DI CARLO, T. The Changing Role of Life Cycle Phases, Subsystems and Materials in the LCA of Low Energy Buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 42, n. 6, p. 869–880, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03787788100000229>> Acesso em: 30 maio 2018

BRASIL. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993. **Diário Oficial da União**, Brasília, 22 jun 1993

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União - edição extra**, Brasília, 30 dez 2009

BROWN, M. T. **Caracterização petrológica e química dos carvões utilizados em usinas termelétricas brasileiras e as cinzas geradas no processo de combustão**. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geociência)- Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38631/000824140.pdf?sequence=1>> Acesso em: 20 maio 2018

BRUNDTLAND, G. H. **World commission on environment and development**. Nova Iorque: Organização das Nações Unidas, 1987. Disponível em: <<http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>> Acesso em: 02 maio 2018

BRYAN WALSH. Why the real victim of overpopulation will be the environment. 2011. Disponível em: <http://content.time.com/time/specials/packages/article/0,28804,2097720_2097782_2097814,00.html> Acesso em: 15 abril 2018

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-6X6R77/disserta__o_final1.pdf?sequence=1> Acesso em: 02 jun 2018

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 197-1: Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements**. Bruxelas, 2000.

CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa: cenário em 2020**. Brasília, 2014.

CHEN, C. et al. LCA Allocation Procedure Used as an Incentive Method for Waste Recycling: an Application to Mineral Additions in Concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 54, n. 12, p. 1231–1240, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.04.001>> Acesso em: 02 jun 2018

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. **Diálogos setoriais brasil e união europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. 1. ed. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2015.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento portland pozolânico na região de Curitiba, Paraná - Brasil**. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/24061/Mestrado%20JLC%20texto%20Revisado-12052010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 20 jun. 2018

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: Setor Cimenteiro**. Brasília: 2010. 66f.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A indústria brasileira do cimento: base para a construção do desenvolvimento**. Brasília: 2012a. 61 f.. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002162355200901e.pdf> Acesso em: 20 maio 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília: 2012b. 53 f. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/livro_cni.pdf> Acesso em: 25 maio 2018.

COURARD, L.; MICHEL, F. Limestone Fillers Cement Based Composites: Effects of Blast Furnace Slags on Fresh and Hardened Properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 51, p. 439–445, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813009975>> Acesso em: 05 jun 2018.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **The cement sustainability initiative: our agenda for action**. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2002 . Disponível em: <<https://www.wbcscement.org/documents/Agenda-for-Action.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2018

CURRAN, M. A. A Brief History of Life-Cycle Assessment. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**, [s. l.], p. 2-5, 2006. Disponível em < <https://www.e-education.psu.edu/egee401/sites/www.e-education.psu.edu/egee401/files/A%20Brief%20History%20of%20Life-Cycle%20Assessment.pdf>> Acesso em: 23 abril 2018

DE ARAUJO, A. P.; FERNANDES, L. O Passivo Ambiental do Fosfogesso Gerado nas Indústrias de Fertilizantes Fosfatados e as Possibilidades de Aproveitamento. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.9, n.16, p 2952-2965, 2013. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/multidisciplinar/o_passivo_ambiental.pdf> Acesso em: 15 jun 2018

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário mineral**. Brasília: 2015. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>> Acesso em: 11 jun 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2017: Relatório Final**, Rio de Janeiro, 2017. 296 f. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf> Acesso em: 03 ago. 2018.

EUROPEAN COMMISSION. **Directive 2008/98/EC** of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste. Bruxelas, 2008.

FELLER, M. R. **Promoting sustainable design through life-cycle assessment applications**. 2014. Disponível em: <<https://continuingeducation.bnpmmedia.com/courses/tally/promoting-sustainable-design-through-life-cycle-assessment-applications/1/>> Acesso em: 03 maio 2018.

FOUNDRY GATE. **Preços de ferro gusa**. 2018. Disponível em: <<http://foundrygate.com/br/noticias/ver/4487/precos-de-ferro-gusa-e-da-sucata-de-aco-estao-nas-alturas>>. Acesso em: 20 set 2018.

FROENER, M. S. **Valorização de cinza de fundo por meio da síntese de ligantes geopoliméricos: otimização de traços em pasta e avaliação dos sistemas em argamassas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/148735>> Acesso em: 20 jun 2018

GELOWITZ, M. D. C; MCARTHUR, J. J. Investigating the Effect of Environmental Product Declaration Adoption in LEED® on the Construction Industry: A Case Study. **Procedia Engineering**, [s.l.], v.145,p. 58-65, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816300182>> Acesso em: 22 nov 2018

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Earth overshoot day**. 2017. Disponível em: <<https://www.footprintnetwork.org/>> Acesso em: 03 abril 2018.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Living planet: report 2016: risk and resilience in a new era**. Estocolmo. 2016. 149 f. Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/content/documents/2016_Living_Planet_Report_Lo.pdf> Acesso em: 22 nov 2018.

GROEN, E. A. et al. Methods for Uncertainty Propagation in Life Cycle Assessment. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 62, p. 316–325, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815214002953#bib4>>. Acesso em: 12 maio 2018.

GUERREIRO, A. **Avaliação do ciclo de vida dos cimentos de produção mais significativa no brasil**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/110112>>. Acesso em: 20 abril 2018.

GUINÉE, J. Handbook on Life Cycle Assessment — Operational Guide to the ISO Standards. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 255–255, 2001. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02978784>> Acesso em: 05 maio 2018

GUINÉE, J. B. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction – Civil engineering and buildings**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 9–11, 2012. Disponível em: <<http://www.rilem.net/images/publis/917db4447994958c78e8f7a51ca2677d.pdf>> Acesso em: 05 maio 2018

HELTON, J. C. et al. Survey of Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, [s. l.], v. 91, n. 10–11, p. 1175–1209, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832005002292>>. Acesso em: 12 maio 2018.

HISCHIER, R. et al. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2 (2010). **ecoinvent Report No. 3**, São Galo, n. 3, p. 176, 2010. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf> Acesso em: 25 maio 2018.

HONGXIANG, C.; WEI, C. Uncertainty Analysis By Monte Carlo Simulation in a Life Cycle Assessment of Water-Saving Project in Green Buildings. **Information Technology Journal**, [s. l.], v. 12, n. 13, p. 2593–2598, 2013. Disponível em: <<https://scialert.net/fulltextmobile/?doi=itj.2013.2593.2598>> Acesso em: 13 jun 2018

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro: 2014. 49 f. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/relatorio_sustentabilidade_2014.pdf> Acesso em: 03 jun 2018

INTERCEMENT. **Relatório anual 2017**. São Paulo: 2017. 62f. Disponível em <<http://www.intercement.com/sites/ra2017/>> Acesso em: 24 nov 2018

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: mitigation of climate change: summary for policy makers and technical summary**. Genebra: 2014. 161 f.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global warming of 1,5 °C: summary for policy makers**. Genebra: 2018. 32 f.

LO, S.-C.; MA, H.; LO, S.-L. Quantifying and Reducing Uncertainty in Life Cycle Assessment Using the Bayesian Monte Carlo Method. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 340, n. 1–3, p. 23–33, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V78-4DTSKH4-2/2/0f6d635503b050fd17500876405dea5c>> Acesso em: 07 jun 2018

LOTENBACH, B. et al. Influence of Limestone on the Hydration Of Portland Cements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 38, n. 6, p. 848–860, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884608000161>> Acesso em: 05 jun 2018

LUNET, N.; SEVERO, M.; BARROS, H. Desvio Padrão ou Erro Padrão. **Arquivos de Medicina**, Porto, v. 20, n. 1–2, p. 55–56, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-34132006000100008> Acesso em: 05 out 2018

M. JOHN, V.; AGOPYAN, V. Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2000, São Paulo. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/V_Agopyan/publication/267250940_RECICLAGEM_DE_ESCORIA_DE_ALTO_FORNO_NO_BRASIL/links/544fe7720cf24e8f7374ab22/RECICLAGEM-DE-ESCORIA-DE-ALTO-FORNO-NO-BRASIL.pdf> Acesso em: 26 maio 2018

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, V.; IRASSAR, E. F. Strength Development of Ternary Blended Cement With Limestone Filler and Blast-Furnace Slag. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 25, n. 61–67, p. 55–56, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946501000567>> Acesso em: 28 maio 2018

MILÀ I CANALS, L. et al. Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 5–15, 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1065/lca2006.05.250>> Acesso em: 06 maio 2018

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al. Estratégias para a Minimização da Emissão de Co2 de Concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167–181, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212014000400012&lng=pt&tlng=pt> Acesso em: 11 maio 2018

PASSUELLO, A. C. et al. **Geração e processamento de ICV's**. 2018. 85 lâminas. Apresentação em PowerPoint

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; ESPIRITO SANTO, B. C. Revisão da Literatura: aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Rev. Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro v.16, n.1, jan/mar 2011, 10p. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n1/a03v16n1.pdf>> Acesso em: 12 nov 2018

RODRIGUES, T. O. **Introdução à metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV**. 2015. 190 lâminas. Apresentação em PowerPoint.

ROHDE, G. M. et al. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: Aspectos Técnicos e Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

SAADE, M. R. M. et al. Aplicação da Análise do Ciclo de Vida na Construção Civil : discussão sobre alocação de impactos entre o aço e suas escórias. **PARC-Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v.1, n.6, p.97-114, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8634489>> Acesso em: 28 maio 2018

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G. Da; GOMES, V. Appropriateness of Environmental Impact Distribution Methods to Model Blast Furnace Slag Recycling in Cement Making. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 99, p. 40–47, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915000567>> Acesso em: 02 jun 2018

SINDICATO NACIONAL DE INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual**. Rio de Janeiro, 2013. 40f. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf> Acesso em: 22 maio 2018

SONNEMANN, G. W.; SCHUHMACHER, M.; CASTELLS, F. Uncertainty Assessment By a Monte Carlo Simulation in a Life Cycle Inventory of Electricity Produced By a Waste Incinerator. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 279–292, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652602000288>> Acesso em: 12 jun 2018

STRANDDORF, K. et al. Impact Categories, Normalisation and Weighting in LCA. **Environmental News**, [s. l.], v. 78, p. 90, 2005. Disponível em: <<http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-574-3/pdf/87-7614-575-1.pdf>> Acesso em: 03 maio 2018

TRACTEBEL. **Complexo termelétrico Jorge Lacerda**. 2014. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-termeletricas/complexo-termeletrico-jorge-lacerda>>. Acesso em: 20 set 2018.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental Impact and Life Cycle Assessment (LCA) of Traditional and “Green” Concretes: Literature Review and Theoretical Calculations. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 34, n. 4, p. 431–442, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512000054>> Acesso em: 04 jun 2018

WEIDEMA, B. P. et al. **Overview and methodology**: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. St. Gallen: The ecoinvent Centre, 2013. 169f. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf> Acesso em: 10 jun 2018

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Toward a sustainable cement industry**. Geneva: The Business of Innovation, 2002. 64f. Disponível em: <<https://www.wbcds.org/Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Toward-a-Sustainable-Cement-Industry>> Acesso em: 02 jun 2018

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Recycling concrete**: The Cement Sustainability Initiative. Geneva: 2009. 42f. Disponível em: <<https://www.wbcdcement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>> Acesso em: 02 jun 2018

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement industry energy and CO₂ performance**: “Getting the Numbers Right”, Geneva:, p. 44, 2016. Disponível em: <<http://wbcdpublications.org/project/cement-industry-energy-and-co2-performance-getting-the-numbers-right/>> Acesso em: 22 maio 2018

WORRELL, E. et al. Carbon Dioxide Emissions From the Global Cement Industry. **Annual Review of Energy and the Environment**, [s. l.], v. 26, p. 303–329, 2001. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.26.1.303>> Acesso em: 05 jun 2018

ZANGHELINI, G. M. et al. A Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil na Última Década. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 4., 2014, São Bernardo do Campo. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268818328_A_Aplicacao_da_Avaliacao_d_o_Ciclo_de_Vida_no_Brasil_na_Ultima_Decada> Acesso em: 24 maio 2018