

Maíra Miguel Bilar

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA VERTICAL
DE VEDAÇÃO COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Malik Cheriaf

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bilar, Maira Miguel
ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA VERTICAL DE
VEDAÇÃO COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA / Maira Miguel Bilar ;
orientador, Malik Cheriaf - Florianópolis, SC, 2016.
197 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Análise do ciclo de vida. 3.
Sistema vertical de vedação. 4. Cinza pesada. 5.
Sustentabilidade. I. Cheriaf, Malik. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Maíra Miguel Bilar

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA VERTICAL
DE VEDAÇÃO COM ADIÇÃO DE CINZA PESADA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 01 de março de 2016.

Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Malik Cheriaf
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia
Universidade Federal de Santa Maria (videoconferência)

Prof. Dr. Antonio Edesio Jungles
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Luis Alberto Gómez
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho, com muito amor, àqueles que dão sentido à tudo: meu filho, meu marido e minhas irmãs.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Malik Cheriaf, por acreditar e orientar este trabalho, sempre com plena dedicação. Muito obrigado.

A professora Dr^a Janaíde Cavalcante Rocha pelos ensinamentos durante o curso e pela oportunidade do estágio docência.

Aos professores Dr. Geraldo Cechella Isaia, Dr. Antônio Edésio Jungles e Dr. Luis Alberto Gómez por aceitarem o convite para compor a banca examinadora deste trabalho.

Aos amigos e colegas que fiz durante o curso, Carol, Fabiane, Flávia, Frederico, Henrique, Mayara, Leiliane, Paula, Pojucan e Thaíse, muito obrigada por terem compartilhado este caminho comigo.

As empresas Toniolo Pré-Moldados Ltda., Manoel Martins ME, PLM Construções e Comércio LTDA e Tractebel Energia S.A., que disponibilizaram informações que permitiram a realização desta pesquisa.

A UFSC, ao PPGEC (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) e ao CNPq pelo incentivo, pela bolsa de estudos e amparo a pesquisa.

E em especial a minha família por estarem incondicionalmente ao meu lado.

Mede o que é mensurável e torna
mensurável o que não é.
(Galileu Galilei)

RESUMO

A cinza pesada do carvão é um resíduo industrial disponível em grande escala na região sul do Brasil, que tem sido pesquisado pelo grupo de Valorização de Resíduos Industriais (ValoRes) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para ser utilizado como um material de baixo impacto ambiental em matrizes cimentícias. Porém, existem poucos estudos que avaliam o desempenho ambiental deste tipo de material. Neste estudo o método da avaliação do ciclo de vida (ACV) foi aplicado em um estudo de caso comparativo, entre um sistema vertical de vedação convencional e outro contendo adição de cinza pesada (CzP). A unidade funcional definida é um metro quadrado do sistema vertical de vedação do protótipo de habitação popular construído na UFSC. Este estudo considera as etapas do ciclo de vida das matérias-primas utilizadas para a confecção dos produtos, incluindo: extração da matéria-prima, produção dos materiais e transporte para distribuição, considerando ainda o consumo de combustíveis para o transporte nas mudanças de fase e consumo de recursos para a produção dos subsistemas. São consideradas o cálculo das questões referente aos fluxos de entrada (consumo de recursos naturais, consumo de materiais e combustíveis e consumo de recursos energético) e de saída (resíduos, emissões para o ar, emissões para água e emissões para o solo), ao longo do ciclo de vida do sistema do produto. As categorias de impacto analisadas são as disponíveis no método CML (GUINÉE *et al.*, 2002): acidificação, esgotamento dos recursos abióticos, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico, potencial de aquecimento global, toxicidade humana e uso do solo. Além desses indicadores, o consumo de água e de energia também foi calculado, pois é uma forte preocupação na engenharia civil. Os cálculos foram realizados com auxílio da ferramenta de apoio SimaPro versão 8 *faculty* (PRé, 2016), que é uma ferramenta de comparação de produtos. O estudo demonstra que para as categorias analisadas o uso da cinza pesada contribui para redução dos impactos globais, exceto para a categoria de impacto potencial de aquecimento global, em que os resultados são semelhantes nos dois cenários.

Palavras-chave: análise do ciclo de vida. cinza pesada. sistema vertical de vedação.

ABSTRACT

The bottom ash is an industrial residue available on a large scale in southern Brazil, which has been researched by the study group Valuation of Industrial Waste (ValoRes) of the University Federal os Santa Catarina (UFSC) to be used as a low environmental impact material in cement matrices. However, there are limited studies available to assess the environmental performance of this type of material. In this study the life cycle assessment method (LCA) was applied in the case of a comparative study between a conventional masonry wall system and other containing the addition of bottom ash. The functional unit is one meter square of masonry wall system of prototype housing built at UFSC. This study considers the stages of the life cycle of raw materials used for the manufacture of products, including: extraction of raw materials, production of materials and transport to distribution, also considering the consumption of fuels for transportation in the phase changes and resource consumption for the production of subsystems. Are considered the calculation of issues related to flows (consumption of resources, consumption of energy resources and consumption of materials and fuels) and output (waste and emissions), the system throughout the product lifecycle. Analyzed the impact categories are available at method CML (GUINÉE *et al.*, 2002): acidification, depletion of abiotic resources, eutrophication, photochemical ozone formation, global warming potential, human toxicity and land use. In addition to these indicators, the consumption of water and energy was also calculated because it is a strong concern in civil engineering. Calculations were performed with the help of version SimaPro 8 *faculty* (PRé, 2016), which is a product comparison tool. The study shows that for the categories analyzed the use of bottom ash helps reduce the global impacts, except for the potential impact category global warming, where the results were similar in both scenarios.

Keywords: Life cycle analysis. bottom ash. masonry wall system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas para a realização de uma ACV.....	38
Figura 2 - Procedimentos simplificados para análise do inventário.....	41
Figura 3 - Quadro esquemático de categorias de impacto para modelagem de caracterização em níveis de ponto médio e de ponto final.	50
Figura 4 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	64
Figura 5 – Planta baixa do protótipo de habitação popular	66
Figura 6 – Corte AA do protótipo de habitação popular.....	67
Figura 7 - Cálculo dos valores do fluxo de referência.	77
Figura 8 - Sistema do produto vedação vertical.	78
Figura 9 - Definição do limite do sistema.	79
Figura 10 – Limite do sistema do CP.....	98
Figura 11 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema dos CP's.	98
Figura 12 – Limite do sistema da cal hidratada.....	101
Figura 13 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da cal.	101
Figura 14 – Limite do sistema da areia.	103
Figura 15 – Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da areia.	105
Figura 16 – Limite do sistema da brita.....	109
Figura 17 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da brita.....	111
Figura 18 – Limite do sistema da CzP.	115
Figura 19 – Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da CzP.	119
Figura 20 – Limite do sistema do bloco de concreto.	126
Figura 21 – Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema do bloco de concreto.	128
Figura 22 – Limite do sistema da argamassa de revestimento e de assentamento.	130
Figura 23 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema.	131
Figura 24 – Resultado da AICV por tonelada de areia.....	141
Figura 25 – Resultado da AICV por tonelada de brita.....	143
Figura 26 – Resultado da AICV por tonelada de CzP.....	147
Figura 27 – Contribuição do aterro evitado.....	148
Figura 28 – Resultado da AICV comparativa entre uma tonelada de areia e uma tonelada de cinza pesada.....	149

Figura 29 – Resultado da categoria acidificação para os cenários A e B	151
Figura 30 – Resultado da categoria esgotamento de recursos abióticos para os cenários A e B	151
Figura 31 – Resultado da categoria eutrofização para os cenários A e B	152
Figura 32 - Resultado da categoria formação de ozônio fotoquímico para os cenários A e B	152
Figura 33 - Resultado da categoria toxicidade humana para os cenários A e B	153
Figura 34 – Resultado da categoria potencial de aquecimento global para os cenários A e B	153
Figura 35 – Resultado da categoria uso do solo para os cenários A e B	154
Figura 36 – Resultado do consumo de energia para os cenários A e B	155
Figura 37 – Resultado do consumo de água para os cenários A e B..	155
Figura 38 – Comparação dos cenários A e B.....	157
Figura 39 – Comparação dos cenários A e B com atribuição de 100% do valor da CzL.....	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil.	58
Tabela 2 – Taxa de aproveitamento dos resíduos da combustão de carvão por país.	59
Tabela 3 - Identificação dos blocos utilizados no protótipo.	68
Tabela 4 - Composição dos CP's utilizados no estudo.	71
Tabela 5 - Características físicas dos CP's utilizados no estudo.	71
Tabela 6 - Características físicas da cal.	72
Tabela 7 - Denominação comercial da brita.	73
Tabela 8 – Classificação comercial da areia.	74
Tabela 9 – Método de lavra da areia de acordo com a ocorrência.	74
Tabela 10 - Características físicas dos agregados.	75
Tabela 11 - Características físicas da CzP.	76
Tabela 12 - Total de insumo consumido por unidade funcional de cada cenário.	77
Tabela 13 - Substâncias química geradas na reação de detonação do explosivo.	85
Tabela 14 - Fatores de emissão por litro de óleo diesel utilizado em transporte rodoviário de frota pesada no Brasil.	85
Tabela 15 - Fatores de emissão por MWh de energia gerada na CTJL em 2013.	86
Tabela 16 - Emissão atmosférica de elementos-traço por termelétrica.	86
Tabela 17 - Consumo de combustível para deposição das cinzas da combustão do carvão.	87
Tabela 18 - ICV do carvão energético.	87
Tabela 19 - Consumo de combustíveis e energético para produção da cal virgem.	89
Tabela 20 - Consumo de energia e de combustível para produção do CP.	89
Tabela 21 – Fatores de emissão de CO ₂ por tipo de combustível.	90
Tabela 22 – Energia embutida por tipo de combustível.	90
Tabela 23 - Preço mínimo para comercialização das CCCs.	91
Tabela 24 – Valor presente do preço mínimo para comercialização das CCCs.	91
Tabela 25 - Procedimento de determinação dos indicadores de categoria.	92
Tabela 26 -Fatores de equivalência para caracterização do PAG horizonte de 100 anos.	94

Tabela 27 –ICV’s dos CP’s.	98
Tabela 28 –ICV da cal hidratada.....	101
Tabela 29 - Produção mensal de areia.....	104
Tabela 30 - ICV da areia.	106
Tabela 31 - Produção mensal de brita.	108
Tabela 32 - Equipamentos utilizados para a etapa de beneficiamento.	111
Tabela 33 - ICV da brita.....	112
Tabela 34 - Dados operacionais da CTJL, ano base 2013.....	117
Tabela 35 - Dados operacionais da UTLC, ano base 2013.	118
Tabela 36 - ICV da CzP.	120
Tabela 37 - Total de insumo consumido por subsistema de cada cenário.	125
Tabela 38 – Equipamentos utilizados no processo produtivo do bloco de concreto.....	127
Tabela 39 - ICV do bloco de concreto.	128
Tabela 40 - ICV da argamassa de revestimento.	131
Tabela 41 - ICV da argamassa de assentamento.	132
Tabela 42 - ICV do sistema vertical de vedação convencional.....	133
Tabela 43 - ICV do sistema vertical de vedação com adição de CzP.	136
Tabela 44 – Resultado da AICV por tonelada de areia	140
Tabela 45 - Resultado da AICV por tonelada de brita	143
Tabela 46 - Resultado da AICV por tonelada de CzP.....	145
Tabela 47 - Resultado da AICV do cenário A	150
Tabela 48 - Resultado da AICV do cenário B.....	150
Tabela 49 - Origem do consumo de água na AICV do bloco de concreto	156
Tabela 50 - Origem do consumo de água na AICV da argamassa de revestimento.....	156
Tabela 51 - Resultado do AICV da cinza pesada com atribuição 100% do valor da CzL.....	159
Tabela 52 – Diferença entre os resultados obtidos para o cenário B..	159
Tabela 53 - Diferença entre os resultados obtidos para o cenário B. .	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACAA	<i>American Coal Ash Association</i>
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFO	<i>Ammonium Nitrate and Fuel Oil,</i>
BEES	<i>Building for Environment and Economic Sustainability</i>
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil
CCB	<i>Coal Combustion By-Product</i>
CEC	Comissão de Estudos de Combustíveis
CML	Institute of Environmental Sciences of Leiden
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPM	<i>Competence Centre for Environmental Assessment of Product and Material System</i>
CTJL	Complexo termelétrico Jorge Lacerda
CzP	Cinza pesada
ECOBA	<i>European Coal Combustion Products Association</i>
EFCA	<i>European Federation of Concrete Admixture</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
eq.	equivalente
FGD	<i>Flue Gas Desulfurization</i>
GCOI	Grupo Coordenador para Operação Interligada
GEE	Gases de Efeito Estufa
HABITARE	Programa de Tecnologia de Habitação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
INCC	Índice Nacional de Custo da Construção

IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JRC-IES	<i>Joint Research Centre – Institute for Environmental and Sustainability</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material particulado
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NPC	Núcleo de Pesquisa em Construção
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
ROM	<i>run-of-mine</i>
SBCI	<i>Sustainable Buildings & Climate Initiative</i>
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
Unb	Universidade de Brasília
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ValoRes	Valorização de Resíduos Industriais
VOC	Compostos orgânicos voláteis
WCED	<i>World Commission on Environment and Development</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

As	Arsênio
Be	Berílio
C	Carbono
°C	Graus Celsius
CaCO₃	Calcário
CaO	Óxido de cálcio
Cd	Cádmio
C₂H₄	Etileno
C₆H₄Cl₂	Diclorobenzeno
CH₂	Óleo diesel
CH₄	Metano
Co	Cobalto
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
dm³	Decímetro cúbico
g	Grama
Gt	Gigatoneladas (1 bilhão de tonelada)
kg	Quilograma
h	Hora
H₂O	Água
HFCs	Hidrofluorcarbonos
Hg	Mercúrio
km	Quilometros
kWh	Quilowatt-hora
l	Litro
m²	Metro quadrado
m³	Metro cúbico
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
MJ	Megajoule
mm	Milímetros

Mn	Manganês
MWh	Megawatt-hora
N	Nitrogênio
N₂	Gás Nitrogênio
N₂H₄O₃	Nitrato de amônio
N₂O	Óxido nitroso
Ni	Níquel
NO_x	Óxidos de nitrogênio
O₃	Ozônio
P	Fósforo
PAN	Peroxiacetil nitrato
Pb	Chumbo
PFCs	Perfluorcarbonos
PO₄	Fosfato
Sb	Antimônio
Se	Selênio
SF₆	Hexafluoreto de enxofre
SO₂	Dióxido de enxofre
t	Tonelada
TJ	Terajoule

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Objetivo Geral	27
1.1.2 Objetivos Específicos	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SUA INTERPRETAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	29
2.1.1 Desenvolvimento Sustentável na Construção Civil	31
2.1.1.1 Construções sustentáveis: O que é?.....	33
2.1.2 Normalização da sustentabilidade na construção civil	35
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	36
2.2.1 Fases de uma ACV	38
2.2.1.1 <i>Definição de objetivo e escopo</i>	39
2.2.1.2 <i>Análise do inventário do ciclo de vida (ICV)</i>	40
2.2.1.2.1 Como lidar com processos multifuncionais	43
2.2.1.2.2 Banco de dados.....	44
2.2.1.2.3 Ferramentas de apoio para a realização da ACV.....	46
2.2.1.3 <i>Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)</i>	47
2.2.1.3.1 Métodos para a avaliação de impactos	49
2.2.1.4 <i>Interpretação dos resultados</i>	51
2.2.2 ACV simplificada	52
2.2.3 Aplicações da ACV na construção civil	53
2.2.4 Pesquisas relacionadas aos materiais e componentes da construção	55
2.3 AS TERMELÉTRICAS A CARVÃO MINERAL: RESÍDUOS GERADOS E SUAS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL	57
2.3.1 Resíduos gerados pelas termelétricas a carvão mineral	59
2.3.2 Aplicações dos resíduos da combustão do carvão na construção civil	60
3 MÉTODO	63
3.1 ESTUDO DE CASO.....	65
3.1.1 Etapa 1: Definição de objetivo e escopo.....	76
3.1.1.2.1 <i>Definições dos sistemas de produto</i>	78
3.1.1.2.2 <i>Fronteira do sistema</i>	79

3.1.1.2.3	<i>Procedimento de alocação</i>	80
3.1.1.2.4	<i>Seleção de impactos e metodologia de avaliação</i>	81
3.1.1.2.5	<i>Requisitos de qualidade dos dados</i>	83
3.1.2	Etapa 2: Análise do ICV	83
3.1.3	Etapa 3: Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	92
3.1.4	Etapa 4: Interpretação do ciclo de vida	95
4	RESULTADOS	97
4.1	ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)	97
4.1.1	Inventário dos insumos	97
4.1.1.1	ICV dos CP's	97
4.1.1.2	ICV da cal	100
4.1.1.3	ICV da areia	103
4.1.1.4	ICV da brita	108
4.1.1.5	ICV da CzP	114
4.1.2	ICV's dos subsistemas	124
4.1.2.1	ICV do bloco de concreto	125
4.1.2.2	ICV das argamassas	130
4.1.3	ICV do sistema vertical de vedação	133
4.2	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)	140
4.1.3	AICV dos insumos	140
4.1.4	AICV do sistema do produto dos cenários A e B	149
4.3	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	158
5	CONCLUSÃO	163
6	REFERÊNCIAS	165
	APÊNDICE A - Modelo de questionário para a coleta de dados ...	181
	APÊNDICE B - Cálculo emissões atmosféricas CTJL	191
	APÊNDICE C - Cálculo de conversão para o valor presente do preço mínimo para comercialização das CCCs.	193
	APÊNDICE D - Consumo de água do CTJL	197

1 INTRODUÇÃO

O avanço do conhecimento sobre os impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil, determinou a necessidade de reformulação dos seus processos, implicando em uma mudança de visão em todo o seu fluxo de produção, desde a extração da matéria prima, fabricação, execução, uso e fim da vida.

Um dos grandes desafios que o setor tem de enfrentar é a preservação dos recursos naturais, a fim de garantir que estejam disponíveis para as gerações futuras. O uso extensivo de agregados naturais em obras de construção tem um papel importante para a avaliação dos impactos ambientais. Isto porque, a necessidade de preservação somada ao esgotamento de recursos naturais nas proximidades das áreas com alta demanda de consumo, acarreta no aumento da distância de transportes, que por sua vez aumenta o consumo de combustíveis fósseis, gerando ainda mais impacto.

Por outro lado as indústrias produzem grandes quantidades de resíduos industriais, como as cinzas da combustão do carvão, areia de fundição, resíduo da construção e demolição e, escórias de alto-forno, que causam um pesado fardo sobre os aterros (CHOWDHURY; APUL; FRY, 2010).

Neste contexto, a reciclagem e o reaproveitamento de resíduos como substitutos de agregados naturais tem recebido destaque em pesquisas científicas, sendo apontada como uma solução. Uma vez que evita a deposição dos resíduos, preserva os recursos naturais não renováveis, evita o desmatamento e remoção da camada vegetal, bem como o uso de explosivos responsáveis por altos índices de poluição atmosférica.

Há que se considerar, a economia de energia para a produção dos materiais e componentes para posterior utilização na indústria da construção civil, tendo em vista que os materiais já entram em um novo ciclo com energia incorporada.

Dentre os resíduos industriais disponíveis na região Sul, merece destaque as cinzas provenientes da combustão do carvão mineral, uma vez que grande parte das termelétricas instaladas no país estão nesta região. No complexo termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), localizado no município de Capivari de Baixo em Santa Catarina (SC), no ano de 2013 para cada 100 toneladas (t) de carvão mineral consumidas, foram geradas 40 t de cinzas, das quais 84% são cinzas volantes, que são extraídas por vias secas, e 26% são de cinzas pesadas, que são extraídas por via úmida.

Devido às suas características físico-químicas, nos últimos anos as cinzas volante tem sido integralmente utilizadas pela cadeia produtiva do cimento, enquanto o aproveitamento das cinzas pesadas ainda é baixo, sendo, depositadas em bacias de decantação que dependem de grandes áreas. Onde são estocadas até que sejam coletadas, quando, por sua vez, são destinadas preferencialmente para recuperação de áreas degradadas.

Estes fatos, motivaram o desenvolvimento de trabalhos que propõem a utilização da cinza pesada em substituição da areia para a confecção de argamassa e de concreto, elaborados pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo grupo de Valorização de Resíduos Industriais (ValoRes). Os estudos apresentam resultados satisfatórios relacionados às suas propriedades no estado fresco e endurecido, e podem ser consultados em: Andrade (2008), Duailibi (2008), Mustelier (2008), Santos (2006), Silveira, Rocha e Cheriaf (2004), Andrade (2004), Margon (2002), Mustelier (2002), Kreuz (2002), Lenzi (2001), Pozzobon (1999).

Este trabalho visa complementar as pesquisas desenvolvidas, porém sob a ótica ambiental, através da análise das intervenções referentes aos fluxos de consumo de energia, consumo de recursos naturais e emissões para o ar, água e solo ao longo do ciclo de vida.

Como os impactos ambientais são influenciados por características regionais, a análise é aplicada a um estudo de caso. O estudo de caso é um protótipo de habitação de interesse social (Finep/CEF), construído em 2003, na UFSC. A análise envolveu um estudo comparativo entre um sistema vertical de vedação convencional e outro contendo adição de cinza pesada (CzP).

A identificação de produtos sustentáveis não é uma tarefa fácil. Para a estimativa dos aspectos ambientais, existem uma série de critérios interdependentes e métodos de avaliação disponíveis. Sendo neste trabalho adotado a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

A escolha pela ACV é justificada por ser uma metodologia amplamente aceita na literatura, sendo reconhecida como inovadora e que melhora a sustentabilidade na indústria da construção civil (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). Além, de apresentar rigor científico e ser um método padronizado pela *International Organization for Standardization* (ISO), como parte da série de normas de gestão ambiental 14000, que engloba a série 14040 (ABNT NBR ISO, 2009a, ABNT NBR ISO, 2009b).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar o método da avaliação do ciclo de vida (ACV) simplificada, do berço ao portão, em um estudo de caso comparativo entre um sistema vertical de vedação convencional e outro contendo adição de cinza pesada (CzP).

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Colaborar para elaboração dos inventários da areia, brita, cinza pesada e do bloco de concreto, com base em dados primários, de forma a contribuir para elaboração de um banco de dados que representem a indústria nacional;
- b) Estimar o consumo de recursos naturais, consumo de recursos energético e consumo de materiais e de combustíveis para as etapas envolvidas na análise *cradle to gate* (berço ao portão), do sistema vertical de vedação, incluindo: extração da matéria-prima, produção dos materiais e transporte para distribuição, considerando ainda o consumo de combustíveis para o transporte nas mudanças de fase;
- c) Comparar os resultados de impacto dos cenários analisados para as categorias disponíveis no método CML (GUINÉE *et al.*, 2002): acidificação, esgotamento dos recursos abióticos, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico, potencial de aquecimento global, toxicidade humana e uso do solo, além do consumo de água e de energia;
- d) Aplicar o critério de alocação econômico na realização do inventário da CzP e verificar através da análise de sensibilidade a influência do valor atribuído nos resultados e conclusões do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado o primeiro passo do projeto de pesquisa, que envolve a revisão da literatura. Inicialmente será contextualizado os conceitos de desenvolvimento sustentável e sua interpretação na construção civil e normalizações pertinentes.

No item seguinte a metodologia da ACV e seus desenvolvimentos recentes são apresentados, com destaque para a sua aplicação na indústria da construção civil e a definição de ACV simplificada.

No item final são apresentados os princípios de funcionamento das termelétricas a carvão, bem como a definição dos resíduos gerados e as possibilidades para o seu reaproveitamento na construção civil.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SUA INTERPRETAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Historicamente, a preocupação com questões ambientais em escala global, surgiu através de previsões pessimistas, atreladas à ideia de que o crescimento populacional resultaria em maior demanda de consumo e conseqüentemente no esgotamento de recursos. Sua estrutura teórica evoluiu após a publicação do relatório “Os limites do Crescimento”, em 1972, pelo Clube de Roma (MEADOWS *et al.*, 1972).

No mesmo ano, as Nações Unidas realizaram a Conferência sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo. Esse evento é considerado um divisor de águas, devido ao impulso e as séries de recomendações que desencadeou, levando posteriormente à criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Após a realização de audiências mundiais, em 1987, é publicado pela Comissão de Brundtland o relatório de conclusão denominado “Nosso Futuro Comum”, que incorpora formalmente o conceito de desenvolvimento sustentável, como sendo o desenvolvimento que atende às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender às suas próprias necessidades (WCED, 1987).

Com base nas problemáticas apontadas pelo documento, em 1992, é realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também conhecida como Eco-92 que resultou na criação da Agenda 21 (CICIN-SAIN, 1996).

A Agenda 21 propõe a interpretação prática do conceito de desenvolvimento sustentável, na tentativa de equilibrar os parâmetros de

proteção ambiental com as preocupações sociais e econômicas, além de enfatizar a importância da gestão dos recursos naturais de forma responsável (CNUMAD, 1996).

Desde a sua origem, a conceituação de desenvolvimento sustentável, apresentada por Brundtland, passou a ser um dos aspectos centrais nos debates que se seguiram. Apesar de amplamente difundida, alguns autores a consideram bastante vaga, desencadeando em uma multiplicidade de interpretações (GONCZ *et al.*, 2007, ZACCAI, 2012, BERARDI, 2013).

Os termos "desenvolvimento" e "sustentável" são as principais fontes de confusão. Muitas vezes criticados por descrever duas ideologias opostas (LÉLÉ, 1991, MITCHAM, 1995, GONCZ *et al.*, 2007, BAUGARTNER, 2011), uma vez que sustentabilidade é interpretada como um conceito que defende a preservação das condições ambientais atuais, e, desenvolvimento como uma abordagem progressista atrelada ao crescimento econômico.

Para CIB & UNEP-IETC (2002) as críticas podem ser suprimidas, ao interpretar o desenvolvimento não como um objetivo, mas, como o processo de manter um equilíbrio dinâmico entre as exigências dos seres humanos e o que é ecologicamente possível. O desenvolvimento também não é só visto no seu significado restrito de crescimento, expansão e aquisição de conhecimento, mas como o progresso através da melhoria, evolução e busca de sabedoria.

Embora, a amplitude do tema ainda esteja em evolução, uma vez que envolve diferentes setores e interesses, o tripé da sustentabilidade parece possuir ampla aceitação na escolha das questões primordiais. O *triple bottom line* é baseado em um conceito bem conhecido, compartilhado por John Elkington, que visa a racionalização do desenvolvimento de forma a promover o crescimento econômico, porém mantendo a inclusão social e minimizando o impacto ambiental (UNEP, 2009).

Do ponto de vista ambiental, a orientação é a integridade ecológica através da prudência na utilização racional dos recursos naturais, limitando o emprego de recursos não renováveis, assim como daqueles prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, preservando a diversidade da vida e respeitando a capacidade de carga dos ecossistemas, reduzindo a geração de resíduos e poluentes, permitindo ao ecossistema absorver ou se readaptar as interferências antrópicas (MOEHLECKE, 2010).

Sob o ponto de vista social, exige uma maior equidade de oportunidades de acesso aos recursos de lazer, educação, trabalho, comércio e serviços, de forma que seja promovida a redução dos níveis

de exclusão social, respeitando a diversidade, em todas as suas formas de expressão, além, da democratização do uso do espaço urbano. Visando alcançar o desenvolvimento de sociedades justas, com maior coesão social (MOEHLECKE, 2010).

Sob o aspecto econômico, deve-se propiciar à sociedade o acesso aos recursos e oportunidades de forma igualitária. O foco está na criação de prosperidade para todos, e não apenas lucro para poucos, respeitando os limites do ecologicamente possível sem infringir sobre os direitos humanos básicos (CIB & UNEP-IETC, 2002).

É altamente improvável que todos os princípios de sustentabilidade, implícitos nas declarações acima, sejam alcançados em todos os momentos, pois têm requisitos contraditórios. Na maioria das vezes, os tomadores de decisão terão que fazer escolhas de forma que equilibrem as exigências. Estas decisões precisam ser flexíveis e revistas continuamente a fim de manter os três sistemas em equilíbrio assegurando que uma esfera não seja desenvolvida em detrimento das demais (CIB & UNEP-IETC, 2002).

2.1.1 Desenvolvimento Sustentável na Construção Civil

Após a formulação da Agenda 21 como modelo internacional para o desenvolvimento sustentável, todos os setores da sociedade passaram a reinterpretar os conceitos apresentados dentro de seus contextos específicos (CIB & UNEP-IETC, 2002).

Reconhecida como um setor fundamental para o desenvolvimento de um país, a indústria da construção civil, apesar de apresentar fatores positivos como: a contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB), a geração de emprego e a produção de edificações que satisfazem as necessidades dos seres humanos, como contraponto causa impactos negativos, uma vez que consome recursos, gera resíduos, emite gases de efeito estufa, ruído e poeira (ZUO; ZHAO, 2014).

No Brasil, de 2004 a 2010 o setor cresceu 42,41%, o que representa uma taxa média anual de 5,18% (CBIC, 2011). No ano de 2011, segundo dados divulgados pelo IBGE (2011), apesar da conjuntura internacional caracterizada pela crise fiscal na Europa e pelo baixo crescimento dos países desenvolvidos, a indústria nacional foi impulsionada pela demanda doméstica e pela maior oferta de crédito, registrando um crescimento de 3,6%, o que corresponde a 5,8% de participação no PIB nacional e enfatiza a sua representatividade.

Por outro lado, segundo a UNEP-SBCI (2009) os edifícios são responsáveis por mais de 40% do total do consumo de energia e 30% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento.

Estimativas realizadas com base nas projeções de alto crescimento da população mundial prevêem que as emissões de GEE totalize 37 gigatoneladas (Gt) de gás carbônico (CO₂) equivalente (eq.) até 2030 (UNEP, 2012).

Já, em termos de consumo de matéria-prima o setor é responsável por mais de três bilhões de toneladas em todo o mundo. Representando cerca de 40% do fluxo total da economia global (SAGHAFI; TESHNIZI, 2011). Além, dos fatores de consumo e emissões estima-se que as construção gerem aproximadamente 40% de todo o lixo produzido pelas atividades humanas (CIB, 1999).

Sob esta ótica, obras de engenharia tem sido, frequentemente, apontada como protagonistas na implantação de políticas mundiais rumo ao desenvolvimento sustentável, uma vez que apresentam grande potencial para redução de seus impactos (ISO, 2008, UNEP-SBCI, 2009). Segundo a ISO 21929-1 (ISO, 2011) o setor de construção civil é muito importante para o desenvolvimento sustentável, porque:

- a) é um setor chave na economia nacional;
- b) ele tem uma interface significativa com a redução da pobreza através dos serviços econômicos e sociais básicos previstos no ambiente construído e as potenciais oportunidades de se envolver os pobres na construção, operação e manutenção;
- c) é um dos maiores setores industriais e, ao fornecer valor e emprego, absorve recursos consideráveis, com consequentes impactos sobre as condições econômicas e sociais e do meio ambiente;
- d) cria-se o ambiente construído, o que representa uma parcela significativa dos ativos econômicos dos indivíduos, organizações e nações, fornecendo sociedades com ambiente físico e funcional;
- e) ele tem oportunidade considerável para melhoria em relação aos seus impactos econômicos, ambientais e sociais.

Devido a esses fatores, o setor da construção tem buscado identificar os danos causados pelas suas atividades, propondo soluções que melhorem as práticas construtivas e que conciliem o aumento da competitividade ao paradigma ambiental. Existindo uma extensa gama de medidas e tecnologias que podem ser adotadas para alcançar tais objetivos.

Para validar uma nova técnica em detrimento de outra, é necessário mensurar, através da análise de todo o ciclo de produção da edificação,

do sistema construtivo ou do material, os impactos relacionados a sua produção.

Essa mensuração não é uma tarefa fácil, existem uma série de critérios interdependentes e métodos de avaliação disponíveis. Desta forma, se faz necessário antes de apresentar o método de avaliação utilizado neste trabalho, compreender o que são construções sustentáveis e suas formas de mensuração.

2.1.1.1 Construções sustentáveis: O que é?

No que diz respeito à indústria da construção, o entendimento ou interpretação da sustentabilidade tem passado por mudanças ao longo dos anos. Após a crise energética na década de 1970, a medição do consumo de energia tornou-se medida de sustentabilidade para a avaliação das edificações. Enquanto isso, a consciência da sustentabilidade evoluiu, e atualmente o consumo energético é considerado apenas como um, entre outros parâmetros (BERARDI, 2011).

De acordo com a ISO 15392 (2008) a ideia básica de construções sustentáveis é que todas as obras devem cumprir os três aspectos principais do desenvolvimento sustentável: econômico, ambiental e social. Além disso, atender aos requisitos de desempenho técnico e funcional. Neste sentido, os limites conceituais considerados, e a quantidade de requisitos necessários, são ampliados de forma que as edificações satisfaçam todas as dimensões da sustentabilidade.

A busca pela identificação e definição dos requisitos sustentáveis no ambiente construído, acarretou em extensas pesquisas publicadas nos últimos anos, e ainda carece de uma definição clara. Berardi (2013) resume as interpretações recentes, estabelecendo que uma construção sustentável pode ser definida como uma unidade projetada e construída do berço ao túmulo de forma eficiente em termos de recursos, adotando os princípios ecológicos, equidade social e abordagem do ciclo de vida.

Robichaud e Anantatmula (2011) defendem que apesar de não existir uma definição única e amplamente aceita para construção sustentável, existem pontos comuns entre as filosofias, que segundo os autores se fundamentam em quatro pilares: (1) minimizar ou eliminar o impacto sobre o meio ambiente, o uso de recursos naturais e de fontes de energia não renováveis; (2) melhorar a saúde, bem-estar e produtividade dos usuários e da comunidade; (3) cultivar o desenvolvimento econômico e retorno financeiro para os principais interessados e comunidade; e (4)

considerar as abordagens do ciclo de vida no processo de planejamento e desenvolvimento.

Levando-se em consideração esses aspectos, do ponto de vista metodológico, o âmbito da avaliação ambiental é cada vez maior, marcando uma evolução a partir de um único critério de consideração, como o desempenho energético dos edifícios, no sentido de uma plena integração de todos os aspectos emergentes durante a vida útil de um edifício e seus elementos (ANASTASELOS; GIAMA; PAPADOULOS, 2009).

Este pensamento é compartilhado por Ding (2008) que afirmou que o uso de indicadores separados, ou benchmarks baseados em único critério, enfatizam a necessidade de uma ferramenta de avaliação abrangente que forneça uma visão completa do desempenho do edifício contra um amplo espectro de critérios ambientais.

Tal necessidade resultou no desenvolvimento de uma série de métodos de avaliação baseados em análises multicritérios, voltados para a construção civil, que receberam destaque após o lançamento, em 1990, de *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM), que serviu como referência para os inúmeros modelos lançados posteriormente (HAAPIO; VIITANIEMI, 2008, LEE, 2013).

Ao longo dos anos, a implementação e utilização destas ferramentas têm mostrado ser de enorme utilidade, contribuindo na promoção de um ambiente construído mais sustentável (DING, 2008, HAAPIO; VIITANIEMI, 2008, MATEUS; BRAGANÇA, 2011).

Nestes sistemas são elaborados quadros de avaliação, baseados em dados quantitativos e qualitativos de desempenho, adotando diferentes indicadores e requisitos, bem como, critérios distintos para determinar a pontuação em cada item estabelecido. Fatores de ponderação, são ou não utilizados como multiplicadores de forma a atribuir maior peso em determinados critérios. No final os pontos ou créditos são somados para determinar o resultado global.

Desta forma, uma melhor ou pior pontuação ou classificação depende diretamente da visão específica implícita na ferramenta adotada. Fato que, muitos autores apontam como um aspecto crítico, uma vez que, na maioria dos sistemas as razões por trás destas escolhas não estão explícitas, além de tradicionalmente privilegiar aspectos ambientais (BERARDI, 2011).

Como destacado por Haapio e Viitaniemi (2008) as ferramentas variam significativamente. Avaliações podem envolver a análise de processos, materiais, componentes da construção ou, por exemplo, edifícios inteiros. Além, de abranger diferentes fases do ciclo de vida e

assumir diferentes questões ambientais. Podendo ser global, regional e, em alguns casos, local. Algumas ferramentas nacionais podem ser utilizadas como ferramentas globais alterando as bases de dados. E são desenvolvidas para diferentes fins, por exemplo, pesquisa, consultoria, tomada de decisão e manutenção.

A discussão sobre todas as ferramentas disponíveis está além do escopo desta revisão, que incidirá sobre a ACV, uma vez que o seu uso tem sido frequentemente validado na literatura para análises de edifícios e seus componentes. A vantagem desta metodologia, é ir além do estudo tradicional que se concentra em uma única fase, estendendo a investigação a todas as fases da edificação (BUYLE; BAET; AUDENAERT, 2013, ZUO; ZHAO, 2014). Além, de apresentar rigor científico e ser um método padronizado pela *International Organization for Standardization* (ISO).

2.1.2 Normalização da sustentabilidade na construção civil

A necessidade de padronização da base teórica levou a criação recente do Comitê Técnico ISO 59, "construção civil", e sua Subcomissão 17, "Sustentabilidade na construção civil" para definir os requisitos padrões para as avaliações do desempenho ambiental dos edifícios. Resultando no desenvolvimento e publicação de padrões internacionais pela ISO, como segue:

- a) ISO 15392 - *Sustainability in building construction - General principles* (ISO, 2008): Esta norma estabelece os princípios gerais da sustentabilidade relacionada com os edifícios e obras de construção civil;
- b) ISO 21929-1 - *Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings* (ISO, 2011): Esta norma estabelece um processo para o desenvolvimento de indicadores nas análises da sustentabilidade de edifícios, baseado em um quadro específico que aborda as três dimensões da sustentabilidade (ambiental, econômico e social);
- c) ISO 21930 - *Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products* (ISO, 2007): Esta norma descreve os princípios e requisitos para a elaboração das declarações ambientais do tipo III dos produtos de construção fundamentadas na avaliação do ciclo de vida. A revisão desta norma está em andamento;

- d) ISO 21931-1 - *Sustainability in building construction - Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works - Part 1: Buildings* (ISO, 2010): Esta norma fornece um quadro geral para melhorar a qualidade e a comparabilidade dos métodos de avaliação do desempenho ambiental dos edifícios novos ou existentes; e
- e) ISO/TR 21932 - *Sustainability in buildings and civil engineering works - A review of terminology* (ISO, 2013): Este relatório técnico visa estabelecer uma terminologia consistente dos conceitos relacionados ao campo da sustentabilidade em edifícios e obras de engenharia civil.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida é um método definido como uma técnica, que visa abordar os aspectos ambientais de um produto, e seus potenciais impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida, incluindo a extração e produção da matéria-prima, fabricação, distribuição, uso, reuso, manutenção, reciclagem e disposição final, ou seja, do berço ao túmulo (UNEP, 2009).

Os estudos baseados no pensamento do ciclo de vida, foram originalmente desenvolvidos no final dos anos 1960, para a comparação de produtos, através da determinação e avaliação dos fluxos de entradas e saídas e seus potenciais impactos ambientais (GUINÉE *et al.*, 2011). A adoção da ACV permite comparar várias soluções possíveis, que cumprem a mesma exigência de desempenho, mas que diferem em termos de consequências ambientais (MATEUS *et al.*, 2013).

Na tentativa de estabelecer uma compreensão abrangente e permitir uma mensuração dos aspectos ambientais, a ACV é geralmente considerada como uma ferramenta de avaliação válida, sendo reconhecida como uma metodologia inovadora que melhora a sustentabilidade na indústria da construção civil (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009).

Em essência, a ACV é uma ferramenta analítica que permite considerar um edifício como um sistema, através da quantificação do fluxo de recursos, materiais e de energia ao longo do seu ciclo de vida (BUYLE; BAET; AUDENAERT, 2013, ZUO; ZHAO, 2014).

A perspectiva de análise integrada dos impactos em cada etapa da vida útil, ajuda a conter a transferência de carga, ou seja, a resolução de um problema criando outro, por exemplo: de uma fase para outra, de uma

região para outra, de uma geração para a outra ou entre os diferentes tipos de impactos sobre o ambiente natural e a saúde humana (JRC-IES, 2010a).

A ACV é um método padronizado pela ISO, como parte da série de normas de gestão ambiental 14000, que engloba a série 14040 que apresenta o padrão da metodologia. No Brasil, a transcrição das normas internacionais foi realizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e engloba:

- a) NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura (ABNT NBR ISO, 2009a): A norma apresenta a definição dos principais termos e descreve os princípios e a estrutura para se conduzir e relatar estudos de ACV, incluindo requisitos mínimos. No entanto, não descreve a técnica em detalhes e nem específica metodologias para as etapas individuais; e
- b) NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações (ABNT NBR ISO, 2009b): Especifica os requisitos e fornece orientações para a elaboração da ACV. Detalha a metodologia e deve ser utilizada em conjunto com a norma NBR ISO 14040.

A série internacional contempla três relatórios técnicos que exemplificam a aplicação da ACV, mas que não possuem equivalentes publicadas pela ABNT:

- a) ISO/TR 14047 - *Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations* (ISO, 2012a): O objetivo deste relatório técnico é ilustrar a prática atual de ACV;
- b) ISO/TS 14048 - *Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format* (ISO, 2002): Esta especificação técnica estabelece os requisitos e estrutura para a formatação de documentação de dados na elaboração de documentação e troca de ACV e inventário do ciclo de vida (ICV);
- c) ISO/TR 14049 - *Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis* (ISO, 2012b): Fornece exemplos sobre as práticas na realização de ICV.

De acordo com a norma NBR ISO 14040 o estudo de ACV pode auxiliar (ABNT NBR ISO, 2009a):

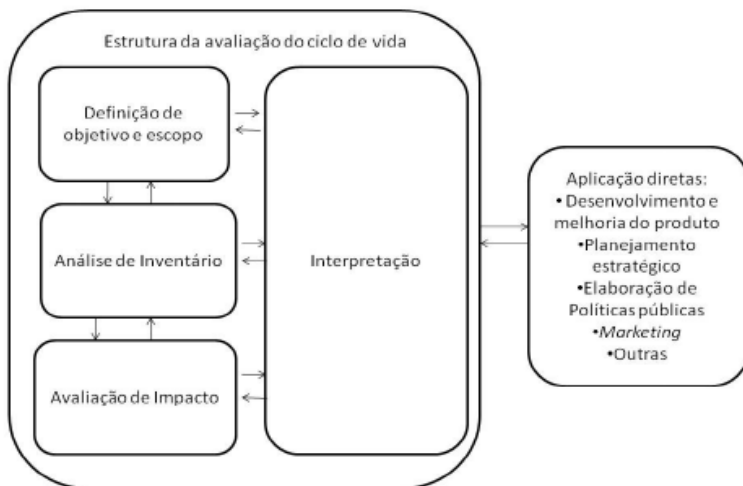
- a) Na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- b) Na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais (por exemplo, planejamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou revisão de projetos de produtos ou processos);
- c) Na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição;
- d) No marketing (por exemplo, uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto).

2.2.1 Fases de uma ACV

Neste capítulo, será apresentada uma visão geral da metodologia para a elaboração de estudos de ACV e os principais desafios enfrentados para na sua aplicação.

Conforme descrito anteriormente as práticas atuais são baseadas nas normas internacionais ABNT NBR ISO série 14040, que consiste em quatro etapas de avaliação. Estas fases são interdependentes, sendo possível o retorno a uma delas em qualquer momento do estudo, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas para a realização de uma ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO (2009a)

2.2.1.1 Definição de objetivo e escopo

A definição do objetivo e do escopo compreende a primeira fase de uma ACV. O objetivo deve declarar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo (ABNT NBR ISO, 2009a). De uma forma simplificada, consiste na definição do porquê, para quê e para quem será realizado o estudo (KALBUSCH, 2011).

Por sua vez, o escopo engloba a descrição do meio para atingir o objetivo e, segundo a NBR ISO 14040 (2009a) deve incluir os seguintes itens: sistema do produto, função do sistema do produto (em caso de estudos comparativos), unidade funcional, fronteira do sistema, procedimento de alocação, tipo de impacto e metodologia selecionada para avaliação, requisitos de dados, suposições, limitações, requisitos iniciais de qualidade dos dados, tipo de análise crítica (se aplicável) e tipo e formato de relatório requerido para o estudo.

Como todos os parâmetros para a elaboração das etapas seguintes serão baseados nas definições do escopo é necessário que ele seja suficientemente bem definido. Porém, é válido destacar o seu caráter preliminar, uma vez que a ACV é uma técnica interativa e, à medida que os dados e informações são coletados, pode ser necessário realizar revisões para atender ao objetivo inicial proposto (ABNT NBR ISO, 2009a).

Desta forma, alguns cuidados iniciais são necessários para garantir a relevância do estudo. Heede e Belie (2012) destacam a importância da especificação criteriosa da unidade funcional, uma vez que serve como referência do sistema de produto para o cálculo do impacto ambiental. O que pode ser particularmente complexo para comparação de sistemas construtivos, uma vez que deve ser levado em consideração fatores como vida útil, durabilidade, desempenho estrutural e ambiental.

Outra decisão importante, realizada logo no início desta etapa, é referente aos princípios de modelagem do ICV e os métodos de abordagens que devem ser aplicados (JRC-IES, 2010b). De acordo com Rebitzer *et al.* (2004) duas diferentes abordagens de ACV podem ser adotadas: modelagem de atribuição e de consequência. O modelo de atribuição descreve os fluxos de consumo de recursos e de emissão de poluentes do sistema escolhido, ajustado para a unidade funcional pré-determinada. Enquanto, o modelo de consequência estima a variação de consumo de recursos e emissão de poluentes devido às alterações promovidas em um determinado sistema.

Para Curran, Mann e Norris (2005) o foco da ACV atribucional é descrever os fluxos físicos ambientalmente relevantes para o ciclo de vida de um produto e seus subsistemas. Já na ACV consequential, o objetivo é descrever como os fluxos relevantes alteram as respostas possíveis de decisão.

Vieira e Horvath (2008) utilizaram as duas formas de modelagem para avaliar os impactos ambientais do concreto usado em um prédio de escritórios. Os autores concluíram que não há nenhuma diferença significativa entre os resultados, e que a escolha entre o uso de um ou outro em edifícios não é uma decisão crítica.

Além, das escolhas metodológicas relatadas acima, diversos são os critérios possíveis no que diz respeito aos limites do sistema e quais processos serão incluídos dentro destes limites. As escolhas e suposições feitas, deverão atender ao objetivo e escopo do estudo, sendo conveniente que os modelos usados sejam descritos e os pressupostos que embasaram as escolhas sejam identificados (ABNT NBR ISO, 2009a).

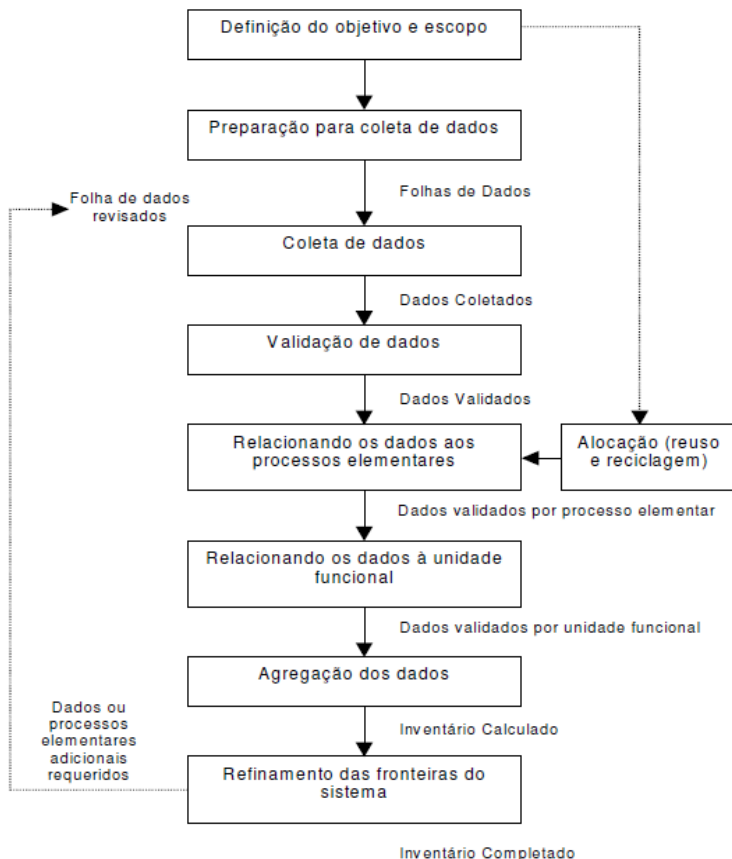
Após estas escolhas, para cada processo do sistema de produto, será necessário um conjunto de dados que deverão ser coletados. A NBR ISO 14044 (2009b) estabelece os critérios necessários em relação à qualidade dos dados, que devem ser identificados: cobertura temporal, geográfica, tecnológica, precisão, completeza, representatividade, consistência, reprodutibilidade e incertezas das fontes de dados.

2.2.1.2 Análise do inventário do ciclo de vida (ICV)

A análise de inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas (recursos) e saídas (emissões) relevantes de um sistema de produto (ABNT NBR ISO, 2009a).

A NBR ISO 14044 (2009b) estabelece um procedimento para a realização da ICV, de forma que todas as informações sejam registradas detalhadamente (Figura 2).

Figura 2 - Procedimentos simplificados para análise do inventário.



Fonte: ABNT NBR ISO (2009b).

O primeiro passo é a preparação para a coleta de dados, que envolve as definições iniciais para a identificação dos dados que devem ser obtidos. A NBR ISO (2009b) recomenda algumas etapas para assegurar a uniformidade e consistência do sistema modelado: (a) desenho do fluxograma dos processos elementares e suas inter-relações; (b) descrição de cada processo e listagem dos dados a eles associados, (c) listar os fluxos e os dados relevantes; (d) listar as unidades funcionais adotadas; (e) determinar a técnica de coleta e cálculo dos dados; (f) documentar casos especiais, irregularidade ou observações associadas aos dados adotados.

A coleta de dados engloba o registro das informações qualitativas e quantitativas de cada processo elementar constante nas fronteiras do sistema. Devido à grande quantidade de dados requerida, a criação de dados do inventário, pode ser uma das etapas de trabalho mais demoradas de uma ACV, tornando-se muitas vezes difícil, devido à falta de dados adequados para o sistema de produto em estudo (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

Segundo Sonnemann *et al.* (2011) a maioria das ACVs são desenvolvidas utilizando uma combinação de fontes de dados. As informações são obtidas de diferentes maneiras, podendo ser medidas diretamente, por exemplo, através de cálculo com base em levantamentos de balanços de massa individuais, ou através de estimativas, baseadas em médias de fatores de consumo e de emissões, geralmente, provenientes da base de dados (EICKER *et al.*, 2010).

Após a coleta de dados, para gerar os resultados do inventário do sistema definido, é necessário a realização de procedimentos de cálculos. De acordo com a norma NBR ISO (2009b), o tratamento dos dados deve envolver os itens a seguir:

- a) validação dos dados: tem como objetivo a verificação em fase inicial de possíveis incoerências e envolve a verificação dos balanços de massa, balanço de energia e/ou análises comparativas de fatores de emissão. Deve-se também determinar o que será feito no caso de ausência de dados;
- b) correlação dos dados aos processos elementares e à unidade funcional: para cada processo elementar deve ser determinado um fluxo de referência apropriado, que servirá como base de cálculo dos dados de entrada e saída do sistema. É recomendável que estes dados estejam referenciados à unidade funcional;
- c) refinamento da fronteira do sistema: é a última etapa e consiste na revisão da fronteira estabelecida inicialmente, através de uma análise de sensibilidade, para determinar a sua significância. Este procedimento pode resultar na inclusão ou exclusão de novos processos elementares ou de entradas e saídas que se mostrem significativos ou não. (ABNT NBR ISO, 2009b).

Durante a realização da correlação de dados aos processos elementares, deve ser dada atenção à necessidade de alocação, que, segundo a NBR ISO 14040 (2009a) deve ser aplicada quando se trata de sistemas que envolvem múltiplos produtos, ou quando ocorre algum tipo de reciclagem ou reutilização da matéria-prima, e consiste no processo de divisão dos fluxos de materiais, de energia e das cargas ambientais entre os diferentes produtos finais.

2.2.1.2.1 Como lidar com processos multifuncionais

Quando um processo fornece mais de um produto ele é multifuncional. Finnveden *et al.* (2009) identificou três cenários possíveis, (1) múltiplas saídas, em que um processo produz vários produtos; (2) múltiplas entradas, em que um processo recebe vários produtos residuais; e (3) reciclagem em circuito aberto, em que um produto de resíduos é reciclado para outro sistema de produto. Nestes casos, deve-se questionar como as cargas associadas aos diferentes produtos devem ser particionadas e distribuídas entre eles (REBITZER *et al.*, 2004).

Para solucionar estas questões, existem várias maneiras de implementar a divisão de cargas. As duas principais abordagens são o método de particionamento e o método de carga evitada, também denominado método de substituição ou subtração (HEIJUNGS; GUINÉE, 2007, FINNVEDEN *et al.*, 2009).

Segundo Finnveden (2009), no método de carga evitada, um processo é subtraído a partir do sistema principal. A ideia é que um subproduto comercializável pode ser considerado para substituir a produção de um determinado produto convencional. Como exemplo, a incineração de resíduos para produção de eletricidade pode ser considerada a fim de evitar, em certa medida, a produção de eletricidade convencional.

Já o método de particionamento, baseia-se na divisão de um processo multifuncional em processos de única função. Estes processos não existem na realidade: eles são construções matemáticas, que consideram parâmetros físico-químicos, como massa, teor de energia ou pesos moleculares obtidos das equações estequiométricas, ou ainda, em alguns casos, valores econômicos. É reconhecido que esta solução é menos simples do que parece à primeira vista.

As recomendações da NBR ISO 14044 (2009b), para decisão do procedimento de alocação a ser adotado, é que se siga as três etapas sequenciais:

- a) Sempre que possível a alocação deve ser evitada, pois apesar de possuírem critérios técnicos, agregam subjetividade ao estudo. Para evitar a alocação, há duas maneiras: (i) dividir o processo elementar a ser alocado em subprocessos; ou (ii) expandir os limites do sistema a fim de incluir os fluxos relacionados aos subprodutos;

- b) Uma segunda opção, nos casos em que não é possível evitar a alocação, é separar as trocas entre os diferentes produtos ou funções de forma que reflita as relações físicas subjacentes entre eles;
- c) A terceira opção da norma é aplicável para situações em que a divisão através da relação física não é possível. Nestes casos deve-se procurar outras formas de relação entre eles. Por exemplo, valor econômico dos produtos (ABNT NBR ISO, 2009b).

Na prática, a relação financeira é frequentemente adotada. No entanto, a alocação baseada no valor econômico, apresenta como desvantagem o fato de que os valores são flutuantes, determinados por demandas econômicas.

Para Guinée, Heijungs e Huppes (2004), as incertezas inerentes a estas flutuações são consideradas importantes, mas uma vez que geralmente as partes permanecem constantes em cenário de longo prazo, são comparáveis com aos demais métodos. Como medida para aumentar a representatividade do estudo, JRC-IES (2009b) recomenda que o valor atribuído seja baseado em médias de períodos.

Outra questão, é que alguns subprodutos necessitam de tratamento complementar antes de serem reutilizados. Nesses casos, que esses processos devem ser considerados dentro da fronteira do sistema de análise (JRC-IES, 2010b).

Para Chen *et al.* (2010), a escolha do procedimento de alocação tem provado ser uma das questões metodológicas mais controversas na elaboração da ACV, em parte, porque a decisão do fator adotado, influencia significativamente nos resultados do estudo. Desta forma, nos casos em que vários procedimentos de alocação são aplicáveis, a NBR ISO 14044 (2009b) recomenda que uma análise de sensibilidade deve ser realizada para ilustrar a influência do procedimento selecionado sobre os resultados.

2.2.1.2.2 Banco de dados

A qualidade (precisão, integridade, representatividade) dos dados utilizados, tem um impacto significativo sobre os resultados de uma ACV. A existência de incerteza relacionada aos dados é frequentemente citada como uma desvantagem crucial para uma interpretação clara dos resultados (ROSSI *et al.*, 2012).

Durante as duas últimas décadas, bases de dados foram desenvolvidas, mantidas e atualizadas por diferentes provedores, por acadêmicos e pesquisadores, por grupos de setores industriais e por indústrias individuais (UNEP, 2011). Muitas vezes são oferecidas em

conjunto com ferramentas de softwares de ACV (FINNVEDEN *et al.*, 2009), e algumas vezes, estão disponíveis em sites públicos.

Para Curran (2013) o uso de dados de ferramentas comerciais tornaram o processo mais fácil, porém, a forma como os dados foram modelados nem sempre é clara. Já os bancos de dados publicamente disponíveis, muitas vezes são patrocinados pelo governo. E, apesar de serem de fácil acesso e sem nenhum custo, não são aplicáveis para todos os estudos. A razão é, como geralmente os dados são relatados para situações específicas de uma determinada indústria, região ou país, torna-se necessário agregar pressupostos, a fim de representar a realidade do local de estudo.

A confiabilidade da ACV é, portanto, fortemente afetada pela integridade dos dados, principalmente quando as bases de dados são de cenários diferentes da realidade do estudo. Por exemplo, a matriz energética, a modernização do processo produtivo, o tipo de transporte utilizado.

Neste panorama, a *United Nations Environment Programme* (UNEP) e a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) através da *Life Cycle Initiative* elaboraram um guia com a definição dos princípios para a criação, gerenciamento e disseminação de dados globais. O objetivo é contribuir com orientações para a produção de bases de dados com qualidade, confiáveis, transparentes e intercambiáveis (UNEP, 2011).

A seguir, é apresentada uma lista de banco de dados, relevantes para a construção civil. As informações foram coletadas do site da *United States Environmental Protection Agency* (EPA) (EPA, 2014) e incluí uma breve descrição sobre eles:

- a) Estados Unidos: *USLCI Database*. Desenvolvida pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e o *Athena Sustainable Materials Institute*. É aberta ao público e contém dados de materiais e processos. Os inventários disponibilizados atendem à ISO/TS 14048, sendo compatível com diversos formatos de softwares (NREL, 2012);
- b) Holanda: *IVAM LCA Data 4.0*. Desenvolvido pela agência de pesquisa IVAM em parceria com Departamento de Ciências Ambientais da Universidade de Amsterdã. É uma compilação de bases de dados conhecidas de materiais e processos, tais como: APME, BUWAL e ETH 96. É considerado particularmente abrangente para o setor da construção civil;

- c) União Europeia: *European reference Life Cycle Database* (ELCD). É uma base de dados fornecida e aprovada por associações empresariais da União Europeia. Acesso livre (ELCD, 2014);
- d) Suécia: SPINE@CPM. Desenvolvido pelo *Competence Centre for Environmental Assessment of Product and Material System* (CPM) na *Chalmers University of Technology*. Contém informações detalhadas de atividades de transportes, geração de energia, produção de materiais e gerenciamento de resíduos sólidos. Acesso livre (CPM, 2012);
- e) Suíça: Ecoinvent 3.0. Elaborado por um consórcio entre o governo e empresas. É considerada a base de dados mais extensa e importante atualmente disponível. É necessário licença para acesso e está disponível nos softwares: Umberto NXT LCA, IKE, GaBi, SimaPro, Team 5.1 e Quantis Suíte 2.0 (SCLCI, 2015).

O projeto de elaboração do banco nacional de inventário do ciclo de vida do Brasil, lançado em 2006 pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), ainda está em fase de desenvolvimento. Os inventários estão sendo elaborados através de uma parceria entre o Instituto Brasileiro de Ciência e Tecnologia (IBICT) com a Universidade de Brasília (Unb), Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

2.2.1.2.3 Ferramentas de apoio para a realização da ACV

Devido à grande quantidade de dados necessários para realizar uma ACV, é recomendado o uso de um aplicativo de *software* que torna o estudo muito mais eficiente (BRIBIÁN; USÓN; SCARPELLINI, 2009).

Ao decidir qual programa utilizar, deve ser levado em consideração além do custo, questões referente ao banco de dados, tais como: extensão, possibilidade de edição e inclusão de novos. Isso é, devido ao fato de que a maioria dos dados, são adequados para o contexto local ao qual se inserem, sendo necessário realizar adequações ao contexto do estudo.

Alguns dos principais *softwares* de apoio a ACV, aplicáveis para modelagem de elementos e sistemas construtivos da construção civil, são listados e comentados a seguir:

- a) *Building for Environment and Economic Sustainability* (BEES) 3.0: Desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Avalia o desempenho econômico e ambiental dos produtos da construção civil através da abordagem do ciclo de vida. Utiliza banco

- de dados próprio com 230 produtos de construção, permite a edição apenas das distâncias de transporte e peso das categorias de impacto (NIST, 2013);
- b) Invest 2: É específico para a construção civil e foi desenvolvido pelo *Building Research Establishment* (BRE) realiza avaliação do impacto ambiental da construção e análise de custo. É sensível a energia incorporada e leva em consideração os materiais de construção. Permite a inserção e edição de dados (BRE, 2014);
 - c) GaBi 4 *Software System and Database*: Desenvolvido pela *PE International*. Modela processos de produtos e produz balanços de ciclo de vida, permite avaliações de diferentes aspectos, tais como: sociais, ambientais e econômicos. Contém extenso banco de dados de abrangência mundial (Ecoinvent, USLCI *database* e ELCD), permite a edição de diferentes quesitos (*PE INTERNATIONAL*, 2014);
 - d) SimaPro 8: É uma ferramenta desenvolvida pela empresa PRÉ Consultants para avaliação do desempenho ambiental através da ACV. Permite a modelagem de produtos e sistemas a partir de uma perspectiva de ciclo de vida. É considerada a ferramenta mais conceituada devido à abrangência dos métodos de análise e extensão do banco de dados, além da flexibilidade para inserção e modelagem de novos dados (*PRÉ*, 2016);
 - e) Umberto: Desenvolvido pelo *ifu Hamburg GmbH*. Pode ser usado para modelar, calcular e visualizar sistemas de materiais e fluxo de energia. Fornece uma biblioteca que contém vários conjuntos de dados sobre processos industriais permitindo análise de diversas situações para identificar pontos de melhoria (IFU HAMBURG, 2014).

2.2.1.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) avalia os potenciais impactos ambientais. O objetivo desta fase é estimar a importância de todas as cargas ambientais obtidas no inventário, analisando sua influência sobre as categorias de impacto selecionadas (MATEUS *et al.*, 2013), além de fornecer as informações para a etapa de interpretação do ciclo de vida (ABNT NBR ISO, 2009a).

Em outras palavras, os dados derivados do inventário são atribuídos às suas respectivas categorias de impacto, que geralmente, abrangem três áreas de proteção: saúde humana, meio ambiente e uso dos recursos naturais. Sendo, por sua vez, convertidos em indicadores calculados através de modelos de avaliação. Este cálculo é baseado em

fatores, que representam a contribuição prevista de um impacto, por unidade de emissão ou de consumo de recurso (JRC-IES, 2011).

De acordo com a norma ISO 14044 (2009b), a AICV é composta por elementos obrigatórios e opcionais, da seguinte forma:

a) elementos obrigatórios:

- seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização: as escolhas devem levar em consideração a abrangência e relevância do âmbito do estudo definidas no objetivo e escopo;
- correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação): envolve a atribuição qualitativa dos aspectos identificadas no ICV entre as categorias de impacto de acordo com a sua capacidade de contribuição, por exemplo: “gás carbônico (CO₂)” contribui para a categoria de impacto “aquecimento global”;
- cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização): é a conversão quantitativa de todas as contribuições contidas em uma mesma categoria de impacto. Através dos fatores de caracterização, são expressas em uma unidade comum do indicador de categoria.

b) elementos opcionais:

- normalização: consiste no cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria em relação a um valor de referência, por exemplo, o impacto ambiental médio de um cidadão europeu em um ano;
- agrupamento: as categorias de impacto são distribuídas em grupos ordenados de acordo com a sua relevância ou base nominal, por exemplo, efeito local, regional ou global;
- ponderação: os resultados dos indicadores provenientes das diferentes categoria de impacto são somados utilizando fatores de peso, a fim de se obter uma unidade comum. Os fatores de peso são adotados de acordo com interesses específicos, por exemplo, metas políticas e condições econômicas;
- análise da qualidade dos dados: uso de técnicas para melhorar a compreensão e confiabilidade dos resultados (análise da significância, análise de incertezas e análise de sensibilidade).

2.2.1.3.1 Métodos para a avaliação de impactos

Embora a norma NBR ISO 14044 (2009b) estabeleça os princípios básicos para a elaboração da AICV, a técnica exata não está definida (MONTEIRO; FREIRE, 2012). De acordo com a NBR ISO 14040 (2009a), a recomendação é que o nível de detalhamento, a escolha dos impactos avaliados e as metodologias utilizadas sejam pautadas de acordo com a relevância para o objetivo e escopo do estudo.

A falta de uma recomendação clara para a modelagem da AICV, permite uma série de métodos compatíveis com a norma (JRC-IES, 2010a). Estes métodos consideram diferentes categorias de impacto, fatores de emissão, métodos de normalização e fatores de ponderação, tornando a comparação entre eles uma tarefa muito difícil (PENNINGTON *et al.*, 2004). No entanto, é possível identificar basicamente dois grandes grupos, o método de categoria única e o método de multicategoria.

O método de categoria única permite apenas que os usuários avaliem o impacto ambiental do ponto de vista de um único problema (MONTEIRO; FREIRE, 2012). Exemplos: IPCC 2006 (IPCC, 2006) que avalia apenas a mudança climática, USEtox (ROSEMBAUM *et al.*, 2008) que quantifica a toxicidade e CED (HISCHIER *et al.*, 2010) que avalia a demanda de energia acumulada.

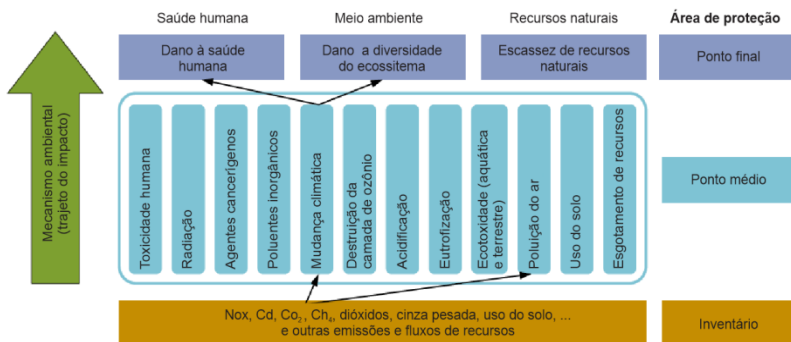
Já o método de multicategoria (Figura 3) é dividido entre: o método de ponto médio (problema orientado) e o método de ponto final (dano orientado) que também podem ser integrados (CAVALETT *et al.*, 2013, JRC-IES, 2010b).

a) método de ponto médio (problema orientado): todas as substâncias listadas no ICV são devidamente agregadas em categorias de impacto de acordo com uma característica comum na cadeia de causa e efeito do mecanismo ambiental. Estas características, não representam as consequências finais no trajeto ambiental das emissões listadas no ICV, mas são indicadores dos impactos em potencial. Portanto, é reconhecido como um método de problema orientado. Algumas categorias de impacto comumente relacionadas são: toxicidade humana, radiação, agentes cancerígenos, poluentes inorgânicos, mudança climática, destruição da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade (aquática e terrestre), poluição do ar, uso do solo e esgotamento de recursos, que demonstram um maior número de categorias de avaliação analisadas em comparação as três áreas de proteção consideradas nas análises de ponto final. Exemplos: CML

(GUINÉE *et al.*, 2002), EDIP 2003 (HAUSCHILD; POTTING, 2005), TRACI (BARE *et al.*, 2003) e LUCAS (TOFFOLETTO *et al.*, 2007).

- b) método de ponto final (dano orientado): consiste basicamente na caracterização da gravidade ou consequências dos impactos das categorias do ponto médio nas áreas de proteção identificadas no ponto final, que são a saúde humana, meio ambiente e os recursos naturais. Esta caracterização, de ponto final requer a modelagem de todos os mecanismos ambientais que conectam os resultados do inventário com o respectivo impacto sobre as áreas de proteção. Portanto, é reconhecido como um método de dano orientado. Exemplos: Eco-indicator 99 (GOEDKOOP; SPRIENSMA, 2001), Ecological Scarcity 2006 (FRISCHKNECHT; STEINER; JUNGBLUTH, 2009) e EPS 2000 (STEEN, 1999).

Figura 3 - Quadro esquemático de categorias de impacto para modelagem de caracterização em níveis de ponto médio e de ponto final.



Fonte: Adaptado de JRC-IES (2010b).

Para Buyle, Baet e Audenaert (2013) o método de ponto médio, gera uma imagem mais completa dos impactos ecológicos, embora, seja mais complicado comparar a importância entre as diferentes categorias analisadas. Já no método de ponto final, os resultados são mais fáceis de compreender, mas tendem a ser menos transparentes, e como envolve a aplicação de fatores subjetivos acarreta em maiores incertezas, afetando a confiabilidade dos resultados.

Desta forma, embora os usuários possam optar em qual metodologia trabalhar, uma tendência atual na AICV é conciliar as duas abordagens, integrando os dois modelos em uma estrutura consistente,

com o intuito de combinar as vantagens de cada conceito (BARE *et al.*, 2003). Exemplo: Impact 2002+ (JOLLIET *et al.*, 2003), LIME (ITSUBO, INABA, 2003) e ReCiPe 2008 (GOEDKOOPE *et al.*, 2013).

Devido a ampla disponibilidade de métodos, a escolha sobre qual utilizar nem sempre é óbvia (DREYER; NIEMANN; HAUSCHILD, 2003). Buyle, Baet e Audenaert (2013) afirmam que uma das fraqueza na prática atual da ACV, é que os diferentes métodos aplicados a um caso idêntico podem gerar resultados diferentes.

O manual *ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European*, apresenta o resultado da análise de um grupo científico sobre os métodos disponíveis até 2008. Com base em critérios pré estabelecidos, o manual sugere o melhor método para cada categoria de impacto. No entanto, para a maioria das categorias nenhum método foi considerado maduro para recomendação (JRC-IES, 2011).

2.2.1.4 Interpretação dos resultados

Finalmente, a última etapa da elaboração da ACV é a sua interpretação. Esta etapa envolve a análise dos resultados obtidos nas etapas de inventário e avaliação de impacto, com o objetivo de se obter conclusões (ABNT NBR ISO, 2009a). Portanto, é quando os resultados obtidos nas fases anteriores serão resumidos, discutidos e avaliados em relação a sua completude, sensibilidade e consistência. As conclusões obtidas serão utilizadas para estabelecer recomendações para a tomada de decisão, referente aos produtos ou sistemas avaliados.

Segundo a NBR ISO 14044 (2009b) deve constar três elementos básicos na interpretação:

- a) identificação das questões relevantes: consiste na identificação dos pontos relevantes de acordo com o objetivo e escopo definido. Tem como propósito verificar as implicações referente as questões atribuídas nas fases de ICV e AICV, tais como, regras de alocação, decisões de corte, seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e métodos utilizados;
- b) avaliação da confiabilidade dos resultados: tem como objetivo verificar a confiabilidade dos resultados, incluindo a completude, sensibilidade e consistência. A análise de completude, consiste em verificar se todos os dados estão disponíveis e completos. A análise de sensibilidade tem como objetivo avaliar a confiabilidade dos resultados e conclusões, pontuando o quanto eles são afetados pelos fatores de incerteza (exemplo: dados, métodos de análise, fatores de

alocação, indicadores, etc.). E a análise de consistência, consiste em pontuar o quanto que as hipóteses, métodos e dados obtidos estão de acordo com as definições iniciais do estudo;

- c) conclusões, limitações e recomendações do estudo: Deve ser consistente com as definições do objetivo e escopo e refletir de forma transparente os resultados do estudo.

Após a conclusão do estudo os resultados devem ser relatados ao público-alvo de forma compreensível, completa e consistente. O relatório deve apresentar detalhe suficiente para permitir que o leitor compreenda a complexidade inerente a ACV (ABNT NBR ISO, 2009a).

2.2.2 ACV simplificada

A ACV é reconhecida internacionalmente como uma metodologia de avaliação ambiental bastante abrangente e padronizada com base científica (ABNT NBR ISO, 2009a). Ainda assim, a percepção da complexidade associada ao número elevado de dados, de conhecimento e de tempo, são frequentemente apontados como fatores limitantes para sua aplicação prática na construção civil (BLENGINI; CARLO, 2010).

Para superar as dificuldades de implantação, a simplificação da ACV é vista como uma solução, para condução de uma avaliação rápida de apoio à decisão (REBITZER *et al.*, 2004). A terminologia ACV simplificada, tem sido utilizada como referência a racionalização dos métodos, através de medidas ou procedimento tomados para reduzir o escopo, custo e esforço necessário para realização do estudo (HUNT *et al.*, 1998). Podendo ser compreendida como um passo inicial para a condução de uma ACV completa.

Bribián, Usón e Scarpellini (2009) propõem que na elaboração de um estudo simplificado, os dados de entrada devem ser fáceis de obter e, os indicadores e as categorias de impacto selecionadas simples e de fácil compreensão.

Hunt *et al.* (1998) examinaram diferentes procedimentos de corte para simplificação da ACV, e às classificaram em três grupos:

- a) métodos que reduzem o escopo do estudo: através da simplificação da modelagem, limitando o detalhamento dos dados, processos, ou categorias de impactos consideradas na análise;
- b) métodos que reduzem a necessidade de dados primários: através da incorporação de dados disponíveis em banco de dados, ou simplificação do detalhamento dos dados; e

- c) métodos que limitam ou eliminam fases do ciclo de vida: através da limitação da fronteira de análise do sistema, podendo ser: *upstream*, com exclusão da manufatura dos materiais primários; *up and downstream*, com análise apenas do material primário; *downstream*, onde uso e fim de vida não são considerados; ou ainda com limitação referente a representatividade em massa do material, por exemplo inferior a 10%.

Os autores analisaram a influência de cada medida aplicada à um estudo de caso, e concluíram que a adoção de cortes horizontais, em que são eliminados fluxos iniciais ou finais à partir do fluxograma, um tanto arbitrária. Recomendando, como preferível a adoção de cortes verticais, em que os dados são coletados para todos os estágios e fatores relevantes, porém em menor detalhe.

Bala *et al.* (2010) analisaram a influência da simplificação dos fluxos de modelagem para a categoria potencial de aquecimento global (PAG). Os autores avaliaram a influência da simplificação em um estudo de caso comparativo de sacos plástico com conteúdo reciclado, o resultado indicou que a ACV simplificada fornece resultado confiável com uma diferença de 10% em comparação com a ACV completa.

De qualquer forma, para Todd e Curran (1999) a ACV não pode fornecer uma avaliação verdadeiramente abrangente com tudo incluído, devido às limitações inerentes à cada estudo. Para os autores, estratégias de racionalização são adotadas em diferentes graus em todas as análises do ciclo de vida.

A chave é assegurar, que as decisões do que será considerado no estudo seja consistente com os objetivos e aplicações do estudo. De forma, que as informações produzidas atendam às necessidades dos usuários. Tornando, o desafio para o sucesso da simplificação da ACV a elucidação da questão do que pode ser eliminado sem prejudicar o nível necessário de detalhes, o nível aceitável de incerteza, e os recursos disponíveis para a sua elaboração (TODD; CURRAN, 1999).

2.2.3 Aplicações da ACV na construção civil

Uma vez que a ACV tem uma abordagem abrangente, sistêmica à avaliação ambiental, o interesse é crescente em incorporar a metodologia na indústria da construção civil. Que pode ser aplicada, tanto para tomada de decisão na seleção de produtos, como na avaliação e otimização de processos construtivos (SINGH *et al.*, 2011).

Ortiz, Castells e Sonnemann (2009) realizaram uma revisão da literatura sobre ACV na construção civil, e classificaram os estudos de acordo com a amplitude da análise, dividindo-os em dois segmentos: aplicações de ACV para seleção de materiais e componentes construtivos e aplicações de ACV para todo processo construtivo.

Segundo os autores, existem diferenças práticas entre os cenários. Para materiais e elementos construtivos, as análises baseiam-se em um único produto, seguindo os passos das avaliações de produtos industriais, e têm como objetivo a melhoria dos processos produtivos e auxílio na seleção de alternativas. Enquanto, para edifícios completos é o resultado de uma combinação de componentes, o que torna as análises complexas e de difícil comparação.

Para Singh *et al.* (2011), os estudos relacionados ao setor da construção enfrentam desafios adicionais, tais como:

- a) impacto específico local: os edifícios são desenvolvidos de acordo com processos locais;
- b) complexidade do modelo: o uso de um grande número de materiais e produtos associados a diferentes processos produtivos, torna a coleta dos dados e a definição dos limites do sistema muito mais complicado;
- c) incerteza de cenário: a longa vida dos edifícios acarreta em suposições generalizadas para estimar a sua vida útil;
- d) ambiente interno: edificações implicam no desenvolvimento de ambientes internos o que agrega um conjunto completamente novo de potenciais impactos sobre o bem-estar dos ocupantes, desempenho e comportamento durante a fase de utilização do edifício.

O trabalho de Buyle, Baet e Audenaert (2013) também menciona como fator limitante, a dificuldade de comparação dos estudos, devido ao seu caráter singular, como *lay-out*, sistemas construtivos, necessidades de conforto e localização.

Asdrubali, Baldassarri e Fthenakis (2013) apontaram que comparando à outros produtos, os estudos de edifícios são mais difíceis de avaliar pelas seguintes razões: eles são em grande escala, complexos em materiais e são dinâmicos ao longo do tempo, devido à vida útil dos componentes de construção e a evolução das necessidades dos usuários.

Apesar das dificuldades inerentes ao setor, não há dúvida de que a aplicação da ACV na construção civil pode ser muito importante na realização do desenvolvimento sustentável. Sendo necessária para promover melhorias nas práticas e técnicas de engenharia (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009).

2.2.4 Pesquisas relacionadas aos materiais e componentes da construção

Como as matérias-primas são normalmente encontrados na natureza na forma bruta, o processo de extração e purificação é uma atividade que envolve não apenas o consumo de energia, mas também resulta na geração de resíduos, emissões de poluentes e esgotamento de recursos naturais (ASIF; MUNEER; KELLEY, 2007).

Para minimizar os danos causados pelo uso de materiais, Bribián, Capilla, e Usón (2011) destacam a necessidade da promoção de melhorias no processo produtivo, além de substituir, na medida do possível, o uso de recursos naturais finitos por resíduos gerados em diferentes processos de produção, fechando os ciclos de vida dos produtos.

Neste panorama, o interesse em compreender as cargas relacionadas aos materiais em uma perspectiva de ciclo de vida acarretou no desenvolvimento de uma série de estudos, com diferentes objetivos.

Com foco na identificação de materiais que representam maior contribuição para a geração de impacto ao longo do ciclo de vida. Dimoudi e Tompa (2008) investigaram o papel de diferentes elementos construtivos em dois edifícios de escritórios na Grécia, quantificando-os em termos de energia incorporada e emissões atmosféricas. Os resultados indicaram que os elementos estruturais representam a maior contribuição, seguidos pelo sistema vertical de vedação.

Souza *et al.* (2015) aplicaram a ACV para comparar os impactos do uso de telhas cerâmicas e de concreto. Os autores utilizaram para análise o método de ponto final Impact 2002+, que considera as categorias: mudança climática, saúde humana, qualidade do ecossistema, depleção de recursos, e retirada de água. Os resultados apontam que as etapas de transporte para extração e para distribuição são as que apresentam maior contribuição para o impacto global, devido as emissões atmosféricas relacionadas a combustão do óleo diesel.

Outros estudos se concentram no processo produtivo, Koroneos e Dompros (2007) analisaram através da ACV as diferentes etapas de produção de tijolos, em uma fábrica na Grécia. A análise envolveu a quantificação das emissões relacionadas ao consumo de: matéria-primas; recursos energéticos (eletricidade e combustíveis) e água. O estudo concluiu que a maior parte dos danos ambientais são relacionados as emissões atmosféricas, com destaque para o CO₂, decorrentes do uso de combustíveis fósseis.

Com o intuito de alcançar redução das cargas ambientais, atribuídas à manufatura de novos materiais, a reciclagem dos materiais construtivos no fim da vida útil do edifício e seu reaproveitamento em novas edificações é outra opção investigada, uma vez que promove o uso de materiais que seriam descartados (BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN, 2011).

Marinkovic *et al.* (2010) aplicaram a ACV para comparar um concreto convencional com um concreto produzido com agregado reciclado de concreto. Para a etapa de AICV os autores utilizaram o método CML para analisaram as categorias de ponto médio: acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e potencial de aquecimento global, em termos de emissões atmosféricas, além disso incluíram a exigência de energia embutida, expressa como consumo de energia, emissões de resíduos e esgotamento de recursos naturais. O estudo concluiu que para a etapa de produção, os impactos são maiores para o agregado reciclado do que para o agregado natural. Os autores realizaram análise de sensibilidade para a etapa de transporte e concluíram que os resultados são fortemente afetados pela distância considerada no estudo.

Da mesma forma, Gayarre *et al.* (2016) utilizaram a ACV para comparar a substituição de 50% da areia natural por resíduos da construção na confecção de placas de concreto pré-moldada (meio-fio). A avaliação envolveu a identificação do consumo de energia, combustível e emissões atmosféricas de GEE. Para o estudo foi selecionado as categorias de ponto médio: acidificação, eutrofização, aquecimento global e oxidação fotoquímica, calculados através do método CML (GUINÉE *et al.* 2002). Os resultados apontam que o uso do agregado reciclado aumenta o impacto para as categorias analisadas, quando comparado com o uso do agregado natural. Os autores também destacam a importância da etapa do transporte no resultado global.

Além disso, o uso de subprodutos como materiais substitutos de matérias-primas naturais também são discutidas sob o ponto de vista ambiental. Huberman e Pearlmutter (2008) compararam o uso de materiais alternativos (bloco de solo-cimento e de cinza volante) com materiais tradicionais (bloco de concreto autoclavado e de concreto vazado), para um edifício no deserto do Negev, em Israel. Os autores concluíram que o uso de materiais alternativos permitiu a redução dos valores da energia acumulada na ordem de 15-20%. Este resultado deve-se ao fato de que estes materiais apresentam benefícios inerentes em termos de consumo energético na fase de produção e transporte.

Chowdhury, Apul e Fry (2010) compararam agregados naturais com pavimento de concreto reciclado e com subprodutos (cinza volante e

cinza pesada) para produção de estradas. A análise envolveu a identificação do consumo energético e das emissões e de poluentes, calculados através do método CML, em termos de potencial de aquecimento global, acidificação e toxicidade. Os resultados foram divergentes para cada categoria, cinzas volantes e pesadas obtiveram melhor desempenho para o potencial de aquecimento global e acidificação e o pavimento de concreto reciclado se mostrou atraente em termos de energia e de toxicidade.

Importante neste estudo, que para modelagem das cinzas os autores não consideraram qualquer carga referente ao processo de produção e de tratamento, porém consideraram o crédito referente a eliminação em um aterro sanitário. Em termos de lixiviação os autores excluíram as concentrações de metal pesado para a etapa de aterro com o pressuposto de que a área receberia tratamento e não haveria qualquer risco de emissões para o ambiente (CHOWDHURY, APUL e FRY, 2010).

Seguidos por ele Anastasiou e Papayianni (2015) avaliaram diferentes composições de pavimento de concreto contendo materiais alternativos: cinza volante (como componente do cimento) e escória de alto forno (como agregado). A análise englobou o consumo de recursos naturais e as emissões de GEE. Neste estudo dois cenários de alocação foram analisados, um considerando carga nula e outro com coeficiente de alocação por valor econômico. Os resultados mostram que os pavimentos rodoviários de concreto com materiais alternativos podem reduzir tanto o consumo de recursos naturais quanto as emissões de CO₂ eq..

2.3 AS TERMELÉTRICAS A CARVÃO MINERAL: RESÍDUOS GERADOS E SUAS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em 2006, a geração de energia a carvão foi responsável por 41% do fornecimento de energia elétrica mundial, em 2030, sua participação deverá ser de 43% (MEAWAD; BOJINOVA; PELOVSKI, 2010).

No Brasil as termelétricas a carvão, representam um percentual na matriz energética, um pouco maior que 1,5%. Sendo a maior parte das usinas localizadas nos estados da região sul, próximas as minas de carvão, com uma potência total em operação, atualmente, de 2.021 MW (ANEEL, 2008, MME, 2007, COPEL, 2014, ELETROBRAS CGTEE, 2014, TRACTEBEL ENERGIA, 2014), conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil.

usina	empresa	município	estado	potência (MW)
Candiota II	Eletrobras CGTEE	Candiota	RS	446
Candiota III	Eletrobras CGTEE	Candiota	RS	350
São Jerônimo	Eletrobras CGTEE	São Jerônimo	RS	20
Figueira	Copel	Figueira	PR	20
Jorge Lacerda	Tractebel Energia	Capivari de Baixo	SC	857
William Arjona	Tractebel Energia	Campo Grande	MS	190
Charqueadas	Tractebel Energia	Charqueadas	RS	72
Alegrete	Tractebel Energia	Alegrete	RS	66
total	-	-	-	2021

Fonte: MME (2007), COPEL (2014), ELETROBRAS CGTEE (2014) TRACTEBEL ENERGIA (2014)

As termelétricas movidas a carvão mineral produzem energia através da queima do carvão em uma câmara de combustão (caldeira) onde o calor gerado aquece a água em tubos de alta pressão para a produção de vapor. O vapor superaquecido é enviado à turbina, onde se expande e gera o movimento circular que aciona o gerador elétrico. O vapor saído da turbina, em baixa pressão, é resfriado no condensador e bombeado de volta à caldeira, reiniciando o ciclo térmico (MME, 2007).

No país as termelétricas a carvão mineral utilizam a tecnologia de carvão pulverizado em ciclo subcrítico, que é considerada uma tecnologia limpa quando complementada por tecnologias de controle de NO_x, de sistemas de dessulfurização de gases de combustão (*Flue Gás Desulphurisation* - FGD) e de remoção de material particulado. Os sistemas de FGD podem ser projetados para utilizar calcário ou amônia como absorventes, possibilitando a remoção de até 96% do enxofre e de até 99,99% do material particulado (MME, 2007).

O carvão mineral é uma das formas de produção de energia mais agressivas ao meio ambiente. O efeito mais severo é o volume de emissão de gases como o nitrogênio (N) e dióxido de carbono (CO₂), também chamado de gás carbônico, provocado pela combustão (ANEEL, 2008).

Outra questão relevante no que diz respeito às termelétricas a carvão mineral é a geração de resíduos sólidos. Segundo Medeiros (2003) as usinas a carvão são as que produzem maior quantidade de resíduos dentre as termelétricas.

2.3.1 Resíduos gerados pelas termelétricas a carvão mineral

Durante a combustão do carvão, o material não combustível resulta em produção de cinzas de carvão. Os materiais mais finos e leves, denominados cinzas leves (volantes), flutuam para fora da caldeira através do fluxo dos gases de combustão e são recolhidas nos ciclones mecânicos ou precipitadores eletrostáticos, ou lançadas na atmosfera (POZZOBON, 1999, SINGH; SIDDIQUE, 2013). Outras, denominadas cinzas pesadas (fundo), apresentam granulometria mais grossa e são mais pesadas que a cinza leve, caindo no fundo das fornalhas e gaseificadores, sendo frequentemente retiradas por um fluxo de água (POZZOBON, 1999).

Em fornos a carvão pulverizado, os resíduos recolhidos são as cinzas leves (CzL) e as cinzas pesadas (CzP). As CzLs representam entre 70-90% do total, enquanto as CzPs representam uma parcela menor, compreendida entre 10-30% (SIDDIQUE, 2010).

Segundo Heidrich, Feuerborn e Weir (2013) a produção mundial de resíduos derivados da combustão do carvão tem aumentado em todo o mundo, em 2010, foi de aproximadamente 780 milhões de toneladas. Assim, o seu descarte tornou-se um grave problema ambiental, uma vez que, requer uma área substancial para a sua deposição, o que pode ser agravado ainda mais, devido ao risco de erosão e lixiviação de contaminantes.

Em contrapartida a utilização dos resíduos da combustão de carvão como subproduto, além de evitar os impactos associados, permite a preservação de recursos não renováveis (CHEN *et al.*, 2010). No entanto, mundialmente, há uma diferença significativa na taxa de aproveitamento destes resíduos pelos principais países produtores, que varia entre 20% a mais de 80%, conforme Tabela 2 (VINAI *et al.*, 2013).

Tabela 2 – Taxa de aproveitamento dos resíduos da combustão de carvão por país.

país	aproveitamento (%)	ano
EUA	43	2010

China	58	2010
Índia	27	2005
União Européia	91	2009
Austrália	41	2010
Japão	97	2006

Fonte: Adaptado de VINAI *et al.* (2013).

Como pode ser observado, nos Estados Unidos, a utilização destes resíduos é de 42,5% (ACAA, 2014) e na União Europeia atinge 90,7% (ECOPA, 2009). Em contrapartida, em países como a Índia e Canadá, apenas 27% e 30%, respectivamente, são reaproveitados (VINAI *et al.*, 2013).

Diversas são as aplicações possíveis para aproveitamento destes resíduos, como na agricultura e na indústria, porém, é o setor da construção civil que apresenta aplicações mais promissoras (MEAWAD; BOJINOVA; PELOVSKI, 2010).

2.3.2 Aplicações dos resíduos da combustão do carvão na construção civil

A valorização de cinzas leves é muito comum na indústria do cimento que, nos Estados Unidos, consome 51% do total reciclado. Estas são usadas como matéria-prima na produção do clínquer, como substituto parcial do clínquer, ou misturado ao cimento acabado (SIDDIQUE, 2010).

Ahmaruzzaman (2010) fez uma revisão sobre a utilização das cinzas volantes e além das aplicações industriais destacam ainda o uso como agregado leve na produção de produtos de construção, preenchimento estrutural e base e sub-base de estradas. Validados por estudos como os de Cicek e Tanriverdi (2007) que comprovaram ser possível produzir tijolos autoclavados de boa qualidade com alto teor de adição de cinzas volantes, chegando a uma proporção ótima de 68%.

Já a cinza pesada, têm sido limitada a algumas aplicações na construção civil, principalmente como agregado para a produção de blocos de concreto e como material de enchimento em construções de estradas (MENÉNDEZ *et al.*, 2014).

No entanto, vários autores têm testado a sua aplicação para uma variedade de outras aplicações e resultados satisfatórios têm sido obtidos.

Vinai *et al.* (2013) realizou um estudo experimental de tijolos compactados com adições de cinza pesada, e, os resultados mostraram boa resistência mecânica, baixo peso específico e ausência de ameaça à saúde.

Kurama e Kaya (2008) utilizaram cinzas pesadas como substituto parcial para o cimento Portland (CP) em até 25% e, concluíram que a proporção de até 10% pode melhorar as propriedades mecânicas do concreto.

Segundo Piaia, Cheriaf e Rocha (2013) uma das utilizações potenciais de cinzas pesadas provenientes da queima de carvão é o seu uso como um agregado de materiais à base de cimento Portland. A natureza porosa, pozolanicidade e a baixa densidade, em conjunto com a grande quantidade disponibilizada na geração de energia termelétrica, são indicativas de um material que possa contribuir para o desempenho de revestimento em argamassa.

Kim, Jeon e Lee (2012) envolveu a investigação do transporte de umidade e as características mecânicas de argamassa normais e de alta resistência com incorporação de cinzas pesadas, sendo relatadas melhores propriedades mecânicas na argamassa com cinza, por outro lado, o transporte de umidade foi de 10-20% superior.

Singh e Siddique (2013) através de uma revisão da literatura, constataram que a inclusão de cinzas pesadas como substituto da areia em concretos, influência nas propriedades no estado fresco, porém, mostra que a resistência, ao longo do tempo, é semelhante ao do concreto tradicional. No entanto, apresenta diminuição da resistência em todas as idades de cura, mas que podem ser melhoradas adicionando superplastificantes. Com base na revisão da literatura, os autores, concluíram que a cinza pesada é um material potencial e viável para ser utilizado como agregado fino na produção de concretos duráveis.

Assim, como as pesquisas internacionais que apontam para a possibilidade de uso de cinzas pesadas em bases de materiais cimentícios, também, estudos nacionais, como os elaborados na UFSC pelo grupo ValoRes, apresentam resultados satisfatórios relacionados às suas propriedades no estado fresco e endurecido. Os resultados podem ser consultados em: Andrade (2008), Duailibi (2008), Mustelieir (2008), Santos (2006), Silveira, Rocha e Cheriaf (2004), Andrade (2004), Margon (2002), Mustelieir (2002), Kreuz (2002), Lenzi (2001) e Pozzobon (1999).

3 MÉTODO

O método consiste na aplicação do conceito de Avaliação do Ciclo de Vida simplificado em um estudo de caso comparativo entre um sistema vertical de vedação convencional e outro contendo cinza pesada. A análise será *cradle to gate* (berço ao portão), portanto engloba as etapas do ciclo de vida das matérias-primas utilizadas para a confecção dos produtos, incluindo: extração da matéria-prima, produção dos materiais e transporte para distribuição, considerando ainda o consumo de combustíveis para o transporte nas mudanças de fase e consumo de recursos para a produção dos subsistemas.

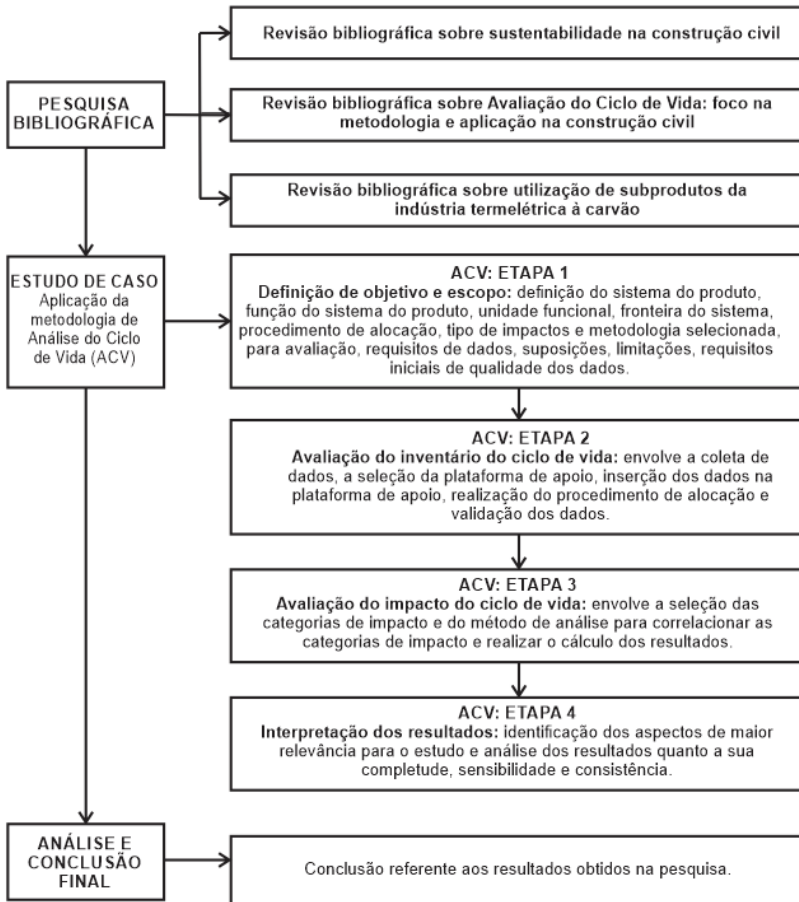
O ponto inicial da pesquisa foi a revisão da bibliografia, realizada através de consulta a livros, artigos científicos, publicações especializadas e normas técnicas. Essa etapa foi organizada em três temas: (1) sustentabilidade na construção civil; (2) avaliação do ciclo de vida (ACV) e; (3) utilização de subprodutos da indústria termelétrica a carvão.

Como o objetivo dessa dissertação é a aplicação do método de ACV à um estudo de caso, as etapas metodológicas seguem as diretrizes estabelecidas nas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044 (ABNT NBR ISO, 2009a; ABNT NBR ISO, 2009b), descritas no capítulo 2.

Este estudo considera a identificação do consumo de materiais, o consumo de energia, o consumo de água e as emissões para o ar, água e solo. Os valores obtidos são correlacionados às categoria de impacto: acidificação, esgotamento dos recursos abióticos, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico, potencial de aquecimento global, toxicidade humana e uso do solo, através do método de ponto médio CML (GUINÉE *et al.*, 2002). O consumo de água e de energia são pontuados em indicadores individuais, apresentados em m³ e MWh respectivamente. A escolha destas questões é justificada devido a relevância para o setor da construção civil.

Para o cálculo dos indicadores das categoria de impacto é utilizada a ferramenta de apoio SimaPro versão 8 *faculty* (PRé, 2016). A Figura 4 apresenta as etapas de desenvolvimento da pesquisa.

Figura 4 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Autora

A seguir o estudo de caso é apresentado, e cada etapa do método desenvolvido no trabalho é detalhado.

3.1 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso é um protótipo de habitação de interesse social (Finep/CEF), construído em 2003, na UFSC. O protótipo foi desenvolvido a partir da ação de uma equipe multidisciplinar associada ao Núcleo de Pesquisa em Construção (NPC) da UFSC.

O projeto arquitetônico (Figura 5 e 6) foi desenvolvido pelo Ghab, concebido para ser executado em etapas. A planta base possui 42m² e visa atender à necessidade básica de moradia, contemplando: sala-cozinha, lavanderia e varanda no pavimento térreo e dormitório e banheiro no segundo piso. Como segunda etapa da obra, foi prevista a construção de um ambiente no pavimento térreo destinado para funções diversas, tais como: dormitório, sala ou um espaço produtivo, além de, um terceiro dormitório que pode ser criado na projeção do ambiente ampliado (HABITARE, 2013).

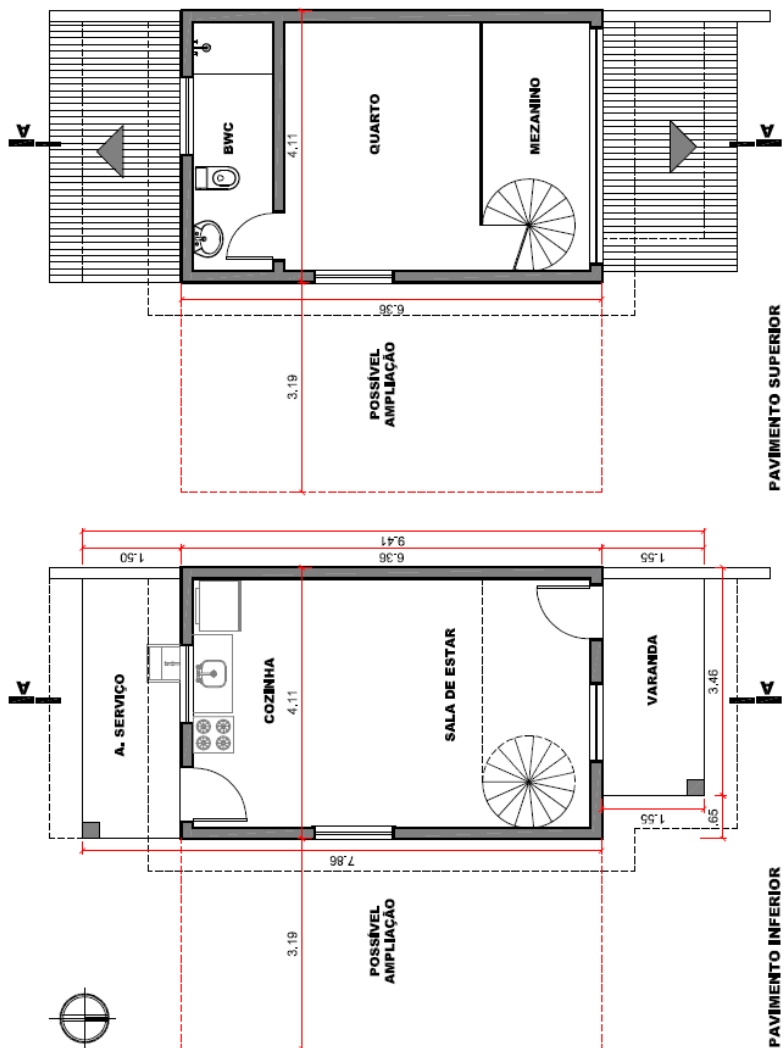
O principal enfoque foi a valorização de resíduos com grande disponibilidade na região Sul, que foram empregados na elaboração e produção dos elementos construtivos, sendo usados: cinzas pesadas geradas no processo termoeletrico a carvão, as cinzas da queima da casca de arroz e entulho cerâmico de obra (HABITARE, 2013).

Neste trabalho, são considerados para análise, os materiais com adições de cinzas pesada, que compõem o sistema vertical de vedação, sendo: os blocos de concreto e a argamassa de revestimento. O resíduo da combustão do carvão é proveniente da unidade termelétrica C (UTLC) do complexo termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo (SC).

Para elaboração da ACV comparativa do sistema vertical de vedação são considerados dois cenários de análise. O cenário A com uso de materiais convencionais e, o cenário B com teor de substituição de 100%, em massa, da areia fina por CzP para produção dos blocos de concreto e da argamassa de revestimento.

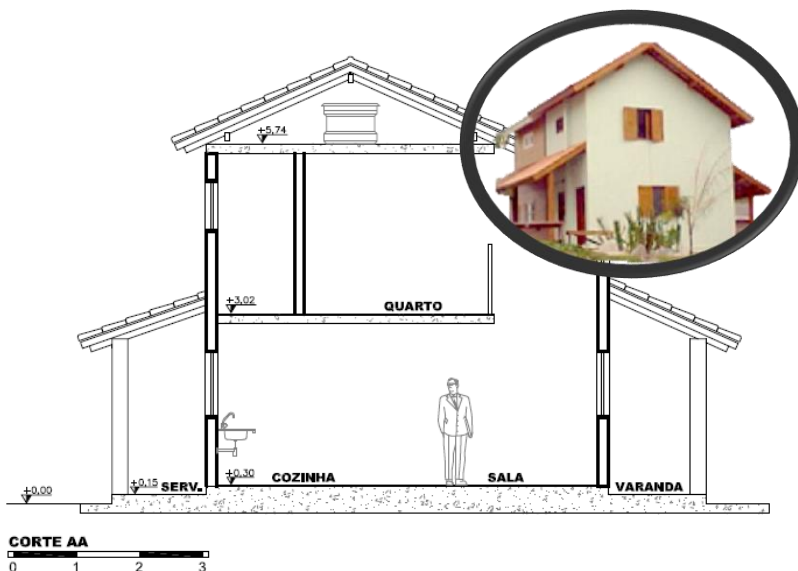
As especificações dos materiais com adição de CzP são resultados de pesquisas desenvolvidas no laboratório ValoRes, e seguem os traços adotados nos estudos de Silveira; Rocha e Cheriaf (2004), Santos (2006) e Mustelieir (2008). As especificações dos materiais do cenário A, são os adotados como referência nessas pesquisas.

Figura 5 – Planta baixa do protótipo de habitação popular



Fonte: Autora

Figura 6 – Corte AA do protótipo de habitação popular



Fonte: Autora

A seguir os cenários serão apresentados e os insumos que os compõem serão descritos.

a) Cenário A: Sistema vertical convencional

O sistema de alvenaria convencional é constituído por blocos de concreto, revestidos e assentados com argamassa. Os blocos de concreto são convencionais, Classe A e resistência à compressão de 6 MPa, sendo produzidos em série pela empresa de pré-moldados Toniolo Pré-Moldados Ltda., localizada em Palhoça no estado de Santa Catarina.

A determinação dos modelos e das quantidades necessárias para confecção da vedação vertical do protótipo foi baseada no projeto de alvenaria e são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Identificação dos blocos utilizados no protótipo.

modelo	código	dimensão	quantidade	peso	peso total
		(cm) l x h x c			
bloco estrutural	EI1460	14x19x39	1095	11,3	12.373,5
meio bloco	EM1460	14x19x19	126	6,7	844,2
bloco estrutural	EL1460	14x19x34	52	11,2	582,4
bloco estrutural	EV1460	14x19x24	56	9,1	509,6
meia canaleta	EC1460	14x19x19	170	6,8	1.156,0
meia canaleta “J”	EJ1260	14x19/31 x19	173	7	1.211,0
compensador	EU0960	14x9x19	10	3,5	35,0
total	-	-	-	-	16.711,7

Fonte: Autora

O cálculo dos insumos para confecção dos blocos foi baseado nos valores dos relatórios industriais fornecidos pela empresa. A receita base considerada para produção de 1 tonelada (t) de bloco segue a proporção de: 82 kg de cimento, 164 kg de areia média, 141 kg de areia fina, 376 kg de pó de pedra, 235 kg de brita 0 e 2 kg de aditivo. O cimento Portland utilizado é CPV-ARI de alta resistência inicial e, o aditivo é do tipo superplastificante éter policarboxilato.

Neste estudo o uso do aditivo foi considerado fora do escopo da análise. Esta decisão é justificada com base na declaração ambiental elaborada pela *European Federation of Concrete Admixture Associations* (EFCA) para os principais tipos de superplastificantes utilizados em concreto (EFCA, 2006). Apesar das emissões de CO₂ na produção do aditivo totalizarem 720g/kg, portanto, relevantes quando comparadas às emissões da fabricação do cimento Portland que somam 545g/kg para produção do clínquer e 371g/kg para produção do cimento Portland (MCT, 2010a), devido a baixa quantidade de aditivo utilizado não há contribuição de forma significativa no impacto global do estudo, representando menos de 2% das emissões do cimento Portland para produção de uma tonelada de bloco de concreto.

Segundo definição da NBR 13281 (2005) argamassa é uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e

endurecimento. A argamassa de revestimento é composta por três camadas: chapisco, emboço e reboco, podendo ser executada em camada úmida. O chapisco tem como função dar aderência ao substrato. O emboço é uma camada intermediária para regularizar a superfície e o reboco é a camada final de acabamento. Quando executada em camada única, apresenta dupla função: regularizar a superfície e dar acabamento.

Neste estudo de caso, a argamassa de revestimento é preparada no canteiro sendo executada em camada única. Para o cenário A o traço base, em massa, é de 1:2:7 (cimento:cal hidratada:areia), com relação água/cimento (a/c) de 2,29 e espessura de 30 mm. A adoção desse traço como referência é baseada nos estudos de SILVEIRA; ROCHA; CHERIAF (2004), SANTOS (2006) e MUSTELIER (2008).

Apesar de não ser uma composição usual, segundo SANTOS (2006) este traço foi adotado em virtude de conferir uma argamassa sem pulverulência na superfície e sem fissuras ocasionadas pela perda de água, qualificando tecnologicamente a cinza pesada para a produção de argamassas. No que diz respeito à quantidade de água, esta foi determinada em função de análise qualitativa da trabalhabilidade. A espessura de 30 mm adotada refere-se à espessura máxima permitida pela NBR 13749 (2013c) para realização de revestimento externo de fachada em camada única (MUSTELIER, 2008).

Argamassa de assentamento é definida como um elemento utilizado na ligação entre os blocos de concreto, garantindo distribuição uniforme de esforços. É composta de agregado miúdo, água e cal ou outra adição destinada a conferir plasticidade e retenção de água da hidratação à mistura (ABNT NBR, 2005).

A especificação da proporção dos insumos da argamassa de assentamento segue os valores de MUSTELIER (2008). Sendo o traço, em volume, igual a 1:1:6 (cimento:cal:areia média) e espessura igual a 10 mm.

b) Cenário B: Sistema vertical com adição de cinza pesada

O sistema com adição de CzP, assim como no sistema de vedação vertical convencional, é constituído por blocos de concreto revestidos com argamassa e são produzidas no canteiro de obras.

Os blocos empregados são resultado da pesquisa de Silveira; Rocha e Cheriaf (2004), em parceria com a empresa de pré-moldados Toniolo Pré-Moldados Ltda. O trabalho faz parte do projeto: Aproveitamento de cinzas volantes e pesadas para a produção de

concretos usinados e de blocos e pavimentos de concreto, financiado pela empresa GERASUL/Programa Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para produção dos blocos foi considerado teor de substituição de 100%, em massa, da areia fina por CzP.

Para as argamassas, a substituição da areia fina por CzP foi adotada apenas para a argamassa de revestimento. Na execução do protótipo, foram utilizados diferentes teores de substituição, porém, para a elaboração deste estudo foi assumido a substituição, em massa, de 100% do traço base do cenário A (SILVEIRA; ROCHA; CHERIAF, 2004, SANTOS, 2006 e MUSTELIER, 2008).

O cálculo da proporção dos materiais é realizado através da relação entre as massas unitárias no estado solto, representada pela Equação 1:

$$m_{CzP} = \frac{d_{CzP}}{d_{areia}} \cdot m_{areia} \quad (1)$$

Onde,

m_{CzP} = proporção em massa da CzP;

m_{areia} = proporção em massa da areia;

d_{CzP} = massa específica da CzP;

d_{areia} = massa específica da areia.

A proporção dos materiais componentes da argamassa de revestimento determinado pela equação 1 é 1:2:3,03 (cimento:cal:CzP), e relação a/c de 2,29. A argamassa de revestimento segue as especificações do cenário A.

c) Descrição dos insumos

▪ Cimento Portland

O cimento Portland (CP) é um aglomerante hidráulico composto basicamente de uma mistura de clínquer e gesso, podendo possuir adições. O clínquer é o principal componente e tem como matérias-primas o *calcário* e a *argila*, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento (ABCP, 2002).

As adições variam e são elas que definem os diferentes tipos de CP's existentes. Podendo ser gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos.

Silva (2014) estimou a composição do CP V-ARI a partir do ensaio da composição química, como sendo de 92,72% de clínquer e 2,28% de

gesso e 5% de material carbonático. Por sua vez, a composição do clínquer foi estabelecido em 76% de calcário e 24% de rochas argilosas (MME, 2014). Para o CP II – F foi estabelecido o teor de 85% de clínquer, 5% de gesso e 10% de material carbonático. Eventuais aditivos corretivos não foram considerados. A Tabela 4 apresenta a composição dos cimentos utilizados neste trabalho.

Tabela 4 - Composição dos CP's utilizados no estudo.

tipo de cimento Portland	sigla	composição (% em massa)		norma brasileira
		clínquer + gesso	material carbonático	
composto	CP II-F	94-90	6-10	NBR 11578
alta resistência inicial	CP V-ARI	100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: Adaptado de ABCP (2002)

A Tabela 5 apresenta a descrição e as características físicas dos cimentos utilizados neste estudo.

Tabela 5 - Características físicas dos CP's utilizados no estudo.

material	descrição	massa unitária (kg/dm ³)	massa específica (kg/dm ³)
cimento Portland	CP II-F	1,08	3,06
cimento Portland	CP V-ARI	1,02	3,12

Fonte: MUSTELIER (2002), ANDRADE (2004), MUSTELIER (2008)

▪ Cal

O termo cal é utilizado, na literatura brasileira e nas normas da ABNT, para designar o produto composto por óxido de cálcio (CaO) e por óxido de cálcio e magnésio (CaOMgO), resultantes da calcinação de calcários, calcários magnesianos e dolomitos (MCT, 2010b).

Há dois tipos de cal: a cal virgem, obtida através da calcinação de rochas cálcio-carbonatadas (calcários/dolomitos) em fornos com temperaturas superiores a 725°C, e a cal hidratada, obtida através da adição de água à cal virgem provocando a formação de hidróxido de cálcio e outros compostos. São necessários 1,7 a 1,8 t de rocha calcária para a fabricação de uma tonelada de cal virgem. Com uma tonelada de cal virgem se obtém 1,3 t de cal hidratada (MME, 2014).

Segundo Bessa (2010) existem no mercado nacional, três tipos de cales hidratadas diferenciadas pela sua composição. A diferença entre elas

se da, primeiro, pelo teor de óxidos totais e, segundo, pelo teor de carbonato ainda presente: a) a cal CH I com teor de óxidos totais acima de 90%, enquanto as cales CH II e III acima de 88%; b) as cales CH I e CH II devem ter no máximo 5% de CO₂, enquanto a cal CH III pode ter até 13%. Neste trabalho, a cal utilizada é a CH III, indicada para aplicação em argamassas. A Tabela 6 apresenta a descrição e as características físicas da cal utilizada neste estudo de caso.

Tabela 6 - Características físicas da cal.

material	descrição	massa unitária (kg/dm³)	massa específica (kg/dm³)
cal hidratada	tipo CH-III	0,77	2,42

Fonte: MUSTELIER (2008)

▪ *Agregados*

A NBR 9935 (2011) define agregado como o material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassas ou concretos, podendo ser natural, artificial, ou ainda reciclado. Os agregados naturais são materiais pétreos granulares que podem ser utilizados tal como encontrados na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem. Enquanto os agregados artificiais são submetidos a processos industriais que envolve alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria prima original. Por sua vez, os agregados reciclados são obtidos de processos de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial.

Os agregados aplicados na construção civil, basicamente areia e pedra britada, são obtidos através de processos de mineração. A norma NBR 7211 (2009c) fixa as características para classificação dos agregados, denominando como agregado miúdo os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, e agregado graúdo os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Segundo MME (2009a) brita é um termo utilizado para denominar fragmentos de rochas duras, originários de processos de beneficiamento (britagem e peneiramento) de blocos maiores, extraídos de maciços rochosos com auxílio de explosivos. As rochas mais comumente usadas na produção de brita são granito, gnaisse, basalto, diabásio, calcário e dolomito. No Brasil, cerca de 85% da brita produzida vem de granito/gnaisse, 10% de calcário/dolomito e 5% de basalto/diabásio.

Apesar de a NBR 7211 (2009c) não contemplar a denominação da antiga NBR 7225 (1993), comercialmente ainda utiliza-se esta denominação (Tabela 7).

Tabela 7 - Denominação comercial da brita.

nomenclatura	faixa granulométrica (mm)
pó de pedra	inferior a 0,075
brita 0 (pedrisco)	0,075 a 4,8
brita 1	4,8 a 12,5
brita 2	12,5 a 25
brita 3	25 a 50
brita 4	50 a 76
brita 5	76 a 100

Fonte: Adaptado de NBR 7225 (1993)

A extração de rocha para brita observa as mesmas características da extração de qualquer rocha dura a céu aberto, com extração em bancadas, consistindo-se de operações de decapeamento, perfuração e desmonte por explosivos, carregamento e transporte, e britagem.

As pedreiras trabalham com bancadas de alturas variadas, geralmente entre 9 m e 25 m. Os diâmetros dos furos mais comuns são 63 mm (2 ½”) e 89 mm (3 ½”) e são feitas por perfuratrizes hidráulicas. Em função de exigências ambientais, e a emulsão bombeada vem substituindo os explosivos encartuchados. Na maioria das pedreiras, o carregamento feito por carregadeiras sobre pneus é o mais comum.. O transporte da rocha para a britagem é feita por caminhões. Na britagem primária, são usados britadores de mandíbulas. Na britagem secundária, há tanto rebritadores de mandíbulas como cônicos. Na britagem terciária, predominam os cônicos (MME, 2009b).

A areia pode ser obtida a partir de depósitos de leitos de rios e planícies aluviais, rochas sedimentares e mantos de alteração de rochas cristalinas. Apesar de a NBR 7211 (2009) não contemplar a denominação da versão anterior da norma, comercialmente ainda utiliza-se esta denominação (Tabela 8).

Tabela 8 – Classificação comercial da areia.

abertura das peneiras (mm)		% em massa retida acumulada			
número	mm	zona 1 muito fina	zona 2 fina	zona 3 média	zona 4 grossa
0	9,5	0	0	0	0
2	6,3	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4	4,8	0 a 5(A)	0 a 10	0 a 11	0 a 12
8	2,4	0 a 5(A)	0 a 15(A)	0 a 25(A)	5(A) a 40
16	1,2	0 a 10(A)	0 a 25(A)	10 a 45(A)	20(A) a 70
30	0,6	0 a 20	21 a 40	45 a 65	66 a 85
50	0,3	50 a 85(A)	60(A) a 8(A)	70(A) a 92(A)	80(A) a 95
100	0,15	85(B) a 100	90(B) a 100	90(B) a 100	90(B) a 100

Fonte: Adaptado de NBR 7211 (1983)

Segundo MME (2009b) o processo de lavra da areia varia de acordo com o tipo de depósito mineral, podendo ser por desmonte hidráulico, desmonte mecânico, ou simplesmente por dragagem (Tabela 9).

Tabela 9 – Método de lavra da areia de acordo com a ocorrência.

ocorrência	método de lavra
não coesa, encontrada nos leitos de rios.	dragagem
não coesa, encontrada nas planícies aluviais.	desmonte hidráulico ou dragagem
não coesa, encontrada em dunas litorâneas; areia consolidada na forma de arenitos ou quartzitos; cascalho desagregado, resultante da alteração de rochas.	desmonte mecânico

Fonte: MME (2009b)

Segundo MME (2009b) o desmonte hidráulico é promovido pela ação de um jato de água sob pressão, que forma uma polpa composta por cerca de 15%, em massa, de material sólido. O método de lavra consiste no direcionamento de um jato de água de alta pressão sobre a base do

talude. Dessa forma, o material desmorona de forma controlada, sendo carregado em forma de polpa, com o auxílio da gravidade.

Na dragagem, um sistema de bombeamento realiza a sucção da polpa formada na superfície de ataque do leito submerso. O sistema de bombeamento pode ser realizado através de barcaça móvel, com auxílio de barco reboque que transporta o minério; ou barcaça com ancoragem fixa, com transporte do minério por tubulação sustentada sobre tambores flutuantes.

O desmonte mecânico é um método bastante simples. Trata-se de escavação mecânica direta do minério, por equipamentos de escavação e transporte do minério através de caminhões basculantes.

A etapa de beneficiamento da areia é um processo baseado em classificação por peneiras, silos de decantação, ou hidrociclonagem, que separam granulometricamente as frações de acordo com o interesse da mineradora.

A Tabela 10 apresenta a descrição e as características físicas dos agregados naturais utilizados neste trabalho.

Tabela 10 - Características físicas dos agregados.

material	descrição	massa unitária (kg/dm³)	massa específica (kg/dm³)
areia fina	zona 2	1,32	2,62
areia média	zona 3	1,45	2,64
brita 0	0,075mm a 4,8mm	1,47	2,69
pó de pedra	> a 0,075mm	1,52	2,69

Fonte: MUSTELIER (2002), ANDRADE (2004), MUSTELIER (2008)

▪ CzP

A cinza pesada utilizada nesta pesquisa é oriunda da esteira da unidade C do complexo termelétrico de Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo em Santa Catarina.

No processo de combustão do carvão para geração de energia, o carvão moído é pulverizado no interior da caldeira a temperaturas de até 1400°C. A material volátil e o carbono são queimados, enquanto as impurezas minerais permanecem em suspensão nos gases da combustão. Ao deixar a zona de combustão, as partículas de cinza fundidas são resfriadas rapidamente (de 1500°C para 200°C em poucos segundos), solidificando-se como partículas esféricas vítreas. Algumas dessas

partículas se aglomeram para formar as cinzas pesadas que caem no fundo da caldeira e são recolhidas por esteiras rolantes, enquanto outra parcela, denominadas cinzas leves, permanece em suspensão e são transportadas com o fluxo do gás da combustão e captadas por precipitadores eletrostáticos (LENZI, 2001).

Conforme Pozzobon (1999), no complexo termelétrico Jorge Lacerda, as cinzas pesadas, após desmanche dos grumos, são bombeadas com água para as lagoas de decantação, permanecendo ali até o completo preenchimento dessas lagoas, quando então são removidas e destinadas para áreas de recuperação ambiental. As cinzas leves são depositadas em silos e vendidas para uso na fabricação de cimentos.

A seguir são apresentados as características físicas da CzP considerada neste trabalho caso (Tabela 11).

Tabela 11 - Características físicas da CzP.

material	descrição	massa unitária (kg/dm³)	massa específica (kg/dm³)
CzP	Ø > 1,2mm	0,57	1,85

Fonte: MUSTELIER (2008)

3.1.1 Etapa 1: Definição de objetivo e escopo

3.1.1.1 Objetivo

O objetivo principal do estudo é o mesmo proposto para o trabalho de dissertação, ou seja, aplicar o método da ACV simplificada, do berço ao portão, em um estudo de caso comparativo entre um sistema vertical de vedação convencional e outro contendo adição de cinza pesada.

A razão para condução do estudo é a elaboração do inventário da cinza pesada, da areia e da brita com base em dados primários, de forma à contribuir para elaboração de um banco de dados nacional. Os resultados poderão ser utilizados em trabalhos futuros incentivando a incorporação da cinza pesada como material substituto, parcial ou total, em matrizes cimentícias.

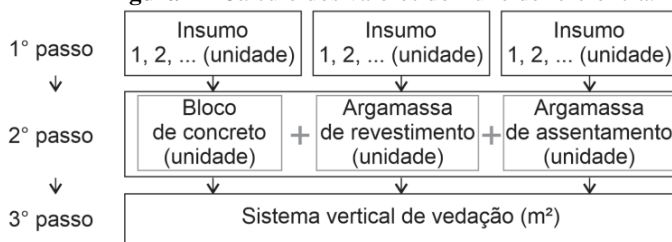
3.1.1.2 Escopo

A função do sistema vertical de vedação é de limitar verticalmente a edificação (ABNT NBR, 2013b).

A unidade funcional é definida com base no consumo de insumos necessários para confecção da vedação vertical do estudo de caso, apresentado por metro quadrado (m²).

Fluxos de referência são definidos como as quantidades necessária para que o sistema satisfaça as funções definidas pela unidade funcional. Para determina-los, os valores dos inventários individuais de cada insumo foram ajustados pelo equivalente consumido em cada subsistema. Sendo em seguida, somados para a quantificação do sistema vertical de vedação, conforme passos ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Cálculo dos valores do fluxo de referência.



Fonte: Autora

Neste estudo, a obtenção das quantidades se dá através do levantamento do projeto de alvenaria, disponibilizadas pelo ValoRes. Os cálculos foram realizados com o auxílio do *software Microsoft Excel 2013*.

A Tabela 12 apresenta os fluxos de referência obtidos para este estudo de caso. O inventário final do sistema vertical de vedação, será referido as essas quantidades mássicas.

Tabela 12- Total de insumo consumido por unidade funcional de cada cenário.

material	insumo	cenário A	cenário B
		(kg)	(kg)
bloco de concreto 1 m ²	CP V-ARI	13,10	13,10
	areia fina	22,50	-
	CzP	-	15,90
	areia média	26,20	26,20
	pó de pedra	59,90	59,90
	brita 0	37,50	37,50

... continuação Tabela 12

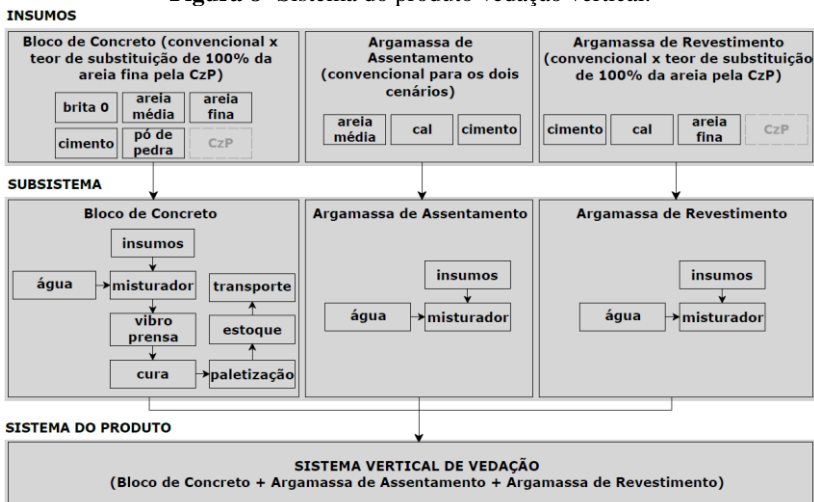
argamassa de assentamento 1 m ²	CP II-F	3,93	3,93
	cal CH-III	3,11	3,11
	areia média	20,20	20,20
argamassa de revestimento 1 m ²	CP II-F	9,64	9,64
	cal CH-III	21,43	21,43
	areia fina	47,32	-
	CzP	-	33,40

Fonte: Autora

3.1.1.2.1 Definições dos sistemas de produto

Para elaboração do ciclo de produção do sistema de vedação vertical dos cenários analisados, serão considerados três subsistemas: bloco de concreto, argamassa de revestimento e argamassa de assentamento. Os insumos necessários para confecção desses subsistemas são: cimento Portland, cal, areia e brita. Para o cenário B, com uso de material alternativo, a areia é substituída pela CzP nos subsistemas: bloco de concreto e argamassa de revestimento, como ilustrado pelo modelo representativo da Figura 8.

Figura 8- Sistema do produto vedação vertical.

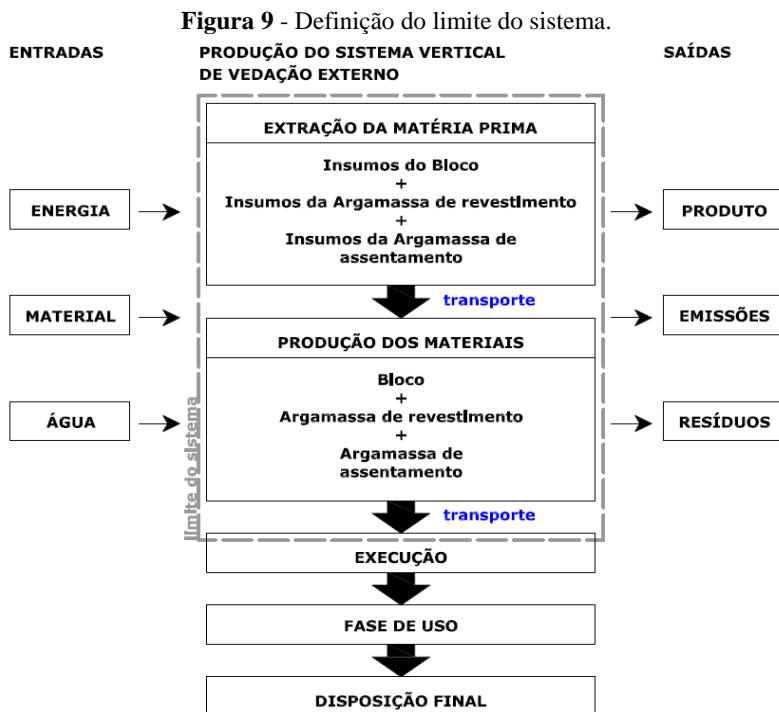


Fonte: Autora

3.1.1.2.2 Fronteira do sistema

Devido ao objetivo do estudo, a análise será *cradle to gate* (berço ao portão), ou seja, considera as etapas do ciclo de vida das matérias-primas utilizadas para a confecção dos produtos, incluindo: extração da matéria-prima, produção dos materiais e transporte para distribuição, considerando ainda o consumo de combustíveis para o transporte nas mudanças de fase e consumo de recursos para a produção dos subsistemas.

Em relação as etapas consideradas na análise, está fora do limite do sistema as etapas de construção, uso e disposição final. Não são considerados dentro do limite do sistema as esquadrias, instalações elétricas e a pintura. Esta decisão é justificada, uma vez que, o processo construtivo, a necessidade de manutenção, a exigência de energia da fase de operação e a disposição final, foram assumidos como equivalentes para os dois cenários simulados, conforme Figura 9.



Fonte: Autora

O sistema do produto considera o cálculo das questões referente aos fluxos de entrada (consumo de recursos naturais, consumo de materiais e combustíveis e consumo de recursos energético) e de saída (resíduos, emissões para o ar, emissões para água e emissões para o solo), ao longo do ciclo de vida do sistema analisado.

3.1.1.2.3 Procedimento de alocação

Diferentes procedimentos de alocação foram considerados para elaboração desse estudo. O critério de alocação em massa foi considerado para a areia, brita e bloco de concreto.

Para a cinza pesada foi adotado o critério econômico, uma vez que o critério por massa agrega carga ambiental excessiva no caso de subprodutos e, portanto, torna o seu aproveitamento obsoleto a partir do ponto de vista ambiental, enquanto a alocação por valor econômico é defendida por ser uma abordagem mais razoável (HEEDE; BELIE, 2012).

O cálculo do fluxo do subproduto é baseado no estudo de Chen *et al.* (2010) descrito pela equação 2:

$$F_{\text{subproduto}} = Ce \cdot F_{\text{processo primário}} + F_{\text{processo secundário}} \quad (2)$$

Onde,

$F_{\text{subproduto}}$ = fluxo do subproduto;

Ce = coeficiente de alocação econômico;

$F_{\text{processo primário}}$ = fluxo do processo primário;

$F_{\text{processo secundário}}$ = fluxo do processo secundário;

Sendo, Ce calculado pela equação 3:

$$Ce = \frac{(\$ \cdot m)_{\text{subproduto}}}{(\$ \cdot m)_{\text{produto principal}} + (\$ \cdot m)_{\text{subproduto}}} \quad (3)$$

Onde,

(\$) é o preço unitário do material;

(m) é a massa do material produzido durante o processo.

Como a relação econômica é flutuante e influenciada por questões econômicas, no final do trabalho é realizada a análise de sensibilidade, de forma a ilustrar a influência do processo de alocação sobre os resultados encontrados.

3.1.1.2.4 Seleção de impactos e metodologia de avaliação

Como questão central foi adotado o potencial de aquecimento global (PAG) do inglês *global warming potential* (GWP), uma vez que é de grande relevância mundial. Para o cálculo foi adotado a metodologia do IPCC (IPCC, 2006), horizonte de tempo de 100 anos. A escolha desta metodologia é pautada pela ampla aceitação no meio científico (PRÉ, 2016; JRC-IES, 2011).

De acordo com a classificação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 2008), os gases relacionados diretamente ao efeito estufa, são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs); hexafluoreto de enxofre (SF₆). Neste estudo, foram identificados na etapa de inventário os gases de GEE diretos: CO₂, CH₄, N₂O.

Na etapa de coleta de dados, foi identificada a necessidade de incluir os GEE indiretos: dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (VOC), e material particulado (MP). Esses elementos afetam a qualidade do ar e, quando ultrapassam determinados limites de concentração, podem afetar também a saúde da população, além de contribuírem para a formação de chuva ácida (MME, 2007).

Devido a relevância para a construção civil serão abordadas questões referente ao consumo de energia e consumo de água. Apesar de não serem necessariamente categorias de impacto o consumo desses fatores estão relacionadas a impactos ambientais importantes. A seleção de um modelo de caracterização específico para estas questões ainda carece de uma metodologia consistente. Desta forma neste estudo optou-se pela quantificação ao longo do ciclo de vida desses fatores, sem no entanto relacioná-los à fatores de caracterização.

Para não restringir o estudo a análise de único problema, foi selecionada entre as metodologias disponíveis no *software* de apoio, o método CML (GUINÉE *et al.*, 2002). A escolha é justificada por duas razões: (1) por ser um método de ponto médio, o que permite realizar comparação entre as diferenças relativas as categorias impacto e; (2) por englobar, além do método do IPCC para determinar PAG, as seguintes categorias relevantes para o estudo:

- a) acidificação: expressa o dano causado devido aos poluentes lançados no ar que causam alteração na água e no solo, destaque para NH_x, SO_x

- e NO_x . Como efeito, causa a chuva ácida que impacta na fauna e na flora;
- b) esgotamento dos recursos abióticos: considera o depleção devido a extração de recursos naturais;
 - c) eutrofização: abrange todos os impactos potenciais dos níveis excessivamente elevados ambientais de macronutrientes, destaque para o nitrogênio (N), carbono (C) e fósforo (P);
 - d) formação de ozônio fotoquímico: são avaliados determinados poluentes atmosféricos primários que pela ação da luz solar contribuem para formação de oxidantes fotoquímicos na troposfera, através da reação de VOCs e CO na presença de NO_x , dentre os quais destacam-se o ozônio (O_3), o peroxiacetil nitrato (PAN) e o dióxido de nitrogênio (N_2O). Esses poluentes são prejudiciais para a saúde humana e para o ecossistema; e
 - e) toxicidade humana: expressa os danos causados sobre a saúde humana devido a exposição as substâncias tóxicas presentes no solo, água e ar;
 - f) uso do solo: abrange os efeitos sobre a biodiversidade resultantes da transformação, uso e ocupação do solo.

Além, dessas categorias o método ainda engloba a categoria de impacto de redução da camada de ozônio, como resultado das emissões antropogênicas. No entanto, essas emissões não fazem parte do escopo de elaboração deste estudo de caso, portanto esta categoria não será aqui abordada.

Outra categoria inclusa no método é a de ecotoxicidade, que expressa os danos causados em espécies aquáticas e terrestres devido a exposição a substâncias tóxicas presentes no solo, água e ar. Em estudos envolvendo o aproveitamento de subprodutos da combustão do carvão é uma questão importante, relacionada a lixiviação, para águas superficiais ou subterrâneas, dos elementos-traços presentes na estrutura destes resíduos, quando da sua disposição final.

No entanto, as avaliações ambientais dos impactos na saúde humana resultantes do uso benéfico das cinzas da combustão do carvão, como alternativa na substituição de matérias-primas virgens não são bem compreendidas (BABBITT; LINDNER, 2008).

Segundo Pozzobon (1999) o potencial poluidor das cinzas dependem das concentrações dos elementos tóxicos e do grau de solubilização destes elementos no ambiente natural. De modo geral, nas análises realizadas com a cinza produzida no CTJL, os resultados dos testes de lixiviação não ultrapassam os limites prescritos, classificando-a como resíduo não perigoso.

Devido a estes fatos, somados as rigorosas normas de controle das instalações para disposição das cinzas da combustão do carvão, este estudo é assumido que no CTJL a eliminação é realizada com medidas adequadas de controle ambiental, não apresentando risco significativo para a saúde humana ou ambiental.

3.1.1.2.5 Requisitos de qualidade dos dados

A coleta de dados combina dados primários e secundários. Como a razão da elaboração desse estudo é contribuir para o uso da cinza pesada como material substituto em matrizes cimentícias, foi definido que os dados dos insumos: areia, brita e cinza pesada seriam de fontes primárias. Assim, como os inventários dos subsistemas: argamassa de revestimento, argamassa de assentamento e bloco de concreto.

Dados secundários são adotados para os CP's e para a cal. Essa premissa foi assumida uma vez que neste estudo de caso, estes insumos são utilizados na mesma proporção para os dois cenários, portanto, não influenciam nos resultados globais.

Na elaboração dos ICV's com fontes primárias, com objetivo de garantir a temporalidade das informações, foram adotados dados médios de consumo por um período não inferior a doze meses e não superior a dois anos.

Para garantir a representatividade, a seleção das empresas para coleta de dados partiu da relação de fornecedores da empresa de pré-moldados fornecedora do bloco de concreto utilizado na execução do protótipo, portanto, são empresas locais que representam a prática de produção nacional.

Os inventários de segundo plano, definidos como as matérias-primas para fabricação do cimento Portland, o carvão utilizado no CTJL, o explosivo e os combustíveis, foram obtidos em fontes secundárias. Para garantir a representatividade deu-se preferencia para uso de fontes nacionais. Sempre que possível foi utilizado dados médios da indústria divulgados por órgãos do governo.

3.1.2 Etapa 2: Análise do ICV

Esta etapa seguiu o procedimento normativo descrito no capítulo 2, que consiste resumidamente na coleta e transformação dos dados para uma mesma plataforma de apoio.

A coleta de dados primários junto às empresas foi constituída de visitas e envio de um questionário padrão. O questionário foi desenvolvido no *software Microsoft Excel 2013*, considerando a identificação do processo de fabricação, período de coleta e explicação detalhada do consumo de recursos (matérias-primas, água, combustível e energia) e de resíduos gerados no processo produtivo. Além, de informações da produção total da fábrica a fim de determinar o processo de alocação dos produtos analisados. O modelo padrão adotado consta no Apêndice A.

As visitas envolveram, além da aplicação do questionário, coleta de acervo fotográfico e entrevistas com os profissionais responsáveis. Dados insuficientes foram posteriormente recolhidos através de novas visitas e trocas de e-mails.

Para o cálculo do volume mensal consumido pelos equipamentos movidos à óleo diesel, foi considerado turno de trabalho de segunda a sexta, 22 dias úteis por mês, com 8 horas de trabalho efetivo por dia, totalizando 176 horas mensais.

Na elaboração dos inventários com dados primários, deu-se preferência ao uso de informações fornecidas pelas empresas, de forma à garantir fidelidade na representação dos processos industriais aplicados pela indústria nacional. Porém, devido a indisponibilidade de dados referente as emissões atribuídas aos recursos de segundo plano, foi necessário recorrer a literatura específica e ao banco de dados disponível no *software* de apoio.

A determinação das emissões atmosféricas da reação de detonação do explosivo foi realizada através da análise estequiométrica, que permite determinar a relação de cada gás gerado por unidade de massa de explosivo. O cálculo considera uma reação em equilíbrio, ou seja, onde todos os gases são decompostos.

Em condições ideais os gases gerados na detonação de explosivos constituem-se principalmente de gás carbônico (CO₂), nitrogênio (N₂) e vapor d'água (H₂O). Como pode ser observado na reação da decomposição do ANFO, Equação 4 (TORRES E GAMA, 2005).



Para determinar o fluxo de cada substância química gerada na reação de detonação de 1 g de explosivo foi adotado o procedimento de cálculo apresentado em SILVA (2014). Com base na equação 4, considerando um balanço perfeito, são obtidos os valores da Tabela 13.

Tabela 13 - Substâncias química geradas na reação de detonação do explosivo.

emissão	quantidade (mg)
<u>fluxos de entrada</u>	
nitrato de amônio ($N_2H_4O_3$)	945
óleo diesel (CH_2)	55
<u>fluxos saída</u>	
dióxido de carbono (CO_2)	173
vapor de água (H_2O)	496
gás nitrogênio (N_2)	331

Fonte: SILVA (2014)

Para determinar as emissões atmosféricas resultante da queima do óleo diesel foi utilizado os valores disponibilizados pelo MCT (2006), conforme Tabela 14. O valor da densidade do óleo diesel adotada é de 852 g/l.

Tabela 14 - Fatores de emissão por litro de óleo diesel utilizado em transporte rodoviário de frota pesada no Brasil.

emissão (g/l)						
gás	CO₂	CO	CH₄	NO_x	N₂O	VOC
emissão	2799	60,5	0,18	77,6	$2,2 \times 10^{-3}$	14,72

Fonte: MCT (2006)

Referente ao uso da energia elétrica foi adotado o valor de 135,5 kg CO₂/MWh que representa a média de emissão para o ano de 2014, disponibilizado em MCT (2015).

As emissões dos GEE resultantes da operação da CTJL foi determinada a partir de fonte primária para SO₂, NO_x e MP, que foram obtidos a partir dos relatórios de monitoramento das emissões atmosféricas fornecidos pela empresa e através da realização do procedimento de cálculo de acordo com a metodologia do IPCC (2006) para os demais gases. Os fatores de emissão utilizados e os passos realizados constam no Apêndice B. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 15 - Fatores de emissão por MWh de energia gerada na CTJL em 2013.

	emissão (kg/MWh)						
gás	CO ₂	CO	NO _x	SO ₂	N ₂ O	CH ₄	MP
emissão	1070,98	0,16	2,53	16,32	0,02	0,01	0,33

Fonte: Autora, calculado a partir de IPCC (2006)

Outras emissões atmosféricas de preocupação nas usinas de energia movidas à carvão são os elementos-traço. A quantidade de elementos-traço contidos nos diferentes tipos de carvão são facilmente obtidos nas mineradoras de carvão, no entanto, dados documentados para as emissões a partir da combustão do carvão só foi possível em fontes secundárias. Neste trabalho, são utilizados valores obtidos a partir de *Electricity, bituminous coal, at power plant/US*, disponível na biblioteca do *software* de apoio. O inventário foi elaborado por *USLCI Database* (NREL, 2012), sendo os dados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Emissão atmosférica de elementos-traço por termelétrica.

elemento	emissão (g/MWh)
antimônio (Sb)	3,98E-09
arsênio (As)	9,06E-08
berílio (Be)	4,64E-09
cádmio (Cd)	1,13E-08
cromo (Cr)	5,74E-08
cobalto (Co)	2,21E-08
chumbo (Pb)	9,28E-08
manganês (Mn)	1,08E-07
magnésio (Mg)	2,43E-06
mercúrio (Hg)	1,83E-08
níquel (Ni)	6,19E-08
selênio (Se)	2,87E-07

Fonte: *USLCI Database* (NREL, 2012)

Além dos dados relacionados as emissões atmosféricas, na modelagem do inventário da CzP dados a partir da literatura foram adotados para determinar o crédito referente ao aterro evitado, obtidos em *GAI Consultants apud NREL* (1999). O estudo apresenta o consumo de combustível dos equipamentos necessários para transportar e compactar o material no aterro. O transporte é assumido como realizado por

caminhões a uma distância de 5 km a partir da usina. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos do consumo de óleo diesel por tonelada de cinza da combustão do carvão.

Tabela 17 - Consumo de combustível para deposição das cinzas da combustão do carvão.

equipamento	quantidade (l/kg)
escavadeira	0,23
compactador	0,43
nivelador	0,31
retroescavadora	0,078
caminhão	0,16

Fonte: GAI Consultants apud NREL (1999).

Ainda para modelagem da CzP foram adotados dados a partir da literatura para modelagem do carvão energético utilizado no CTJL. Os dados foram obtidos a partir de Restrepo *et al* (2015), os dados das emissões para o ar e para água foram obtidos em Silva *et al.* (2010), e Schneider (2006), respectivamente. A Tabela 18 apresenta os fluxos de entrada e de saída para produção de uma tonelada de carvão energético proposto pelo autor.

Tabela 18 - ICV do carvão energético.

emissão	quantidade	unidade
<u>fluxos de entrada</u>		
<u>Consumo de recursos</u>		
Carvão ROM	2,39E+03	kg/t
Água drenada da mina	4,34E+00	m ³ /t
Água pluvial	2,65E+00	m ³ /t
<u>Consumo de materiais e combustíveis</u>		
Cal	3,50E+00	kg/t
Explosivos	1,48E+00	kg/t
Óleo diesel	1,53E+00	l/t
<u>Consumo de recursos energéticos</u>		
Eletricidade	4,61E+00	kWh/t

.... continuação tabela 18

emissão	quantidade	unidade
<u>fluxos de saída</u>		
<u>Emissões para o ar</u>		
Metano (CH ₄)	2,44E+00	kg/t
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,24E-01	kg/t
<u>Emissões para água</u>		
Sólidos totais	1,86E+01	kg/t
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	9,52E+00	kg/t
Alumínio (Al)	5,38E-03	kg/t
Cobre (Cu)	3,50E-05	kg/t
Ferro (Fe)	5,43E-03	kg/t
Manganês (Mn)	2,73E-02	kg/t
Zinco (Zn)	9,79E-04	kg/t
<u>Emissões para o solo</u>		
Rejeitos	1,39E-03	kg/t

Fonte: Adaptado de RESTREPO *et al.* (2015).

Na modelagem do sistema principal, fontes secundárias foram adotadas para os insumos: cimento e cal. Como critério de simplificação os fluxos de entrada e de saída foram limitados ao consumo de energia, de combustíveis, água e emissões de CO₂.

O inventário da cal hidratada foi realizado através da elaboração do inventário da cal virgem. A relação estabelecida foi de 1,3 t de cal virgem para obtenção de uma tonelada de cal hidratada (MME, 2014). O consumo de água foi estabelecida considerando a subtração da parcela relativa à adição de água, o que equivale dizer que 23% da massa da cal hidratada é constituída por água.

A estimativa das emissões de CO₂ considera o carbono liberado pelas seguintes fontes: (1) descarbonatação do calcário; (2) queima de combustíveis no processo produtivo da cal e (3) uso de energia elétrica.

As emissões de CO₂ provenientes da descarbonatação foram obtidos em John, Punhagui e Cincotto (2014), que estimaram para a cal dolomítica CH-III o valor máximo de 547 kg CO₂/t. Para o consumo de combustíveis e de eletricidade, adotou-se os dados de consumo médio da produção da cal virgem na indústria brasileira, disponibilizados por MME (2014) (Tabela 19).

Tabela 19 - Consumo de combustíveis e energético para produção da cal virgem.

insumo	quantidade	unidade
<i>Consumo de combustíveis</i>		
lenha	149	kg/t
coque de petróleo	49	kg/t
<i>Consumo de recurso energético</i>		
eletricidade	15	kWh/t

Fonte: MME (2014)

Para elaboração do inventário do cimento Portland a estimativa das emissões de CO₂ considera o carbono liberado pelas seguintes fontes: (1) produção do clínquer; (2) produção do CP; (3) queima de combustíveis no processo produtivo da cal e (4) uso de energia elétrica.

As emissões relacionados ao processo produtivo foram tomados a partir das médias da indústria nacional divulgados por MCT (2010a). Sendo considerado a emissão de 0,545 t CO₂ para produção de uma tonelada de clínquer e 0,371 t CO₂ para a produção de uma tonelada de CP. O consumo de água foi estabelecido em 100 litros por tonelada, obtido em ABCP (2014). O consumo de combustíveis e de eletricidade foi determinado a partir de dados médios da indústria nacional, disponibilizados por MME (2008) (Tabela 20).

Tabela 20 - Consumo de energia e de combustível para produção do CP.

insumo	unidade	quantidade
<i>Consumo de combustíveis</i>		
coque de petróleo	59,1	kg/t
lenha	7,4	kg/t
carvão mineral	2	kg/t
óleo diesel	0,9	kg/t
óleo combustível	0,6	kg/t
gás natural	0,6	kg/t
<i>Consumo de recurso energético</i>		
eletricidade	93	kWh/t

Fonte: MME (2008)

Como critério de simplificação a modelagem dos combustíveis foi limitada a determinação das emissões de CO₂ e da energia embutida. Para as emissões de CO₂ provenientes do consumo dos combustíveis foram adotados os valores a partir de CETESB (2009). Os valores da energia embutida foram obtidos em Silva (2013), listados na Tabela 21 e na Tabela 22, respectivamente. A massa específica do gás natural (20°C, 1 atm) adotada é de 0,78 kg/m³.

Tabela 21 – Fatores de emissão de CO₂ por tipo de combustível.

combustível	fator de emissão (kg CO₂/t)
coque de petróleo	3.410,10
lenha	1.447,41
carvão mineral	1.667,91
carvão vegetal	3.016,21
óleo diesel	3.119,97
óleo combustível	3.094,36
gás natural	2.919,97

Fonte: CETESB (2009)

Tabela 22 – Energia embutida por tipo de combustível.

combustível	energia (GJ/t)
coque de petróleo	35,09
lenha	0,0036
carvão mineral	28,89
carvão vegetal	0,01
óleo diesel	44,36
óleo combustível	40,15
gás natural	47,23

Fonte: SILVA (2013)

Além dos dados de produção, para elaboração dos inventários do cimento e da cal, foram contabilizados os fluxos referente as etapas de transporte. Para a cal, o transporte de distribuição foi assumido como sendo rodoviário, realizado por caminhões com capacidade de 23 t, com consumo de 2,5 km/l. Considerou-se uma distância de 300 km referente ao percurso entre a fábrica Cal Gulim, localizada no Paraná e a UFSC.

O transporte das matérias-primas para produção do cimento Portland, foi assumido como sendo rodoviário, realizado por caminhões com capacidade de carga de 16 t, com consumo de 2,5 km/l. Considerou-se uma distância média de 150 km a partir dos locais de extração da areia, do calcário e da argila até a fábrica do cimento. Para a etapa de distribuição a capacidade de carga dos caminhões foi considerada como sendo de 45 t, com consumo de 3,5 km/l. A distância assumida é de 100 km que representa a distância entre a UFSC e a fábrica da Votorantim Cimentos, localizada na cidade de Itajaí.

Na construção do cenário de uso benéfico da cinza pesada, para determinar o coeficiente de alocação, foi necessário estabelecer o preço referente a energia elétrica e da CzP. Para energia elétrica, o preço foi fixado em 201,88 R\$/MWh, referente ao valor estabelecido para venda de energia pelas usinas térmicas à carvão mineral, acordado no leilão A-5 pela ANEEL (ANEEL, 2014).

O preço da CzP foi estabelecido a partir de Pozzobon (1998), uma vez que a empresa optou por não divulgar os valores comerciais atuais (Tabela 23). Esse valor é baseado no preço mínimo estabelecido pelo Comissão de Estudos de Combustíveis (CEC) do GCOI (Grupo Coordenador para Operação Interligada), em julho de 1994, para comercialização das cinzas provenientes de termelétricas.

Tabela 23 - Preço mínimo para comercialização das CCCs.

insumo	valor (R\$/t)
CzL	19,40
CzP	0,74

Fonte: POZZOBON (1998)

Devido às flutuações econômicas foi realizada a conversão para o valor presente, o cálculo foi realizado através da indexação de um multiplicador definido com base nas taxas variação do Índice Nacional de Custo da Construção (INCC), entre julho de 1994 à dezembro de 2014, conforme Apêndice C. Na Tabela 24 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 24 – Valor presente do preço mínimo para comercialização das CCCs.

insumo	valor (R\$/t)
CzL	121,42
CzP	4,63

Fonte: Autora

Concluída a etapa de coleta de dados, com base na unidade funcional definida foi realizada a correlação dos dados. Os dados brutos, provenientes de diferentes unidades funcionais foram inicialmente convertidos em quantidade de insumos (cimento, cal, brita, areia e CzP) por tonelada (t). Sendo posteriormente ajustados pelo equivalente consumido para a produção de cada subsistema. Por fim, os totais foram somados para a quantificação final do fechamento vertical do protótipo, sendo os dados apresentados por m² de fechamento vertical da edificação.

3.1.3 Etapa 3: Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

O AICV é realizado com base na modelagem dos fluxos obtidos na etapa de inventário, através do *software* SimaPro versão 8 (*Faculty*), que é amplamente utilizado por pesquisadores de ACV (PIERAGOSTINI; MUSSATI; AGUIRRE, 2012). O primeiro passo, após a conclusão do lançamento dos dados na plataforma de apoio, envolve a seleção do método e das categorias de análise. Depois disso, o *software* realiza o agrupamento dos fluxos de entradas e saídas às suas respectivas categorias de impacto. Por fim, o indicador de cada categoria é estimado de acordo com o método selecionado.

Neste estudo além da identificação unitária do consumo de energia (CE) e do consumo de água (CA), para a caracterização das demais categorias analisadas, foi adotado o método CML (GUINÉE *et al.*, 2002).

O método CML foi desenvolvido pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leinden, na Holanda, é um método de ponto médio, portanto não considera procedimentos de ponderação e agregação. Para cada categoria de impacto são considerados fatores de caracterização, ou seja, os dados modelados na etapa de inventário são multiplicados por valores previamente definidos para obtenção do indicador de impacto da categoria. Os fatores considerados para obtenção desses indicadores, para as categorias analisadas neste estudo de caso, são resumidos na Tabela 25.

Tabela 25- Procedimento de determinação dos indicadores de categoria.

acidificação (kg de SO₂ eq.)
Utiliza o modelo RAINS10 para relacionar os efeitos das emissões de substâncias acidificantes aos efeitos das emissões de SO ₂ eq., expresso em kg de SO ₂ eq./kg.

...continuação tabela 25

esgotamento dos recursos abióticos (kg de Sb eq.)
Está relacionado com a extracção de minerais e de combustíveis fósseis que entram no sistema. É determinado para cada extracção de minerais e de combustíveis fósseis (kg de antimônio (Sb) eq./kg recurso abiótico) baseado nas suas reservas e taxa de desacumulação.
eutrofização (kg de PO ₄ eq.)
Utiliza a relação estequiométrica para identificar a equivalência entre N e P para deposição nos sistemas terrestre e aquático, expresso em kg de fosfato, expresso em PO ₄ eq./kg emissão.
Formação de ozônio fotoquímico (kg de etileno eq.)
Utiliza o modelo UNECE para relacionar as emissões para o ar de VOC e CO à criação de ozônio fotoquímico, expresso em kg de etileno (C ₂ H ₄) eq./kg emissão.
potencial de aquecimento global (kg de CO ₂ eq.)
Adota o modelo do IPCC para o cálculo de PAG, horizonte de 100 anos, expresso em kg de CO ₂ eq. /kg de emissão.
toxicidade humana (em kg de 1,4-diclorobenzeno eq.)
Utiliza o modelo USES 2.0, que relaciona o destino e os efeitos de diferente substâncias tóxicas, expresso em kg de 1,4- diclorobenzeno (C ₆ H ₄ Cl ₂) eq./kg de emissão.
uso do solo (m ² .a)
Agregação não ponderada adota um fator para cada tipo de ocupação do solo, expresso em m ² .ano
Fonte: Adaptado de GUINÉE et al. (2002)

Como a mudança climática é uma das questões centrais, em grande parte dos estudos de avaliação do ciclo de vida, é importante compreender o método do IPCC 2007 adotado no CML (GUINÉE *et al.*, 2002). Os GEE não contribuem para o aquecimento climático de forma equivalente. Assim, para permitir a contabilização em uma unidade comum, a metodologia do IPCC adota a conversão das contribuições dos GEE em um índice de equivalência, para um determinado horizonte de tempo (20, 100 e 500 anos). A equação 5 demonstra como os fluxos de emissões atmosféricas são convertidos em indicador, expresso em kg de CO₂ eq.:

$$I_{PAG} = \sum_{i=1}^n PAG_i \cdot m_i^{GEE} \quad (5)$$

Onde,

I_{PAG} = indicador de potencial de aquecimento global, (kg CO₂ eq.);

n = número de gases analisados;

PAG = potencial de aquecimento global de cada GEE analisado (kg de CO₂ eq./kg de GEE);

m_i^{GEE} = é a emissão do GEE relacionado ao processo (kg).

A conversão da contribuição de cada gás, é baseado em fatores de caracterização com base na eficiência radiativa e taxa de degradação na atmosfera de cada GEE emitido, conforme exemplos ilustrados na Tabela 26.

Tabela 26 -Fatores de equivalência para caracterização do PAG horizonte de 100 anos.

GEE	Fator de caracterização (g CO ₂ eq./g substância)
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

Fonte: Adaptado de IPCC (2007).

Para o cálculo das emissões, a metodologia do IPCC utiliza o volume de combustíveis fósseis queimados por ano, transformando esse valor para o equivalente de energia térmica gerada e calculando o total de emissões, para cada combustível, através da aplicação do fator de emissão, conforme equação 6:

$$E_{GEE} = C_{combustível} \cdot PCI_{combustível} \cdot F_{emissão} \quad (6)$$

Onde,

E_{GEE} = emissões totais do GEE (t);

$C_{combustível}$ = consumo de combustível (t);

$PCI_{combustível}$ = poder calorífico inferior do combustível (TJ/t);

$F_{emissão}$ = fator de emissão do GEE para o combustível (t/TJ).

A normalização é considerada como opcional para ACVs simplificadas e portanto não será aplicada neste estudo de caso.

3.1.4 Etapa 4: Interpretação do ciclo de vida

Os resultados da AICV são apresentados pelo *software* através de tabelas e de gráficos, que determinam os indicadores de impacto obtidos na etapa de AICV. Com base nos resultados obtidos, para cada categoria de impacto, foram elaborados novos gráficos com auxílio do *software Microsoft Excel 2013*, que permitiram a realização das análises críticas.

As análises envolveram a comparação percentual dos resultados obtidos para as diferentes etapas ao longo do ciclo de vida do sistema do produto. O objetivo foi correlacionar os resultados dos indicadores de categoria às causas e fatores relevantes.

A interpretação individual de cada ICV está além do escopo deste estudo, que foi centrado nos inventários dos agregados e da CzP, os quais envolveram coleta de dados primária. Após análise individual, foi realizada a comparação entre os resultados obtidos para a areia e para a CzP, à fim de identificar as questões relevantes na adoção da cinza pesada como material substituto em matrizes cimentícias.

Em seguida foi realizada análise do sistema do produto dos cenários A e B, sendo uma análise comparativa entre eles realizada no final a fim de atender ao objetivo proposto neste trabalho.

No final é apresentado uma análise de sensibilidade, referente aos valores atribuídos no procedimento de alocação adotado no ICV da cinza pesada, para verificar a influência dos valores atribuídos no resultado global do estudo.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo. Inicialmente os inventários são apresentados conforme as etapas da metodologia proposta, que considera a elaboração dos ICV's individuais dos insumos, dos subsistemas e do sistema do produto dos cenários analisados.

Em seguida é realizada análise e interpretação dos resultados obtidos para os inventários dos agregados naturais e da CzP. Uma análise comparativa entre os inventários da areia e da CzP é realizada com o objetivo de identificar as questões ambientais relevantes a serem consideradas na aplicação da cinza pesada como material substituto da areia.

Por fim os resultados dos sistemas do produto dos cenários A e B são discutidos e comparados, a fim de atender ao objetivo do estudo de aplicar o método da ACV a um estudo de caso comparativo, entre um sistema vertical de vedação convencional e outro contendo adição de cinza pesada.

4.1 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

A seguir serão apresentados os fluxos de entrada e de saída utilizados para modelagem dos ICV's dos insumos: cimento Portland, cal, areia, brita e cinza pesada; que permitem a realização do ICV do sistema do produto.

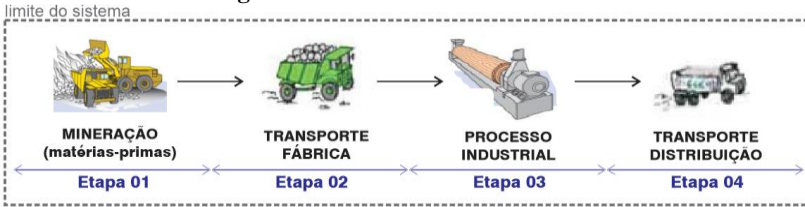
4.1.1 Inventário dos insumos

4.1.1.1 ICV dos CP's

Os inventários dos cimentos Portlands, CP II –F e CP V-ARI, foram elaborados baseados em dados secundários obtidos na literatura. Esses dados representam as médias do setor e são detalhados no capítulo 3.

A análise considera as etapas de (1) mineração das matérias-primas; (2) transporte das matérias-primas para fábrica; (3) processo industrial e; (4) transporte para distribuição, conforme fluxograma apresentado na Figura 10.

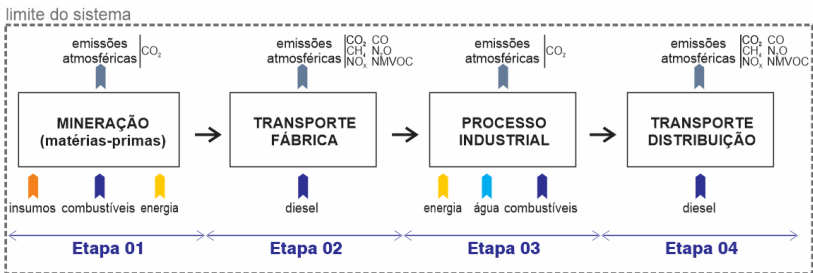
Figura 10 – Limite do sistema do CP.



Fonte: Autora

A Figura 11 apresenta o fluxograma de entrada e de saída considerados dentro do limite do sistema na elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida dos CP's. O processo industrial é descrito no capítulo 3.

Figura 11 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema dos CP's.



Fonte: Autora

A Tabela 27 apresenta os Inventários do Ciclo de Vida dos CP's, considerando a produção de uma tonelada.

Tabela 27 –ICV's dos CP's.

Dado coletado	CP II-F		CP V-ARI		fonte
1. MINERAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS					
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
C clínquer	*	t/t	8,50E-01	t/t	9,27E-01 t/t 1
Gesso	*	t/t	5,00E-02	t/t	2,28E-02 t/t 1
Material carbonático	*	t/t	1,00E-01	t/t	5,00E-02 t/t 1

...continuação tabela 27

	Dado coletado		CP II-F		CP V-ARI		
1. MINERAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS							
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>1.2.1. Emissões atmosféricas</u>							
Proveniente da produção do clínquer							
Dióxido de carbono (CO ₂)	5,45E-01	t/t	4,63E-01	t/t	5,05E-01	t/t	2
2. TRANSPORTE PARA FÁBRICA							
2.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>2.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>							
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	1,79E+00	l/t	1,79E+00	l/t	3
2.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>2.2.1. Emissões atmosféricas</u>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	5,01E+03	g/t	5,01E+03	g/t	4
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	1,08E+02	g/t	1,08E+02	g/t	4
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	3,26E-01	g/t	3,26E-01	g/t	4
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	1,39E+02	g/t	1,39E+02	g/t	4
Óxido nítrico (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	3,94E-03	g/t	3,94E-03	g/t	4
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	2,63E+01	g/t	2,63E+01	g/t	4
3. PROCESSO INDUSTRIAL							
3.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>3.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>							
Coque de petróleo	5,91E+01	kg/t	5,91E+01	kg/t	5,91E+01	kg/t	5
Carvão vegetal	7,40E+00	kg/t	7,40E+00	kg/t	7,40E+00	kg/t	5
Carvão mineral	2,00E+00	kg/t	2,00E+00	kg/t	2,00E+00	kg/t	5
Óleo diesel	9,00E-01	kg/t	9,00E-01	kg/t	9,00E-01	kg/t	5
Óleo combustível	6,00E-01	kg/t	6,00E-01	kg/t	6,00E-01	kg/t	5
Gás natural	6,00E-01	kg/t	6,00E-01	kg/t	6,00E-01	kg/t	5
<u>3.1.2. Consumo de recursos</u>							
Água	1,00E+02	l/t	1,00E+02	l/t	1,00E+02	l/t	6
<u>3.1.3. Consumo de recursos energéticos</u>							
Eletricidade							
Processo produtivo	9,30E+01	kWh/t	9,30E+01	kWh/t	9,30E+01	kWh/t	5
Combustíveis	6,49E+02	kWh/t	6,49E+02	kWh/t	6,49E+02	kWh/t	7

...continuação tabela 27

	Dado coletado		CP II-F		CP V-ARI		
3. PROCESSO INDUSTRIAL							
3.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>3.2.1. Emissões atmosféricas</u>							
Proveniente da produção do cimento Portland							
Dióxido de carbono (CO ₂)	3,71E-01	t/t	3,71E-01	t/t	3,71E-01	t/t	2
Proveniente do consumo de combustíveis							
Dióxido de carbono (CO ₂)	3,18E-01	t/t	3,18E-01	t/t	3,18E-01	t/t	7
Proveniente do consumo de eletricidade							
Dióxido de carbono (CO ₂)	1,36E-04	t/kWh	1,26E-02	t/t	1,26E-02	t/t	8
4. TRANSPORTE PARA DISTRIBUIÇÃO							
4.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>4.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>							
Óleo diesel	2,00E+00	km/l	1,11E+00	l/t	1,11E+00	l/t	3
4.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>4.2.1. Emissões atmosféricas</u>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	3,11E+03	g/t	3,11E+03	g/t	4
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	6,72E+01	g/t	6,72E+01	g/t	4
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	2,02E-01	g/t	2,02E-01	g/t	4
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	8,61E+01	g/t	8,61E+01	g/t	4
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	2,44E-03	g/t	2,44E-03	g/t	4
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	1,63E+01	g/t	1,63E+01	g/t	4

* De acordo com o tipo de cimento

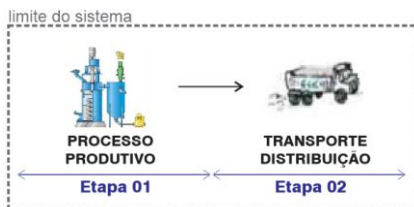
Fonte: 1-SILVA (2014), 2-MCT (2010A), 3-Calculado, 4-MCT (2006), 5-MME (2008), 6-ABCP (2014), 7-SILVA (2013), 8-MCT (2015).

Fonte: Autora

4.1.1.2 ICV da cal

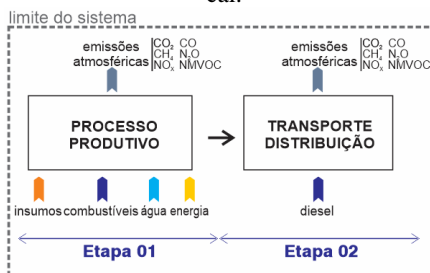
O inventário da cal hidratada foi elaborado baseado em dados secundários obtidos na literatura. Esses dados representam as médias do setor e são detalhados no capítulo 3.

A análise considera as etapas de (1) processo produtivo e; (2) transporte para distribuição, conforme fluxograma apresentado na Figura 12. Vale notar que a etapa de mineração é considerada dentro do processo produtivo na elaboração deste ICV.

Figura 12 – Limite do sistema da cal hidratada.

Fonte: Autora

A Figura 13 apresenta o fluxograma de entrada e de saída considerados dentro do limite do sistema na elaboração do Inventário do Ciclo de Vida da cal hidratada. O processo produtivo é descrito no capítulo 3.

Figura 13 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da cal.

Fonte: Autora

A Tabela 28 apresenta o Inventário do Ciclo de Vida da cal hidratada, considerando a produção de uma tonelada.

Tabela 28 –ICV da cal hidratada.

	Dado coletado		Cal virgem		Cal hidratada		
1. PROCESSO PRODUTIVO							
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>							
Mineração							
Rocha calcária	1,75E+00	t/t	1,75E+00	t/t	1,35E+00	t/t	1
Óleo diesel	5,60E-01	l/t	5,60E-01	l/t	4,31E-01	l/t	2
Calcinação							
Lenha	1,49E+02	kg/t	1,49E+02	kg/t	1,15E+02	kg/t	1
Coque de petróleo	4,90E+01	kg/t	4,90E+01	kg/t	3,77E+01	kg/t	1

...continuação tabela 28

	Dado coletado		Cal virgem		Cal hidratada		
1. PROCESSO PRODUTIVO							
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.2. Consumo de recursos</i>							
Água	2,13E+02	l/t	-	-	2,13E+02	l/t	3
<i>1.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>							
Eletricidade							
Processo produtivo	1,50E+01	kWh/t	1,50E+01	kWh/t	1,15E+01	kWh/t	1
Combustíveis	4,24E+02	kWh/t	4,24E+02	kWh/t	3,26E+02	kWh/t	4
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
Proveniente da produção da cal virgem							
Dióxido de carbono (CO ₂)	*	-	7,89E-01	t/t	5,47E-01	t/t	2
Proveniente do consumo de combustíveis da							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	1,57E+03	g/t	1,21E+03	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	3,39E+01	g/t	2,61E+01	g/t	5
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	1,02E-01	g/t	7,84E-02	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	4,35E+01	g/t	3,34E+01	g/t	5
Óxido nítrico (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	1,23E-03	g/t	9,48E-04	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	8,23E+00	g/t	6,33E+00	g/t	5
Proveniente do consumo de combustíveis							
Dióxido de carbono (CO ₂)	4,48E-01	t/t	4,48E-01	t/t	3,45E-01	t/t	6
Proveniente do consumo de eletricidade							
Dióxido de carbono (CO ₂)	1,36E-04	t/kWh	2,04E-03	t/t	1,57E-03	t/t	7
2. TRANSPORTE PARA DISTRIBUIÇÃO							
2.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>2.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>							
Óleo diesel	2,50E+00	km/l	5,22E+00	l/t	5,22E+00	l/t	3
2.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>2.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	1,46E+04	g/t	1,46E+04	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	3,16E+02	g/t	3,16E+02	g/t	5

...continuação tabela 28

	Dado coletado	Cal virgem		Cal hidratada			
1. PROCESSO PRODUTIVO							
1.1. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>2.2.1. Emissões atmosféricas</u>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	9,50E-01	g/t	9,50E-01	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	4,05E+02	g/t	4,05E+02	g/t	5
Óxido nítrico (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	1,15E-02	g/t	1,15E-02	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	7,67E+01	g/t	7,67E+01	g/t	5

* De acordo com o tipo de cal

Fonte: 1-MME (2014), 2-JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO (2014), 3-Calculado, 4-SILVA (2013), 5-MCT (2006), 6-CETESB (2009), 7-MCT (2005)

Fonte: Autora

4.1.1.3 ICV da areia

O sistema do produto considera as etapas do processo produtivo de acordo com o realizado pela mineradora Manoel Martins ME, localizada em Palhoça no estado de Santa Catarina. A empresa opera desde 2003, e possui vida útil estimada de 30 anos. A área titulada é de 17 hectares, sendo 8 hectares de área lavrada.

A análise considera as etapas do processo produtivo da areia, englobando: (1) extração do minério; (2) beneficiamento (peneiramento e classificação); (3) transporte para estoque e; (4) transporte para distribuição, conforme fluxograma apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Limite do sistema da areia.



Fonte: Autora

A produção atual da mineradora é de 14.000 toneladas por mês, distribuídas em três faixas granulométricas, conforme Tabela 28. A coluna de alocação refere-se ao peso em massa atribuído para repartição

dos fluxos de entrada e de saída entre os diferentes produtos produzidos pela empresa.

Tabela 29 - Produção mensal de areia.

material	quantidade (t/mês)	alocação (%)
areia fina	7.000	50
areia média	4.200	30
areia grossa	2.800	20
total	14.000	100

Fonte: Adaptado a partir de Manoel Martins ME

▪ **Etapa1: Extração**

A lavra da areia é realizada por desmonte hidráulico em cava seca. O método consiste na incidência de um jato de água de alta pressão sobre a base do talude da cava, realizada por uma draga de sucção hidráulica, provocando desmoronamento em forma de polpa. A draga é movida a óleo diesel, com consumo médio de 10 litros por dia. A água utilizada é proveniente da bacia de decantação bombeada em circuito fechado, ou seja, a água das bacias alimenta as operações de bombeamento do ciclo produtivo sendo posteriormente reaproveitada. A estimativa de consumo é de 65 litros por tonelada.

No ponto de convergência do material são instaladas canaletas auxiliares, para o direcionamento por gravidade da polpa até uma bacia de acumulação onde permanece até a etapa de beneficiamento.

▪ **Etapa 2: Beneficiamento**

A etapa de beneficiamento corresponde à separação do minério dos materiais indesejados. O processo envolve diferentes etapas, iniciando com o peneiramento grosseiro para separação dos cascalhos da areia. Em seguida é realizada a sedimentação em peneiras estáticas, fabricadas pela própria empresa, onde a areia com granulometria intermediária é separada da areia fina.

A areia fina é estocada em silos e as demais em pilhas a céu aberto. A estocagem é temporária, uma vez que a empresa conta com um centro de distribuição. A empresa não realiza lavagem da areia e a secagem é feita de forma natural. Nesta etapa não há consumo de recursos materiais, combustíveis ou energia. Há apenas a geração de resíduos decorrentes da parcela de perda da areia, estimada em 10% pela mineradora.

▪ Etapa 3: Transporte para estoque

Para o transporte da areia do ponto de extração até o centro de distribuição são utilizadas duas pás carregadeira Caterpillar (CAT), modelo 938K com consumo de óleo diesel de 12 l/h, que transferem o material para caminhões basculantes Mercedes-Benz, modelo 1934, com capacidade de carga de 23 toneladas. A distância percorrida do local de extração até o ponto de distribuição é de 35 km e o consumo de combustível médio é de 2,5 km por litro de óleo diesel.

Nesta etapa há geração de poeira devido à movimentação de veículos, porém, segundo informação da empresa não há uso de aspersão de água nas vias. Como não há controle do material particulado emitido, não foi possível estimar os impactos gerados.

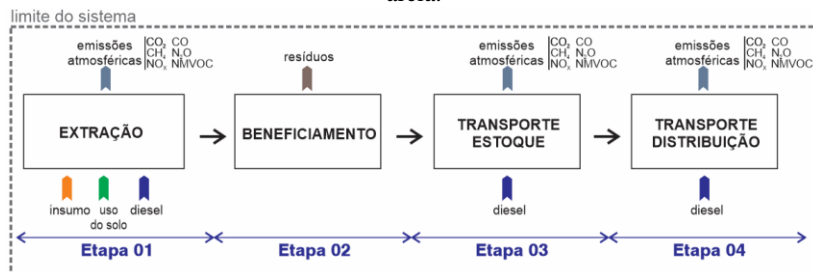
No ponto de distribuição, os agregados são armazenados em local coberto, em pilhas sem baias de separação, até serem comercializados.

▪ Etapa 4: Transporte para distribuição

A transferência dos produtos do estoque para os caminhões de distribuição é realizada por duas pás carregadeiras Caterpillar (CAT), modelo 938K com consumo de 12 l/h de óleo diesel. A frota de caminhões utilizados para distribuição é própria e dispõe de 15 unidades da montadora Ford, modelo Cargo 1719, com capacidade de carga de 23 t e consumo de 2,5 km por litro de óleo diesel. A distância assumida é de 15 km que representa a distância entre o ponto de distribuição da empresa e a UFSC.

A Figura 15 apresenta o fluxograma de entrada e de saída considerados dentro do limite do sistema na elaboração do Inventário do Ciclo de Vida da areia.

Figura 15 – Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da areia.



Fonte: Autora

A Tabela 30 apresenta o Inventário do Ciclo de Vida da areia, considerando a produção de uma tonelada.

Tabela 30 - ICV da areia.

	Dado coletado		Ajuste para 1 tonelada de areia		
1. EXTRAÇÃO DO MINÉRIO					
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.1. Consumo de recursos</i>					
Uso do solo					
Transformação, de área de flores	8,00E+04	m²	1,90E-01	m²/t	1
Transformação, para área de extração mineral	8,00E+04	m²	1,90E-01	m²/t	1
Areia	1,10E+00	t/t	1,10E+00	t/t	1
Água	6,50E+01	l/t	6,50E+01	l/t	1
<i>1.1.2. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Draga fixa com bomba de sucção					
Óleo diesel	1,00E+01	l/dia	1,57E-02	l/t	1
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>					
Proveniente do consumo de óleo diesel					
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	4,40E+01	g/t	2
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	9,50E-01	g/t	2
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	2,86E-03	g/t	2
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	1,22E+00	g/t	2
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	3,45E-05	g/t	2
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	2,31E-01	g/t	2
2. BENEFICIAMENTO					
2.1. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>2.2.1. Resíduos sólidos</i>					
Resíduos	1,00E+02	kg/t	1,00E+02	kg/t	1
3. TRANSPORTE PARA ESTOQUE					
3.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>3.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Pá carregadeira CAT, modelo 938K					
Óleo diesel	1,20E+01	l/h	3,02E-01	l/t	1

...continuação tabela 30

		Dado coletado		Ajuste para 1 tonelada de areia		
3. TRANSPORTE PARA ESTOQUE						
3.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte	
<u>3.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>						
Caminhão Mercedes-Benz, modelo 1934						
Óleo diesel	2,50E+00	km/l	6,09E-01	l/t	1	
3.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte	
<u>3.2.1. Emissões atmosféricas</u>						
Proveniente do consumo do óleo diesel						
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	2,55E+03	g/t	2	
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	5,51E+01	g/t	2	
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	1,66E-01	g/t	2	
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	7,07E+01	g/t	2	
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	2,00E-03	g/t	2	
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	1,34E+01	g/t	2	
4. TRANSPORTE PARA DISTRIBUIÇÃO						
4.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte	
<u>4.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>						
Pá carregadeira CAT, modelo 938K						
Óleo diesel	1,20E+01	l/h	3,02E-01	l/t	1	
Caminhão Ford, modelo Cargo 1719						
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	2,68E-01	l/t	1	
4.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte	
<u>4.2.1. Emissões atmosféricas</u>						
Proveniente do consumo do óleo diesel						
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	1,60E+03	g/t	2	
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	3,45E+01	g/t	2	
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	1,04E-01	g/t	2	
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	4,42E+01	g/t	2	
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	1,25E-03	g/t	2	
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	8,38E+00	g/t	2	

rimária: Manoel Martins ME, 2-MCT (2006)

Fonte: Autora

4.1.1.4 ICV da brita

O sistema do produto considera as etapas do processo produtivo de acordo com o realizado pela pedreira PLM Construções e Comércio LTDA, localizada em Tijucas no estado de Santa Catarina. A empresa opera desde 1996 e possui vida útil estimada de 50 anos. A área titulada é de 100 hectares, sendo 50 hectares de área explorável e 3.000m² de área edificada.

A produção atual é de 12.000 toneladas por mês, sendo distribuídas em três granulometrias, conforme Tabela 31. A coluna de alocação refere-se ao peso em massa atribuído para repartição dos fluxos de entrada e de saída entre os diferentes produtos produzidos pela empresa.

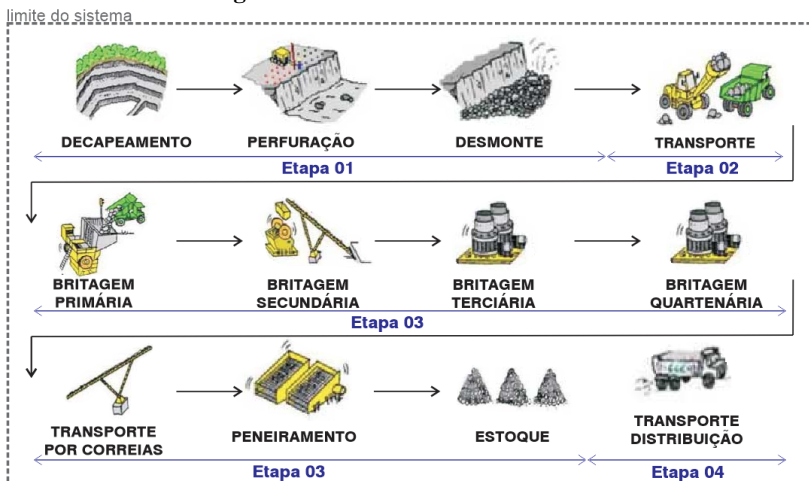
Tabela 31 - Produção mensal de brita.

material	quantidade (t/mês)	alocação (%)
brita 0	5.400	45
brita 1	1.800	15
brita 2	4.800	40
total	12.000	100

Fonte: Adaptado a partir de PLM Construções e Comércio LTDA

A análise considera as etapas do processo produtivo da brita, englobando: (1) extração do minério; (2) transporte para beneficiamento; (3) beneficiamento (britagem, peneiramento e classificação dos produtos finais) e; (4) transporte para distribuição, conforme fluxograma apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Limite do sistema da brita.



Fonte: Autora

▪ Etapa 1: Extração do minério

A primeira etapa para a viabilização da extração da rocha é a retirada da cobertura estéril que recobre o maciço rochoso, denominado decapeamento. Essa operação é realizada através de uma escavadeira, modelo DX 300LCA e um trator esteira Caterpillar, modelo D6R. O consumo de combustível dos equipamentos é de 15 l/h para o trator esteira e de 24 l/h para a escavadeira.

Com base nos dados de controle de produção da pedra, para cada metro quadrado explorado, em média 0,5 m de profundidade são de material orgânico e 4 m de argila. O material removido é transferido para caminhões basculantes que os transportam até as áreas de armazenagem para uso na recuperação de bancadas, ou então para áreas de aterro de material estéril.

A frota de caminhões é composta por cinco unidades, que realizam, em média, dez viagens por dia e percorrem uma distância de 5 km até o ponto de descarga de material estéril. Para facilitar a elaboração do estudo optou-se em padronizar o modelo dos caminhões como sendo Mercedes-Benz, modelo 1620, com consumo de aproximadamente 3,5km/l de óleo diesel.

A lavra do granito é realizada a céu aberto por desmonte com o emprego de explosivos. Conforme dados coletados na mineradora, para cada m³ de brita extraída são utilizados cerca de 450g de explosivo. Os

explosivos utilizados são por emulsão encartuchada, Britanite, tipo Ibegel 2 1/4" x 24. A detonação por explosivo é realizada por empresa terceirizada sob a supervisão de um responsável técnico.

Para a colocação dos explosivos nas rochas há utilização de uma carreta de perfuração pneumática Atlas Copco, modelo ROC-442, alimentada por um compressor de ar portátil, Atlas Copco, modelo XA 420/900 PCM. O consumo de óleo diesel é de aproximadamente 28 l/h.

Após desmontado é realizada a fragmentação das rochas com maior dimensão para obtenção de dimensões menores. A quebra é realizada através de um rompedor hidráulico acoplado à escavadeira.

▪ **Etapa 2: Transporte para beneficiamento**

Os blocos fragmentados de rocha são carregados pela escavadeira e transportados até o beneficiamento através de três caminhões basculantes Mercedes-Benz, modelo 1620, com consumo de 3,5 km/l de óleo diesel. São realizadas em média 20 viagens por dia a uma distância de 0,8 km. Nesta etapa há geração de poeira devido à movimentação de veículos, porém, segundo informação da empresa não há uso de aspersão de água nas vias. Como não há controle do material particulado emitido, não foi possível quantificar as emissões.

▪ **Etapa 3: Beneficiamento**

A etapa de beneficiamento corresponde à fragmentação da rocha para a obtenção das granulometrias comerciais desejadas. O processo envolve diferentes etapas, iniciando com a britagem primária dos blocos rochosos que estão depositados no alimentador, sendo então direcionados a um britador de mandíbula para esmagamento.

Após a britagem primária o material é direcionado por transportadores de correia para as britagens secundária e terciária sucessivamente para obtenção de granulometrias menores. Entre as diferentes etapas de britagem, são realizados peneiramentos e classificações dos materiais para a separação dos produtos de acordo com a faixa granulométrica comercializada. Nesta etapa, é realizada pulverização de água sobre o material para o controle da poeira, sendo consumidos 5 mil litros de água por dia.

Não foi necessário quantificar o consumo energético individual dos equipamentos, uma vez que a empresa forneceu os dados de consumo médio mensal, ano 2014, que totaliza 70.000 kWh por mês. As especificações dos equipamentos utilizados são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Equipamentos utilizados para a etapa de beneficiamento.

equipamento	fabricante	tipo	modelo	potência
alimentador	-	-	4x1m	20CV
britador primário	Metso	Mandíbula	C80	125CV
britador secundário	Sandvik	Cônico	CH430	200CV
britador terciário	Faço	Cônico	90 RS	150CV
peneira vibratória	Metso	03 Decks	Nordberg	30CV

Fonte: Adaptado a partir de PLM Construções e Comércio LTDA

Após a etapa de beneficiamento os produtos são armazenados em pilhas a céu aberto, exceto a brita 0 que é depositada em área coberta. Não há baias de separação e nem controle de material particulado.

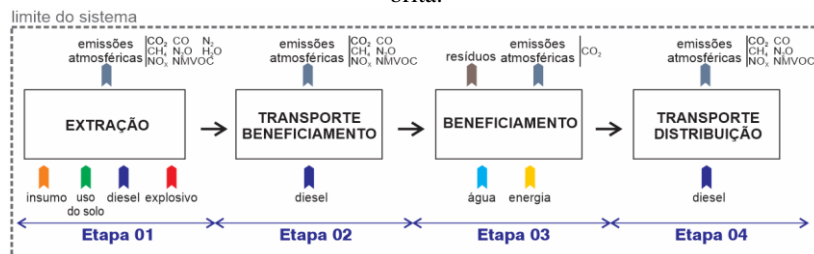
▪ Etapa 4: Transporte para distribuição

A transferência dos produtos do estoque para os caminhões de distribuição é realizada por duas pás carregadeiras Volvo, modelo L90F, com consumo de 15 l/h de óleo diesel.

A frota de caminhões é terceirizada e dispõe de quatro unidades, como há diferença entre os modelos utilizados, a fim de simplificar o estudo, foi considerado como modelo padrão o da montadora Mercedes-Benz, modelo Atron 2729K, 6x4, com capacidade de 16 t e consumo de aproximadamente 3,5 km/l de óleo diesel. A distância média até os centros consumidores é de 40 km. Neste estudo foi adotada a distância entre a empresa e a empresa de pré-moldados, que totaliza 50 km.

A partir dos dados apresentados é proposto o fluxograma de entrada e de saída considerados dentro do limite do sistema de análise do Inventário do Ciclo de Vida da brita, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da brita.



Fonte: Autora

A Tabela 33 apresenta o Inventário do Ciclo de Vida da brita, considerando a produção de uma tonelada.

Tabela 33 - ICV da brita.

	Dado coletado		Ajuste para 1 tonelada de brita		
1. EXTRAÇÃO DO MINÉRIO					
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.1. Consumo de recursos</i>					
Uso do solo					
Transformação, de área de flores	5,00E+05	m ²	8,33E-01	m ² /t	1
Transformação, para área de extração mineral	5,00E+05	m ²	8,33E-01	m ² /t	1
Ocupação, área de extração mineral	3,00E+03	m ²	5,00E-03	m ² /t	1
Rocha granítica	1,05E+00	t/t	1,05E+00	t/t	1
<i>1.1.2. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Explosivos	4,50E-01	kg/m ³	3,06E-01	kg/t	1
Nitrato de amônio (N ₂ H ₄ O ₃)	4,25E-01	kg/m ³	2,89E-01	kg/t	2
Metileno (CH ₂)	2,48E-02	kg/m ³	1,68E-02	kg/t	2
Escavadeira Doosan, modelo DX 300LCA					
Óleo diesel	2,40E+01	l/h	3,52E-01	l/t	1
Trator esteira Cterpillar, modelo D6R					
Óleo diesel	1,50E+01	l/h	2,20E-01	l/t	1
Caminhão Mercedes-Benz, modelo 1620					
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	1,05E-01	l/t	1
Carreta de perfuração Atlas Copco, modelo ROC-442					
Óleo diesel	3,00E+01	l/h	4,40E-01	l/t	1
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>					
Proveniente do uso de explosivo					
Dióxido de carbono (CO ₂)	7,79E-02	kg/m ³	5,30E-02	kg/t	2
Gás nitrogênio (N ₂)	2,23E-01	kg/m ³	1,01E-01	kg/t	2
Vapor de água (H ₂ O)	2,23E-01	kg/m ³	1,52E-01	kg/t	2
Proveniente do consumo de óleo diesel					
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	3,13E+03	g/t	3
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	6,76E+01	g/t	3

...continuação tabela 33

	Dado coletado		Ajuste para 1 tonelada		
1. EXTRAÇÃO DO MINÉRIO					
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>1.2.1. Emissões atmosféricas</u>					
Proveniente do consumo de óleo diesel					
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	2,03E-01	g/t	3
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	8,67E+01	g/t	3
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	2,46E-03	g/t	3
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	1,64E+01	g/t	3
2. TRANSPORTE PARA BENEFICIAMENTO					
2.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>2.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>					
Caminhão Mercedes-Benz, modelo 1620					
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	2,51E-02	l/t	1
2.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>2.2.1. Emissões atmosféricas</u>					
Proveniente do consumo do óleo diesel					
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	7,03E+01	g/t	3
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	1,52E+00	g/t	3
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	4,57E-03	g/t	3
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	1,95E+00	g/t	3
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	5,52E-05	g/t	3
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	3,69E-01	g/t	3
3. BENEFICIAMENTO					
3.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>3.1.1. Consumo de recursos</u>					
Água	5,00E+03	l/dia	9,17E+00	l/t	1
<u>3.1.2. Consumo de recursos energéticos</u>					
Eleticidade	7,00E+04	kWh/mês	5,83E+00	kWh/t	1
3.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>3.2.1. Emissões atmosféricas</u>					
Proveniente do consumo de eletricidade					
Dióxido de carbono (CO ₂)	1,36E-04	t/kWh	7,90E-04	t/t	4
<u>3.2.2. Resíduos sólidos</u>					
Resíduos	5,00E+01	kg/t	5,00E+01	kg/t	1

...continuação tabela 33

Dado coletado		Ajuste para 1 tonelada de brita			
4. TRANSPORTE PARA DISTRIBUIÇÃO					
4.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>4.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Pá carregadeira Volvo, modelo L90F					
Óleo diesel	1,50E+00	l/h	6,60E-01	l/t	1
Caminhão Mercedes-Benz, modelo Atron 2729K					
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	8,93E-01	l/t	1
4.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>4.2.1. Emissões atmosféricas</i>					
Proveniente do consumo do óleo diesel					
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	4,35E+03	g/t	2
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	9,40E+01	g/t	2
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	2,83E-01	g/t	2
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	1,21E+02	g/t	2
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	3,42E-03	g/t	2
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	2,28E+01	g/t	2

Fonte: 1-PLM CONSTRUÇÕES LTDA., 2-SILVA (2014), FERREIRA *et al.* (2015), 3-MCT (2006), 4-MCT (2015).

Fonte: Autora

4.1.1.5 ICV da CzP

O sistema do produto considera as etapas do processo de geração e disposição da cinza pesada de acordo com o realizado no complexo termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município Capivari de Baixo no sul do estado de Santa Catarina.

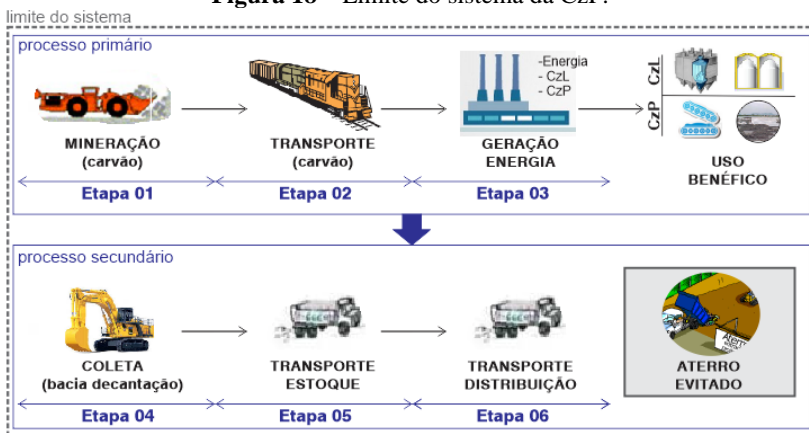
A termelétrica possui área de 3km² e vida útil estimada em 100 anos, sendo composto por três usinas A, B e C, com capacidade total instalada de 857 MW. A CzP utilizada na confecção do protótipo foi coletada na bacia de sedimentação da unidade termelétrica C responsável pela geração de 363 MW.

Para elaboração do ICV da CzP, a fim de definir um procedimento de atribuição adequado, dois tipos de processos foram traçados dentro do limite do sistema do produto, definidos como (Figura 18):

- a) processo primário: o que produz o produto principal e os subprodutos da combustão do carvão, ou seja os processos que envolvem a geração de energia através da combustão do carvão, englobando as etapas de mineração do carvão; transporte do carvão e, combustão do carvão;
- b) processo secundário: definido como os processos que viabilizam a utilização da CzP, englobando as etapas de coleta da CzP na bacia de sedimentação, e transporte para estoque.

Dentro do processo secundário foi considerado a carga referente ao aterro evitado devido a utilização da CzP como um insumo da construção civil.

Figura 18 – Limite do sistema da CzP.



Fonte: Autora

A unidade funcional definida para o processo primário é de 1 kWh. No sistema secundário, os fluxos de entrada e de saída do processo primário foram atribuídos ao equivalente para a produção de uma tonelada de CzP. O processo de alocação foi definido por valor econômico, conforme procedimento de cálculo descrito no capítulo 3.

O processo produtivo e os dados considerados para a elaboração do inventário da CzP são descritos a seguir.

a) Processo primário

▪ Etapa 1: Mineração do carvão

A geração de energia elétrica, na UTLC, é realizada através da tecnologia de carvão pulverizado. Nessa tecnologia o carvão moído é

injetado, juntamente com ar, numa câmara de combustão onde é queimado, alcançando-se temperaturas da ordem de 1.400°C (MME, 2007).

Segundo informações coletadas no CTJL o carvão que abastece a termelétrica é fornecido por dez mineradoras, que fazem parte da bacia carbonífera de Santa Catarina, localizadas na região de Criciúma. Estas empresas são obrigadas por contrato a fornecer um carvão com teor máximo de 2% de enxofre e 43% de cinzas.

Na modelagem da mineração do carvão foram adotados dados apresentados no estudo de Restrepo *et al.* (2015), que coletaram dados da empresa Carbonífera Criciúma S.A., ano base 2010. Neste estudo de caso, a mineração do carvão é realizada em galerias subterrâneas com lavra através do método de câmaras e pilares. Este método consiste na extração do carvão a partir de câmaras retangulares, onde os pilares são formados pelo próprio mineral que sustentam a cobertura da mina e controlam o fluxo de ar (MME, 2007).

O minério no interior da mina é carregado através de esteiras para a superfície, a uma distância entre 7 a 8 km. Destaca-se a necessidade de ventilação das galerias para minimizar a concentração de gases perigosos. Nesta primeira fase, as máquinas são movidas por eletricidade, com consumo de óleo diesel. Há também a utilização de explosivos para o desmonte da rocha e o bombeamento da água subterrânea da mina.

Após o minério ser transportado para a superfície é realizado o beneficiamento que engloba dois procedimentos: britagem para homogeneizar o tamanho do carvão; e lavagem através da jingagem para remover o enxofre e parte do material inerte. O estéril, resultante do beneficiamento, corresponde em torno de 60% sobre o carvão bruto, também denominado *run-of-mine* (ROM).

No processo de beneficiamento os equipamentos são movidos a eletricidade. A lavagem do minério é feita com água proveniente da água bombeada da mina e de água pluvial coletada. Para tratamento e neutralização é utilizado cal hidratada.

Na modelagem do ICV o autor adotou dados da literatura para determinar as emissões atmosféricas e para a água resultantes da mineração do carvão, obtidos em Silva *et al.* (2010), e Schneider (2006), respectivamente.

▪ Etapa 2: Transporte do carvão

O transporte do carvão até a usina termelétrica é realizado através da ferrovia Tereza Cristina S.A., sendo que as locomotivas possuem 18 vagões com capacidade de 59 toneladas cada um. A distância aproximada

entre a usina e a região das jazidas catarinenses é de 80 km. Conforme informações da empresa para cada tonelada de carvão transportado são consumidos aproximadamente 0,50 litros de óleo diesel.

▪ Etapa 3: Geração de energia

Para operação do CTJL o carvão, fornecido por diferentes mineradoras, é descarregado e conduzido através de correias transportadoras até o pátio de armazenagem, onde é homogeneizado. Esse processo, tem como objetivo alcançar um mesmo poder calorífico entre os produtos. Em seguida, o carvão é conduzido por correias transportadoras para cada uma das usinas, onde é moído em partículas finas (entre 75 e 300 microns) e armazenado em silos até a combustão.

Durante a combustão, são geradas as cinzas leves e pesadas. As cinzas leves são captadas por um precipitador eletrostático, com 98% de eficiência mínima de projeto, sendo transportadas pneumáticamente até os silos de armazenagem. Enquanto, as cinzas pesadas são transportadas hidraulicamente até a bacia de sedimentação. O sistema da UTLC opera em circuito fechado, ou seja, a água retorna ao processo industrial após ser tratada com cal hidratada (POZZOBON, 1998).

Segundo informações coletadas na empresa Tractebel Energia, atualmente, a cinza leve é totalmente destinada ao setor cimenteiro e a cinza pesada é, contratualmente, responsabilidade da empresa Votorantim Cimentos que opera o sistema. Quando existe demanda ela é adicionada ao cimento e, não existindo são avaliadas alternativas. A destinação para aterro é sempre evitada, sendo priorizando o uso benéfico na recuperação de áreas degradadas.

As Tabelas 34 e 35 apresentam os dados operacionais do CTJL e da UTLC respectivamente, ano base 2013. O consumo de água foi de 5.632.452 m³/ano. Para melhor compreensão, no Apêndice D é descrito o sistema de abastecimento de água.

Tabela 34 - Dados operacionais da CTJL, ano base 2013.

geração de energia (MWh)	CzL (t)	CzP (t)	<u>combustível</u>		consumo de energia (MWh)
			carvão energético (t)	óleo diesel (l)	
5.719.271	1.201.771	226.965	3.552.042	3.634.000	508.497

Fonte: Adaptado a partir de Tractebel Energia S.A.

Tabela 35 - Dados operacionais da UTLC, ano base 2013.

geração de energia (MWh)	CzL (t)	CzP (t)	combustível		consumo de energia (MWh)
			carvão energético (t)	óleo diesel (l)	
2.631.032	483.167	85.265	1.413.234	574.500	237.656

Fonte: Adaptado a partir de Tractebel Energia S.A

b) Processo secundário

A cimenteira que opera o sistema de retirada dos CzP da CTJL optou por não divulgar os dados. Desta forma, o inventário foi realizado através de visita em campo à termelétrica e com dados obtidos em formulários de fabricantes dos veículos utilizados.

▪ Etapa 4: Coleta da CzP

O CTJL conta com duas bacias de sedimentação para armazenagem das cinzas pesadas. A área média de superfície é de 157.000 m² e a profundidade média útil igual a cinco metros. Elas operam em revezamento, ou seja, utiliza-se uma como depósito enquanto a outra é esvaziada.

Para remoção das cinzas pesadas são utilizadas três escavadeiras de diferentes fabricantes, que transferem o material para caminhões. Os caminhões transportam o material até a cimenteira para armazenagem. Neste estudo de caso considerou-se como modelo padrão a escavadeira Caterpillar (CAT), modelo 320D2 GC com consumo de 15 l/h de óleo diesel.

▪ Etapa 05: Transporte para estoque

O transporte até a cimenteira é realizado por três caminhões basculantes, que percorrem uma distância aproximada de 5 km. Assumiu-se como modelo padrão, caminhões Ford, modelo Cargo 2628, com capacidade de 16 toneladas de CzP's e consumo de combustível médio de 3,5 km por litro de óleo diesel.

▪ Etapa 06: Transporte para distribuição

Neste estudo de caso, como a CzP será utilizada em substituição à areia, foi assumido que a secagem será realizada ao ar livre. O carregamento e transporte para distribuição das CzP's, são assumidos como equivalentes ao realizado na mineradora da areia.

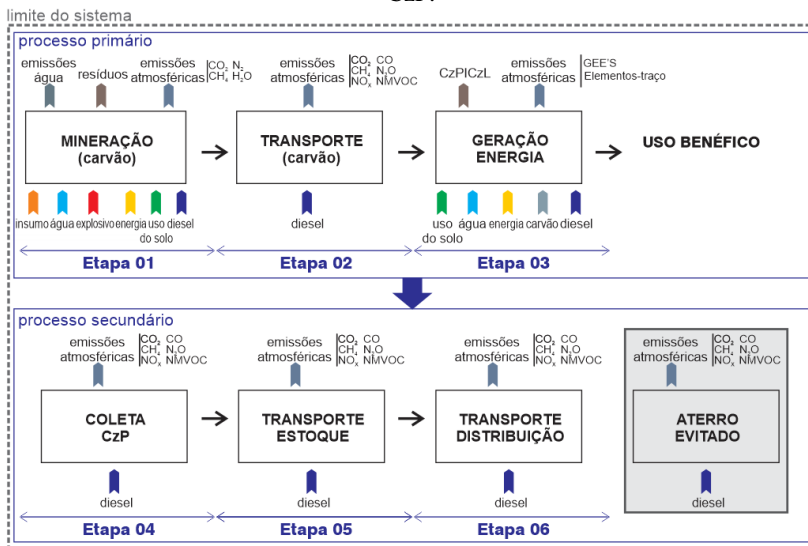
Desta forma, considerou-se que o carregamento é realizado por duas carregadeiras com consumo de 12 l/h de óleo diesel. Para o transporte a capacidade de carga dos caminhões é de 23 t com consumo de 2,5 km por litro de óleo diesel. A distância é assumida como a corresponde ao trajeto da cimenteira à Florianópolis, totalizando 110 km.

▪ Aterro evitado

Para construção deste ICV foi assumido que as CzP's são totalmente aproveitadas, sendo a carga referente ao aterro evitado considerada como crédito ambiental. Os valores foram obtidos em GAI *Consultants apud* NREL (1999) e são detalhados no capítulo 3.

A Figura 19 apresenta o fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema de análise na elaboração do Inventário do Ciclo de Vida da CzP. Vale destacar que a área referente as bacias de sedimentação são consideradas dentro da área total do CTJL, portanto está contemplada dentro do processo primário.

Figura 19 – Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema da CzP.



Fonte: Autora

A Tabela 36 apresenta o Inventário do Ciclo de Vida da CzP, considerando a geração de uma tonelada de CzP.

Tabela 36 - ICV da CzP.

Dado coletado	Ajuste para geração de 1 kWh		Ajuste para 1 tonelada de CzP				
PROCESSO PRIMÁRIO							
1. MINERAÇÃO DO CARVÃO							
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.1. Consumo de recursos</i>							
Carvão ROM	2,39E+00	kg/kg	1,28E+00	kg/kWh	1,17E-03	kg/t	1
<i>Água</i>							
Água drenada da mina	4,34E-03	m³/kg	2,33E-03	m³/kWh	2,12E-06	m³/t	1
Água pluvial	2,65E-03	m³/kg	1,42E-03	m³/kWh	1,29E-06	m³/t	1
<i>1.1.2. Consumo de materiais e combustíveis</i>							
Cal hidratada	3,50E-03	kg/kg	1,88E-03	kg/kWh	1,71E-06	kg/t	1
Explosivos	1,48E-03	kg/kg	7,95E-04	kg/kWh	7,23E-07	kg/t	1
Óleo diesel	1,53E-03	l/kg	8,22E-04	l/kWh	7,48E-07	l/t	1
<i>1.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>							
Electricidade	4,61E-02	kWh/kg	2,48E-02	kWh/kWh	2,25E-05	kWh/t	1
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
<i>Provenientes de mineração</i>							
Metano (CH ₄)	2,44E-03	kg/kg	1,31E-03	kg/kWh	1,19E-06	kg/t	1,2
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,24E-04	kg/kg	1,20E-04	kg/kWh	1,09E-07	kg/t	1,2
<i>1.2.2. Emissões para água</i>							
<i>Provenientes de mineração</i>							
Sólidos totais	1,86E-02	kg/kg	9,99E-03	kg/kWh	9,09E-06	kg/t	1,3
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	9,52E-03	kg/kg	5,11E-03	kg/kWh	4,65E-06	kg/t	1,3
Alumínio (Al)	5,38E-06	kg/kg	2,89E-06	kg/kWh	2,63E-09	kg/t	1,3
Cobre (Cu)	3,50E-08	kg/kg	1,88E-08	kg/kWh	1,71E-11	kg/t	1,3
Ferro (Fe)	5,43E-06	kg/kg	2,92E-06	kg/kWh	2,65E-09	kg/t	1,3
Manganês (Mn)	2,73E-05	kg/kg	1,47E-05	kg/kWh	1,33E-08	kg/t	1,3
Zinco (Zn)	9,79E-07	kg/kg	5,26E-07	kg/kWh	4,78E-10	kg/t	1,3
<i>1.2.3. Resíduos sólidos</i>							
Resíduos	1,39E+00	kg/kg	7,46E-01	kg/kWh	6,79E-04	kg/t	1
2. TRANSPORTADO CARVÃO							
2.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>2.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>							
Óleo diesel	5,00E-04	l/kg	2,69E-04	l/kWh	2,44E-07	l/t	4

...continuação tabela 36

Dado coletado	Ajuste para geração de 1 kWh		Ajuste para 1 tonelada de CzP				
PROCESSO PRIMÁRIO							
2. TRANSPORTE DO CARVÃO							
2.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>2.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	7,52E-01	g/kWh	6,84E-04	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	1,62E-02	g/kWh	1,48E-05	g/t	5
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	4,89E-05	g/kWh	4,45E-08	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	2,08E-02	g/kWh	1,90E-05	g/t	5
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	5,91E-07	g/kWh	5,38E-10	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	3,95E-03	g/kWh	3,59E-06	g/t	5
3. GERAÇÃO DE ENERGIA							
3.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>3.1.2. Consumo de recursos</i>							
Transformação, de área de floresta	3,00E+00	km ²	5,23E-06	m ² /kWh	3,00E+00	m ² /t	6
Transformação, para área industrial	3,00E+00	km ²	5,23E-06	m ² /kWh	3,00E+00	m ² /t	6
<i>3.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>							
Carvão CE 4500	5,37E-01	kg/kWh	5,37E-01	kg/kWh	4,89E-04	kg/t	6
Água	9,85E-04	m ³ /kWh	9,85E-04	m ³ /kWh	8,96E-07	m ³ /t	6
Óleo diesel	2,18E-04	l/kWh	2,18E-04	l/kWh	1,98E-07	l/t	6
<i>3.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>							
Eleticidade	9,00E-05	kWh/kWh	9,00E-05	kWh/kWh	8,19E-08	kWh/t	6
3.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>3.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	6,10E-01	g/kWh	5,55E-04	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	1,32E-02	g/kWh	1,20E-05	g/t	5
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	3,97E-05	g/kWh	3,61E-08	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	1,69E-02	g/kWh	1,54E-05	g/t	5
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	4,80E-07	g/kWh	4,36E-10	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	3,20E-03	g/kWh	2,92E-06	g/t	5

...continuação tabela 36

	Dado coletado		Ajuste para geração de 1 kWh		Ajuste para 1 tonelada de CzP		fonte
	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	
PROCESSO PRIMÁRIO							
3. GERAÇÃO DE ENERGIA							
3.2. Fluxos de saída							
Proveniente da geração de energia							
Dióxido de carbono (CO ₂)	1,07E+03	g/kWh	1,07E+03	g/kWh	9,75E-01	g/t	7
Monóxido de carbono (CO)	1,60E-01	g/kWh	1,60E-01	g/kWh	1,46E-04	g/t	7
Metano (CH ₄)	1,00E-02	g/kWh	1,00E-02	g/kWh	9,10E-06	g/t	7
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,00E-02	g/kWh	2,00E-02	g/kWh	1,82E-05	g/t	7
Óxidos de nitrogênio (NOx)	2,53E+00	g/kWh	2,53E+00	g/kWh	2,30E-03	g/t	6
Dióxido de enxofre (SO ₂)	1,63E+01	g/kWh	1,63E+01	g/kWh	1,49E-02	g/t	6
Material particulado (MP)	3,30E-01	g/kWh	3,30E-01	g/kWh	3,00E-04	g/t	6
Antimônio (Sb)	3,98E-12	g/kWh	3,98E-12	g/kWh	3,62E-15	g/t	8
Arsênio (As)	9,06E-11	g/kWh	9,06E-11	g/kWh	8,24E-14	g/t	8
Berílio (Be)	4,64E-12	g/kWh	4,64E-12	g/kWh	4,22E-15	g/t	8
Cádmio (Cd)	1,13E-11	g/kWh	1,13E-11	g/kWh	1,03E-14	g/t	8
Cromo (Cr)	5,74E-11	g/kWh	5,74E-11	g/kWh	5,22E-14	g/t	8
Cobalto (Co)	2,21E-11	g/kWh	2,21E-11	g/kWh	2,01E-14	g/t	8
Chumbo (Pb)	9,28E-11	g/kWh	9,28E-11	g/kWh	8,44E-14	g/t	8
Manganês (Mn)	1,08E-10	g/kWh	1,08E-10	g/kWh	9,83E-14	g/t	8
Magnésio (Mg)	2,43E-09	g/kWh	2,43E-09	g/kWh	2,21E-12	g/t	8
Mercúrio (Hg)	1,83E-11	g/kWh	1,83E-11	g/kWh	1,67E-14	g/t	8
Níquel (Ni)	6,19E-11	g/kWh	6,19E-11	g/kWh	5,63E-14	g/t	8
Selênio (Se)	2,87E-10	g/kWh	2,87E-10	g/kWh	2,61E-13	g/t	8
<i>3.2.2. Emissões para o solo</i>							
Rejeitos (Cinzas)	2,16E-01	kg/kWh	2,16E-01	kg/kWh	1,97E-04	kg/t	6
CzL	1,84E-01	kg/kWh	1,84E-01	kg/kWh	1,67E-04	kg/t	6
CzP	3,24E-02	kg/kWh	3,24E-02	kg/kWh	2,95E-05	kg/t	6
PROCESSO SECUNDÁRIO							
4. COLETA DA CzP							
4.1. Fluxos de entrada							
<i>4.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>							
Escavadeira CAT, modelo 320D2 GC							
Óleo diesel	1,50E+01	l/h	-	-	4,19E-01	l/t	7
4.2. Fluxos de saída							
<i>4.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	-	-	1,17E+03	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	-	-	2,53E+01	g/t	5

...continuação tabela 36

Dado coletado	Ajuste para geração de 1 kWh		Ajuste para 1 tonelada de CzP				
PROCESSO SECUNDÁRIO							
4. COLETA DA CzP							
4.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>4.2.1. Emissões atmosféricas</u>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	-	-	7,63E-02	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	-	-	3,25E+01	g/t	5
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	-	-	9,22E-04	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	-	-	6,16E+00	g/t	5
5. TRANSPORTE PARA ESTOQUE							
5.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>5.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>							
Caminhão Ford, modelo 2628							
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	-	-	8,93E-02	l/t	7
5.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>5.2.1. Emissões atmosféricas</u>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	-	-	2,50E+02	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	-	-	5,40E+00	g/t	5
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	-	-	1,63E-02	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NOx)	7,76E+01	g/l	-	-	6,93E+00	g/t	5
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	-	-	1,96E-04	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	-	-	1,31E+00	g/t	5
6. TRANSPORTE PARA DISTRIBUIÇÃO							
6.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>6.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>							
Pá carregadeira Caterpillar (CAT), modelo 938K							
Óleo diesel	1,20E+01	L/H	-	-	1,51E-01	l/t	7
Caminhão Mercedes-Benz, modelo 2640							
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	-	-	1,37E+00	l/t	7

...continuação tabela 36

	Dado coletado		Ajuste para geração de 1 kWh		Ajuste para 1 tonelada de CzP		fonte
	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	
PROCESSO SECUNDÁRIO							
6. TRANSPORTE PARA DISTRIBUIÇÃO							
6.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>6.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	-	-	4,26E+03	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	-	-	9,20E+01	g/t	5
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	-	-	2,77E-01	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	-	-	1,18E+02	g/t	5
Óxido nítrico (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	-	-	3,35E-03	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	-	-	2,24E+01	g/t	5
7. ATERRO EVITADO							
7.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>7.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>							
Equipamentos utilizados para aterro							
Óleo diesel	1,21E+00	l/t	-	-	1,21E+00	l/t	9
7.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>7.2.1. Emissões atmosféricas</i>							
Proveniente do consumo do óleo diesel							
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	-	-	3,39E+03	g/t	5
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	-	-	7,32E+01	g/t	5
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	-	-	2,20E-01	g/t	5
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	-	-	9,39E+01	g/t	5
Óxido nítrico (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	-	-	2,66E-03	g/t	5
Compostos orgânicos voláteis não metanos	1,47E+01	g/l	-	-	1,78E+01	g/t	5

Fonte: 1-RESTREPO *et al.* (2015), 2-SILVA *et al. apud* RESTREPO *et al.* (2015), 3-SCHNEIDER *apud* RESTREPO *et al.* (2015), 4-Primária: TEREZA CRISTINA S.A., 5- MCT (2006), 6-Primária: TRACTEBEL ENERGIA S.A., 7-Calculado, 8-NREL (2012), 9-GAI Consultants *apud* NREL (1999).

Fonte: Autora

4.1.2 ICV's dos subsistemas

A seguir serão apresentados os ICV's individuais dos subsistemas: bloco de concreto, argamassa de revestimento e argamassa de assentamento, que compõem o sistema de vedação vertical de cada cenário analisado. A Tabela 37 apresenta os totais de insumos

consumidos em cada subsistema, as quantidades são relacionadas a produção de uma tonelada (t) de bloco de concreto e de um metro cúbico (m³) de argamassa de assentamento e de revestimento.

Tabela 37 - Total de insumo consumido por subsistema de cada cenário.

material	insumo	cenário A (kg)	cenário B (kg)
<u>bloco de concreto</u> 1t	CP V-ARI	82,16	82,16
	areia fina	140,85	-
	CzP	-	99,45
	areia média	164,32	164,32
	pó de pedra	375,59	375,59
	brita 0	234,74	234,74
<u>argamassa de assentamento</u> 1m ³	CP II-F	381,30	381,30
	cal CH-III	301,55	301,55
	areia média	1958,53	1958,53
<u>argamassa de revestimento</u> 1m ³	CP II-F	321,59	321,59
	cal CH-III	714,65	714,65
	areia fina	1.577,76	-
	CzP	-	1.113,54

Fonte: Autora

4.1.2.1 ICV do bloco de concreto

O sistema do produto considera o processo produtivo dos blocos de concreto, de acordo com as etapas de produção realizado pela empresa Toniolo Pré-Moldados Ltda, localizada em Palhoça no estado de Santa Catarina. A empresa opera desde 1987 e possui selo de certificação de qualidade concedido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

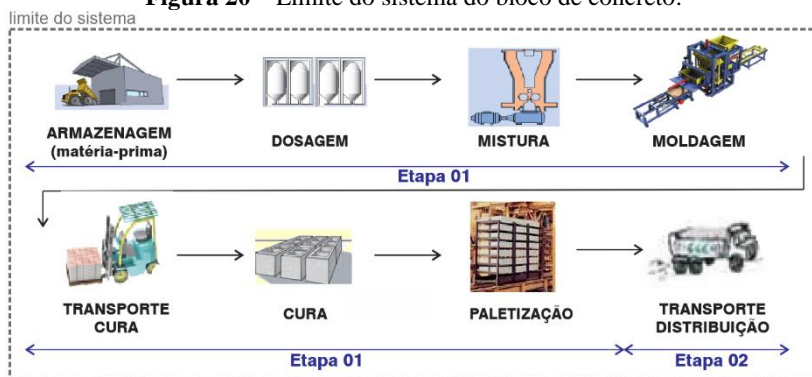
O cálculo dos insumos para confecção dos blocos convencional foi baseado nos valores dos relatórios industriais fornecidos pela empresa para produção dos blocos Classe A e resistência à compressão de 6 MPa. O traço base considerada para produção de uma tonelada de bloco segue

a proporção de: 80 kg de cimento, 160 kg de areia média, 140 kg de areia fina, 380 kg de pó de pedra e 240 kg de brita 0. O consumo de água na composição do concreto é de 60 litros por tonelada. O cimento Portland utilizado é CPV-ARI, de alta resistência inicial.

Para produção dos blocos com adição de CzP, foi considerado teor de substituição de 100%, em massa, da areia fina por CzP. Neste caso o consumo de água na composição do concreto é de aproximadamente 95 litros por tonelada.

A análise considera as etapas do processo produtivo do bloco de concreto, englobando: (1) processo industrial (armazenagem, dosagem, mistura, moldagem, transporte para cura, cura e paletização) e; (2) transporte para distribuição, conforme fluxograma apresentado na Figura 20. As matérias-primas são consideradas como cargas recebidas na elaboração deste ICV.

Figura 20 – Limite do sistema do bloco de concreto.



Fonte: Autora

▪ Etapa 1: Processo industrial

Os agregados que chegam à fábrica são estocados em baias individuais, sendo transportados por pá carregadeira até a cuba de recepção de agregados. Onde seguem, por esteiras rolantes para armazenagem em silos individuais até a etapa de dosagem e pesagem. O cimento é estocado diretamente em um silo separado.

A dosagem é realizada conforme o traço estabelecido para cada produto. Após serem pesados, os insumos são direcionados por esteiras rolantes até o misturador, que realiza a homogeneização da mistura e à lança nas máquinas de vibroprensa para a moldagem. Sendo em seguida carregados por duas empilhadeiras elétricas, até as câmaras de cura para

secagem natural. A empresa informou que não há geração de resíduos no processo produtivo, uma vez que a parcela de blocos com defeitos, ou que quebram durante o manuseio retornam ao processo produtivo.

Após a cura os produtos são embalados com plástico de proteção e estocados em paletes de madeira no pátio da fábrica. As especificações dos equipamentos utilizados são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Equipamentos utilizados no processo produtivo do bloco de concreto.

equipamento	fabricante	modelo	código	potência
esteiras rolantes	Toniolo	Toniolo	-	5 CV
misturador	Trillor	Horizontal	MR-800	30 CV
vibroprensa 1 e 2	Trillor	automático	MBX-975	46 CV
vibroprensa 3 e 4	Piorotti	BlocoPac 700	042004	48 CV
empilhadeira elétrica	Yale	ERC100VH	-	45 CV

Fonte: Adaptado a partir de Toniolo Pré-Moldados Ltda

A quantificação do consumo energético individual dos equipamentos não foi necessária, uma vez que a empresa forneceu os dados de consumo médio mensal, ano 2014, que totaliza 16.611 kWh. O consumo médio de água é de 2.400 litros de água por dia. A água é fornecida pela rede pública Águas de Palhoça.

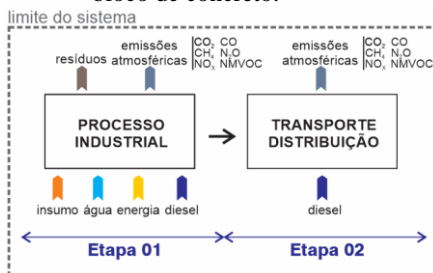
O cálculo do valor atribuído para a produção de uma tonelada de bloco de concreto levou em consideração a produção média da empresa, obtida nos relatórios de controle de produção do ano de 2014.

▪ Etapa 2: Transporte para distribuição

A transferência dos produtos do estoque para os caminhões de distribuição é realizada por uma retroescavadeira JCB, modelo 3C, com consumo de 10 l/h de óleo diesel. A frota de caminhões é própria e dispõe de três unidades, Mercedes-Benz, modelo Atron 2729K, com capacidade de carga de 16 t e consumo de 3,5 km/l. Neste estudo de caso foi assumida a distância até a UFSC que é de 20 km.

A Figura 21 apresenta o fluxograma de entrada e de saída considerados dentro do limite do sistema de análise na elaboração do Inventário do Ciclo de Vida do bloco de concreto.

Figura 21 – Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema do bloco de concreto.



Fonte: Autora

A Tabela 39 apresenta o Inventário do Ciclo de Vida do bloco de concreto, considerando a produção de uma tonelada. A diferença entre o bloco de concreto convencional e o com adição de CzP é a composição dos insumos.

Tabela 39 - ICV do bloco de concreto.

	Dado coletado		Ajuste para 1 tonelada de bloco		
	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
1. PROCESSO INDUSTRIAL					
1.1. Fluxos de entrada					
<i>1.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Cimento Portland CPV-ARI	8,22E+01	kg/t	8,22E+01	kg/t	1
Areia fina*	1,41E+02	kg/t	1,41E+02	kg/t	1
CzP**	9,95E+01	kg/t	9,95E+01	kg/t	1
Areia média	1,64E+02	kg/t	1,64E+02	kg/t	1
Pó de pedra	3,76E+02	kg/t	3,76E+02	kg/t	1
Brita 0	2,35E+02	kg/t	2,35E+02	kg/t	1
<i>1.1.2. Consumo de recursos</i>					
Água					
Água*	5,28E+04	l/mês	3,99E+01	l/t	1
Água**	7,95E+04	l/mês	6,00E+01	l/t	1
Pá carregadeira					
Óleo diesel	1,20E+01	l/h	1,59E+00	l/t	1
<i>1.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>					
Eletricidade	1,66E+04	kWh/mês	1,25E+01	kWh/t	1

...continuação tabela 39

	Dado coletado		Ajuste para 1 tonelada de bloco		
1. PROCESSO INDUSTRIAL					
1.1. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>1.2.1. Emissões atmosféricas</u>					
Proveniente do consumo de óleo diesel					
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	4,45E+03	g/t	2
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	9,62E+01	g/t	2
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	2,89E-01	g/t	2
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	1,23E+02	g/t	2
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	3,50E-03	g/t	2
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	2,34E+01	g/t	2
2. TRANSPORTE PARA DISTRIBUIÇÃO					
2.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>2.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</u>					
Retroescavadeira JCB, modelo 3C					
Óleo diesel	1,00E+01	l/h	1,33E+00	l/t	1
Caminhão Mercedes-Benz, modelo Atron					
Óleo diesel	3,50E+00	km/l	3,57E-01	l/t	1
2.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<u>2.2.1. Emissões atmosféricas</u>					
Proveniente do consumo do óleo diesel					
Dióxido de carbono (CO ₂)	2,80E+03	g/l	4,72E+03	g/t	2
Monóxido de carbono (CO)	6,05E+01	g/l	1,02E+02	g/t	2
Metano (CH ₄)	1,82E-01	g/l	3,07E-01	g/t	2
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	7,76E+01	g/l	1,31E+02	g/t	2
Óxido nitroso (N ₂ O)	2,20E-03	g/l	3,71E-03	g/t	2
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	1,47E+01	g/l	2,48E+01	g/t	2

* Bloco convencional

** Bloco com adição de CzP

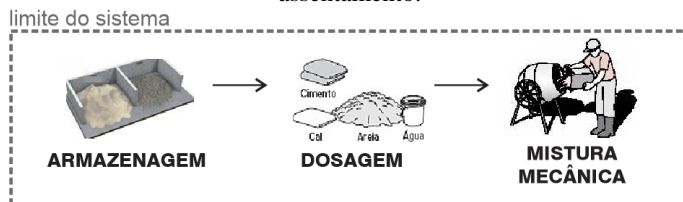
Fonte: 1-Primária: Toniolo Pré-Moldados Ltda., 2-MCT (2006)

Fonte: Autora

4.1.2.2 ICV das argamassas

O sistema do produto das argamassas de revestimento e de assentamento considera o processo convencional de preparo do material para aplicação no canteiro de obra, englobando: armazenagem, dosagem e mistura mecânica (Figura 22). Não são consideradas cargas relacionadas as etapas de armazenagem e dosagem. Para mistura mecânica assumiu-se o uso de uma betoneira elétrica com capacidade de 400 litros, potência de 1,5 kW e tempo de mistura de 0,306 h/m³ (TCPO, 2009). As matérias-primas são consideradas como cargas recebidas na elaboração deste ICV.

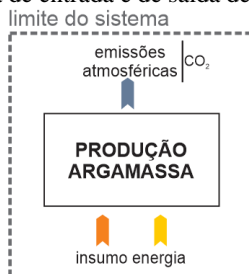
Figura 22 – Limite do sistema da argamassa de revestimento e de assentamento.



Fonte: Autora

Considerando que o processo produtivo das argamassas de assentamento e de revestimento são equivalentes, os inventários são diferenciados apenas pela composição dos insumos. Para a argamassa de revestimento, o traço base, em massa, é de 1:2:7 (cimento:cal hidratada:areia), com relação a/c de 2,29 e espessura de 30 mm. A argamassa do cenário B se diferencia pelo teor de substituição de 100%, em massa, de areia por CzP apresentando traço, em massa, de 1:2:3,03 (cimento:cal hidratada:CzP). Enquanto, para a argamassa de assentamento o traço, em volume, é de 1:1:6 (cimento:cal:areia média) e espessura de 10 mm. Para ambas o cimento utilizado é o CP II-F e a cal, tipo CH III.

A Figura 23 apresenta o fluxograma de entrada e de saída considerados dentro do limite do sistema de análise na elaboração do Inventário do Ciclo de Vida.

Figura 23 - Fluxograma de entrada e de saída dentro do limite do sistema.

Fonte: Autora

As Tabelas 40 e 41 apresentam os Inventários do Ciclo de Vida da argamassa de revestimento e de assentamento, considerando a produção de um metro cúbico.

Tabela 40 - ICV da argamassa de revestimento.

	argamassa convencional		argamassa com adição de CzP		
1. PROCESSO PRODUTIVO					
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Cimento Portland CPII-F	3,22E+02	kg/m³	3,22E+02	kg/m³	1
Cal CH III	7,15E+02	kg/m³	7,15E+02	kg/m³	1
Areia*	1,58E+03	kg/m³	-	-	1
CzP**	-	-	1,11E+03	kg/m³	1
<i>1.1.2. Consumo de recursos</i>					
Água	7,40E+01	l/m³	1,22E+02	l/m³	1
<i>1.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>					
Eletricidade	4,59E-01	kWh/m³	4,59E-01	kWh/m³	2
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	quantidade	unidade	fonte
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>					
Proveniente do consumo de eletricidade					
Dióxido de carbono (CO ₂)	1,36E-04	t/kWh	6,24E-05	t/m³	3

* Argamassa de revestimento convencional

** Argamassa de revestimento com adição de CzP

Fonte: 1-MUSTELIER (2008), 2-TCPO (2009), 3-MCT (2015)

Fonte: Autora

Tabela 41 - ICV da argamassa de assentamento.

1. PROCESSO PRODUTIVO			
1.1. Fluxos de entrada	quantidade	unidade	fonte
<i>1.1.1. Consumo de materiais e combustíveis</i>			
Cimento Portland CPII-F	3,81E+02	kg/m³	1
Cal CH III	3,02E+02	kg/m³	1
Areia	1,96E+03	kg/m³	1
<i>1.1.2. Consumo de recursos</i>			
Água	1,00E+02	l/m³	1
<i>1.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>			
Eletricidade	4,59E-01	kWh/m³	2
1.2. Fluxos de saída	quantidade	unidade	fonte
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>			
Proveniente do consumo de eletricidade			
Dióxido de carbono (CO ₂)	6,24E-05	t/m³	3

Fonte: 1-Primária: ValoRes, 2-TCPO (2009), 3-MCT (2015)

Fonte: Autora

4.1.3 ICV do sistema vertical de vedação

O sistema do produto considera as definições de objetivo e escopo descritos no capítulo 4. A correlação dos dados dos inventários dos subsistemas à unidade funcional, definida como 1m² de sistema vertical de vedação, são apresentados na Tabela 42 para o sistema vertical de vedação convencional e Tabela 43 para o sistema vertical de vedação com adição de CzP.

Tabela 42 - ICV do sistema vertical de vedação convencion

		Total	Bloco de concreto	Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
1.1. Fluxos de entrada	unidade	quantidade	quantidade	quantidade	quantidade
<i>1.1.1. Consumo de recursos</i>					
Uso do solo					
Transformação, de área de floresta	m ² /m ²	6,47E-02	5,19E-02	8,99E-03	3,84E-03
Transformação, para área de extração mineral	m ² /m ²	6,47E-02	5,19E-02	8,99E-03	3,84E-03
Ocupação, área construída	m ² /m ²	1,87E-04	1,87E-04	-	-
Água	l/m ²	2,93E+01	1,51E+01	1,08E+01	3,40E+00
Areia natural	t/m ²	1,99E-01	1,22E-01	5,40E-02	2,30E-02
Calcário	t/m ²	5,30E+01	9,90E+00	3,60E+01	7,12E+00
Rocha granítica	t/m ²	3,93E-02	3,93E-02	-	-
Gipsita	t/m ²	9,81E-04	3,02E-04	4,82E-04	1,97E-04

... continuação tabela 42

		Total	Bloco de concreto	Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
1.1. Fluxos de entrada	unidade	quantidade	quantidade	quantidade	quantidade
<i>1.1.2. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Cimento Portland CP V-ARI	kg/m ²	1,31E+01	1,31E+01	-	-
Cimento Portland CP II-F	kg/m ²	1,36E+01	-	9,64E+00	3,93E+00
Cal, tipo CH III	kg/m ²	2,45E+01	-	2,14E+01	3,11E+00
Areia fina	kg/m ²	6,98E+01	2,25E+01	4,73E+01	-
Areia média	kg/m ²	4,64E+01	2,62E+01	-	2,02E+01
Brita 0	kg/m ²	3,75E+01	3,75E+01	-	-
Pó de pedra	kg/m ²	5,99E+01	5,99E+01	-	-
Explosivo (ANFO)	kg/m ²	1,15E-02	1,15E-02	-	-
Coque de petróleo	kg/m ²	2,51E+00	7,75E-01	1,38E+00	3,50E-01
Carvão vegetal	kg/m ²	1,98E-01	9,70E-02	7,14E-02	2,91E-02
Carvão mineral	kg/m ²	5,34E-02	2,62E-02	1,93E-02	7,86E-03
Óleo diesel	kg/m ²	9,39E-01	7,15E-01	1,74E-01	5,07E-02
Óleo combustível	kg/m ²	1,60E-02	7,87E-03	5,79E-03	2,36E-03
Lenha	kg/m ²	2,82E+00	-	2,46E+00	3,56E-01
Gás natural	kg/m ²	1,60E-02	7,87E-03	5,79E-03	2,36E-03

... continuação tabela 42

		Total	Bloco de concreto	Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
1.1. Fluxos de entrada	unidade	quantidade	quantidade	quantidade	quantidade
<i>1.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>					
Eletricidade	kWh/m²	3,05E+01	1,15E+01	1,50E+01	3,97E+00
1.2. Fluxos de saída	unidade	quantidade	unidade		
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>					
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg/m²	5,68E+01	1,84E+01	3,09E+01	7,51E+00
Monóxido de carbono (CO)	kg/m²	6,50E-02	4,99E-02	1,17E-02	3,35E-03
Metano (CH ₄)	kg/m²	1,93E-04	1,48E-04	3,49E-05	9,98E-06
Óxidos de nitrogênio (NOx)	kg/m²	8,34E-02	6,40E-02	1,51E-02	4,30E-03
Óxido nítrico (N ₂ O)	kg/m²	2,36E-06	1,81E-06	4,27E-07	1,22E-07
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	kg/m²	1,58E-02	1,21E-02	2,86E-03	8,16E-04
Gás nitrogênio (N ₂)	kg/m²	1,16E-06	1,16E-06	-	-
Vapor d'água (H ₂ O)	kg/m²	1,74E-06	1,74E-06	-	-
<i>1.2.2. Resíduos sólidos</i>					
Resíduos	kg/m²	1,95E+01	1,27E+01	4,73E+00	2,02E+00

Fonte: Autora

Tabela 43 - ICV do sistema vertical de vedação com adição de CzP.

		Total	Bloco de concreto	Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
1.1. Fluxos de entrada	unidade	quantidade	quantidade	quantidade	quantidade
<i>1.1.1. Consumo de recursos</i>					
Uso do solo					
Transformação, de área de floresta	m²/m²	3,82E-02	4,33E-02	-8,99E-03	3,84E-03
Transformação, para área de extração mineral	m²/m²	3,82E-02	4,33E-02	-8,99E-03	3,84E-03
Transformação, para área industrial	m²/m²	2,35E-10	7,56E-11	1,59E-10	-
Ocupação, área construída	m²/m²	1,87E-04	1,87E-04	-	-
Água	l/m²	2,49E+01	1,54E+01	6,11E+00	3,40E+00
<i>1.1.1. Consumo de recursos</i>					
Areia natural	t/m²	4,59E-02	7,30E-02	-5,01E-02	2,30E-02
Calcário	t/m²	5,30E-02	9,90E-03	3,60E-02	7,12E-03
Rocha granítica	t/m²	3,93E-02	3,93E-02	-	-
Gipsita	t/m²	9,81E-04	3,02E-04	4,82E-04	1,97E-04
Carvão bituminoso	t/m²	5,75E-08	1,85E-08	3,90E-08	-
<i>1.1.2. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
Cimento Portland CP V-ARI	kg/m²	1,31E+01	1,31E+01	-	-
Cimento Portland CP II-F	kg/m²	1,36E+01	-	9,64E+00	3,93E+00

... continuação tabela 43

		Total	Bloco de concreto	Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
1.1. Fluxos de entrada	unidade	quantidade	quantidade	quantidade	quantidade
<i>1.1.2. Consumo de materiais e combustíveis</i>					
CzP	kg/m ²	4,93E+01	1,59E+01	3,34E+01	-
Areia média	kg/m ²	4,64E+01	2,62E+01	-	2,02E+01
Brita 0	kg/m ²	3,75E+01	3,75E+01	-	-
Pó de pedra	kg/m ²	5,99E+01	5,99E+01	-	-
Explosivo (ANFO)	kg/m ²	1,15E-02	1,15E-02	2,42E-08	-
Coque de petróleo	kg/m ²	2,51E+00	7,75E-01	1,38E+00	3,50E-01
Carvão vegetal	kg/m ²	1,98E-01	9,70E-02	7,14E-02	2,91E-02
Carvão mineral	kg/m ²	5,34E-02	2,62E-02	1,93E-02	7,86E-03
Óleo diesel	kg/m ²	9,26E-01	7,80E-01	8,72E-02	5,84E-02
Óleo combustível	kg/m ²	1,60E-02	7,87E-03	5,79E-03	2,36E-03
Lenha	kg/m ²	2,82E+00	-	2,46E+00	3,56E-01
Cás natural	kg/m ²	1,60E-02	7,87E-03	5,79E-03	2,36E-03
<i>1.1.3. Consumo de recursos energéticos</i>					
Eletricidade	kWh/m ²	3,05E+01	1,15E+01	1,50E+01	3,97E+00

... continuação tabela 43

		Total	Bloco de concreto	Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
1.2. Fluxos de saída	unidade	quantidade	unidade	quantidade	quantidade
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>					
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg/m ²	5,64E+01	1,83E+01	3,06E+01	7,51E+00
Monóxido de carbono (CO)	kg/m ²	5,48E-02	4,66E-02	4,83E-03	3,35E-03
Metano (CH ₄)	kg/m ²	1,63E-04	1,39E-04	1,44E-05	9,98E-06
Óxidos de nitrogênio (NOx)	kg/m ²	7,03E-02	5,98E-02	6,19E-03	4,30E-03
Óxido nitroso (N ₂ O)	kg/m ²	2,00E-06	1,70E-06	1,76E-07	1,22E-07
Compostos orgânicos voláteis não metanos (NMVOC)	kg/m ²	1,33E-02	1,13E-02	1,17E-03	8,16E-04
Gás nitrogênio (N ₂)	kg/m ²	1,16E-06	1,16E-06	2,44E-12	-
Vapor d'água (H ₂ O)	kg/m ²	1,74E-06	1,74E-06	3,67E-12	-
Material particulado (MP)	kg/m ²	1,48E-08	4,77E-09	1,00E-08	-
Antimônio (Sb)	kg/m ²	1,79E-19	5,75E-20	1,21E-19	-
Arsênio (As)	kg/m ²	4,06E-18	1,31E-18	2,75E-18	-
Berílio (Be)	kg/m ²	2,08E-19	6,70E-20	1,41E-19	-
Cádmio (Cd)	kg/m ²	5,06E-19	1,63E-19	3,43E-19	-
Cromo (Cr)	kg/m ²	2,57E-18	8,29E-19	1,74E-18	-
Cobalto (Co)	kg/m ²	9,91E-19	3,19E-19	6,72E-19	-

... continuação tabela 43

		Total	Bloco de concreto	Argamassa de revestimento	Argamassa de assentamento
1.2. Fluxos de saída	unidade	quantidade	unidade	quantidade	quantidade
<i>1.2.1. Emissões atmosféricas</i>					
Chumbo (Pb)	kg/m ²	4,16E-18	1,34E-18	2,82E-18	-
Manganês (Mn)	kg/m ²	4,84E-18	1,56E-18	3,28E-18	-
Magnésio (Mg)	kg/m ²	1,09E-16	3,51E-17	7,38E-17	-
Merúrio (Hg)	kg/m ²	8,20E-19	2,64E-19	5,56E-19	-
Níquel (Ni)	kg/m ²	2,77E-18	8,94E-19	1,88E-18	-
Selênio (Se)	kg/m ²	1,29E-17	4,15E-18	8,72E-18	-
<i>1.2.2. Emissões para água</i>					
Sólidos totais	kg/m ²	4,48E-07	1,44E-07	3,04E-07	-
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	kg/m ²	2,29E-07	7,39E-08	1,55E-07	-
Alumínio (Al)	kg/m ²	5,05E-10	4,17E-10	8,78E-11	-
Cobre (Cu)	kg/m ²	8,43E-13	2,72E-13	5,71E-13	-
Ferro (Fe)	kg/m ²	1,31E-10	4,21E-11	8,86E-11	-
Manganês (Mn)	kg/m ²	6,58E-10	2,12E-10	4,46E-10	-
Zinco (Zn)	kg/m ²	2,36E-11	7,62E-12	1,60E-11	-
<i>1.2.3. Resíduos sólidos</i>					
Resíduos	kg/m ²	5,53E+00	8,24E+00	-4,73E+00	2,02E+00

Fonte: Autora

4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

A seguir os resultados gerados pelo programa computacional **SimaPro versão 8 (Faculty)** para as categorias de impacto selecionadas para o método CML (GUINÉE *et al.*, 2002): acidificação (AC); esgotamento de recursos abióticos (ER); eutrofização (EU); formação de ozônio fotoquímico (OF); toxicidade humana (TH); potencial de aquecimento global (AG); uso do solo (US) e; para os fatores de consumo de água (CA) e consumo de energia (CE), são apresentados e discutidos.

4.1.3 AICV dos insumos

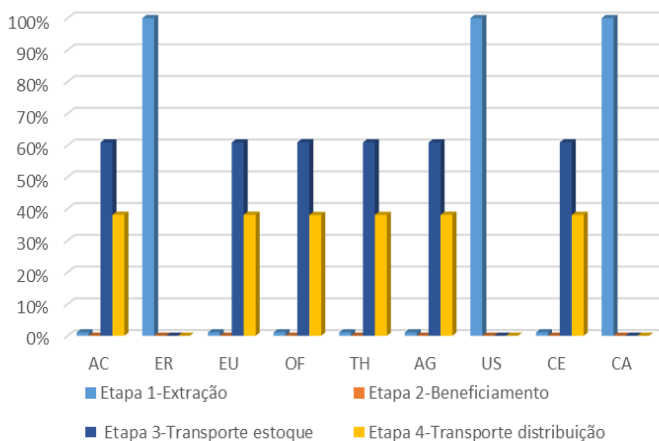
As Tabelas 44 a 46 apresentam os resultados dos impactos para a produção de uma tonelada de agregado utilizado na produção dos subsistemas que compõem os sistemas do produto dos cenários A e B. As Figuras 24 a 26 ilustram graficamente os resultados obtidos, permitindo a visualização das etapas com maior contribuição para as categorias de impacto analisadas. Por fim, a Tabela 47 e a Figura 27 apresentam os resultados globais de impacto da areia e da cinza pesada.

Tabela 44 – Resultado da AICV por tonelada de areia

categoria de impacto	unidade	etapa 1	etapa 2	etapa 3	etapa 4	total
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	6,10E-04	-	3,53E-02	2,21E-02	5,80E-02
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	1,70E-02	-	-	-	1,70E-02
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	1,59E-04	-	9,18E-03	5,75E-03	1,51E-02
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	2,57E-05	-	1,49E-03	9,30E-04	2,45E-03
toxicidade humana (TH)	kg 1,4DB eq.	1,46E-03	-	8,48E-02	5,30E-02	1,39E-01
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	6,64E-02	-	3,85E+00	2,41E+00	6,33E+00
uso do solo (US)	m ² .ano	1,90E-01	-	-	-	1,90E-01
consumo de energia (CE)	MJ	5,94E-01	-	3,44E+01	2,15E+01	5,65E+01
consumo de água (CA)	m ³	6,50E-02	-	-	-	6,50E-02

Etapa 1-Extração, Etapa 2-Beneficiamento, Etapa 3-Transporte estoque, Etapa 4- Transporte distribuição

Fonte: Autora

Figura 24 – Resultado da AICV por tonelada de areia

Fonte: Autora

Através da análise gráfica dos resultados é possível observar que o comportamento entre as categorias de impacto selecionadas: acidificação (AC); eutrofização (EU); formação de ozônio fotoquímico (OF); potencial de aquecimento global (AG) e toxicidade humana (TH), apresentam valores proporcionais entre as etapas do processo produtivo da areia.

Esse comportamento é justificado, uma vez que a extração da areia por desmonte hidráulico é um processo relativamente simples, em que o uso de recursos materiais está relacionado principalmente ao consumo de óleo diesel na draga e para o transporte dos agregados.

O consumo de energia (CE) segue o comportamento gráfico das categorias acima, uma vez que na empresa analisada não há utilização de equipamentos elétricos nas etapas do processo produtivo, portanto o consumo energético está relacionado a energia embutida para produção do óleo diesel.

As emissões atmosféricas provenientes do óleo diesel estão relacionadas às categorias analisadas da seguinte forma:

- a) acidificação: as emissões de gases de NO_x contribuem para alterações da acidez da água e do solo;
- b) eutrofização: as emissões de gases de CO_2 , CO , NO_x e N_2O são fontes de C e de N, afetando os nutrientes da água e do solo causando indesejáveis alterações no meio biótico;
- c) formação de ozônio fotoquímico: as emissões de gases de CO e NMVOCs contribuem para formação de oxidantes fotoquímicos na troposfera, causando dano a saúde humana e ao ecossistema;
- d) potencial de aquecimento global: as emissões de gases relacionados diretamente ao efeito estufa: CO_2 ; CH_4 ; e N_2O , e dos gases indiretos: NO_x , CO e NMVOC's ;
- e) toxicidade humana: são computadas as emissões na água, ar e solo de substâncias potencialmente tóxicas, neste estudo estão relacionadas aos poluentes atmosféricos.

Com base nos dados apresentados, para estas categorias, as etapas relacionadas a extração e beneficiamento da areia apresentam baixo impacto quando comparadas com as etapas de transporte, que representam aproximadamente 98% dos impactos.

A categoria de impacto esgotamento de recursos abióticos (ER) representa a extração de recursos minerais, portanto está atribuída apenas na etapa de extração da areia.

Referente ao consumo de água (CA), foi identificado apenas na etapa de extração do minério, relacionada a quantidade de água incorporada na areia. A empresa informou que não utiliza água para controle de material particulado na etapa de transporte.

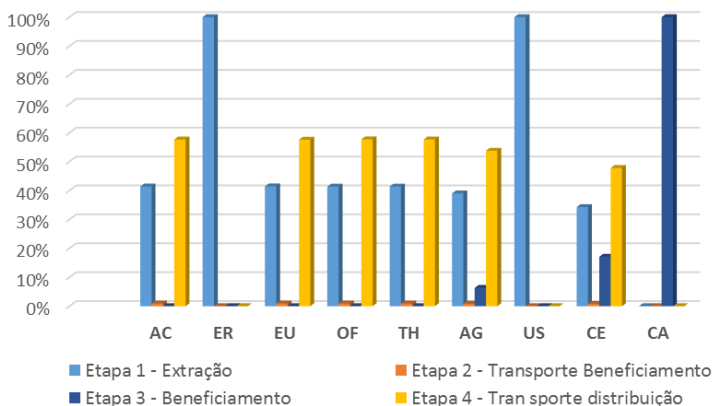
A categoria uso do solo (US) representa o impacto relacionado a área de lavra e a estimativa da produção ao longo da vida útil.

Tabela 45 - Resultado da AICV por tonelada de brita

categoria de impacto	unidade	etapa 1	etapa 2	etapa 3	etapa 4	total
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	4,33E-02	9,76E-04	-	6,03E-02	1,05E-01
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	1,63E-02	-	-	-	1,63E-02
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	1,13E-02	2,54E-04	-	1,57E-02	2,73E-02
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	1,82E-03	4,11E-05	-	2,54E-03	4,40E-03
toxicidade humana (TH)	kg 1,4DBeq.	1,04E-01	2,34E-03	-	1,45E-01	2,51E-01
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	4,74E+00	1,06E-01	7,90E-01	6,56E+00	1,22E+01
uso do solo (US)	m ² .ano	8,35E-01	-	-	-	8,35E-01
consumo de energia (CE)	MJ	4,21E+01	9,50E-01	2,10E+01	5,87E+01	1,23E+02
consumo de água (CA)	m ³	-	-	9,17E-03	-	9,17E-03

Etapa 1-Extração, Etapa 2-Transporte beneficiamento, Etapa 3-Beneficiamento, Etapa 4-Transporte distribuição

Fonte: Autora

Figura 25 – Resultado da AICV por tonelada de brita

Fonte: Autora

Com base nos dados apresentados observar-se que o comportamento entre as categorias de impacto selecionadas: acidificação (AC); eutrofização (EU); formação de ozônio fotoquímico (OF) e; toxicidade humana (TH), são equivalente para as etapas do processo produtivo da brita. Esse comportamento é justificado, uma vez que as

emissões atmosféricas de gases à elas atribuídas são provenientes do consumo de óleo diesel e do explosivo.

Para o potencial de aquecimento global (AG), o aumento das emissões na etapa de beneficiamento do minério, quando comparadas às demais categorias, está relacionada às emissões de CO₂ devido ao consumo de energia (CE) utilizada para alimentar os equipamentos de britagem e classificação dessa etapa. As emissões atmosféricas provenientes do óleo diesel, explosivo e energia elétrica estão relacionadas a estas categorias, da seguinte forma:

- a) acidificação: as emissões de gases de NO_x (óleo diesel) contribuem para alterações da acidez da água e do solo;
- b) eutrofização: as emissões de gases de CO₂ (óleo diesel, energia e explosivo), CO (óleo diesel), NO_x (óleo diesel) e N₂O (óleo diesel) e N₂ (explosivo) são fontes de C e de N, afetando os nutrientes da água e do solo causando indesejáveis alterações no meio biótico;
- c) formação de ozônio fotoquímico: as emissões de gases de CO (óleo diesel) e NMVOCs (óleo diesel) contribuem para formação de oxidantes fotoquímicos na troposfera, causando dano a saúde humana e ao ecossistema;
- d) potencial de aquecimento global: as emissões de gases relacionados diretamente ao efeito estufa: CO₂ (óleo diesel, energia e explosivo); CH₄; (óleo diesel) e N₂O (óleo diesel), e dos gases indiretos: NO_x (óleo diesel), CO (óleo diesel) e NMVOC's (óleo diesel).
- e) toxicidade humana: são computadas as emissões na água, ar e solo de substâncias potencialmente tóxicas, neste estudo estão relacionadas aos poluentes atmosféricos (óleo diesel, energia e explosivo).

Para as categorias de impacto relacionadas acima, merece destaque a etapa de extração do minério, que totaliza aproximadamente 40% do total. A representatividade dessa etapa está relacionada a necessidade de intervenção na geologia do terreno para extração da rocha granítica, realizada com uso de

explosivos e de máquinas movidas à óleo diesel. No entanto, etapa de transporte para distribuição é a que apresenta maior contribuição, representando aproximadamente 58% dos impactos.

A categoria de impacto esgotamento de recursos abióticos (ER) representa a extração de recursos minerais, portanto está atribuída apenas na etapa de extração da rocha granítica.

Referente ao consumo de água (CA), observa-se apenas na etapa de beneficiamento do minério, relacionada a quantidade de água pulverizada sobre o material para controle da poeira. A empresa informou que não realiza aspersão de água para controle de material particulado na etapa de transporte.

A categoria uso do solo (US) representa o impacto relacionado a área de lavra e a estimativa da produção ao longo da vida útil.

Tabela 46 - Resultado da AICV por tonelada de CzP

categoria de impacto	unidade	etapa 1	etapa 2	etapa 3	etapa 4	etapa 5	etapa 6	etapa 7	total
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	2,93E-08	9,48E-09	1,90E-05	1,62E-02	3,46E-03	5,89E-02	-4,69E-02	3,17E-02
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	5,73E-09	-	-	-	-	-	-	5,73E-09
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	7,62E-09	2,47E-09	3,01E-07	4,23E-03	9,02E-04	1,53E-02	-1,22E-02	8,23E-03
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	8,39E-09	3,99E-10	7,17E-07	6,84E-04	1,46E-04	2,48E-03	-1,98E-03	1,33E-03
toxicidade humana (TH)	kg 1,4DB eq.	7,07E-08	2,28E-08	4,21E-06	3,90E-02	8,31E-03	1,41E-01	-1,13E-01	7,53E-02

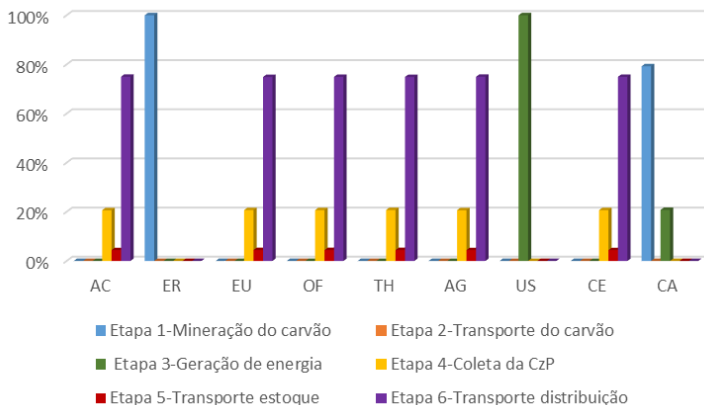
... continuação tabela 46

categoria de impacto	unidade	etapa 1	etapa 2	etapa 3	etapa 4	etapa 5	etapa 6	etapa 7	total
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	3,77E-05	1,03E-06	9,71E-04	1,77E+00	3,78E-01	6,43E+00	-5,11E+00	3,47E+00
uso do solo (US)	m ² .ano	-	-	1,51E-08	-	-	-	-	1,51E-08
consumo de energia (CE)	MJ	1,12E-04	9,24E-06	7,76E-06	1,58E+01	3,37E+00	5,73E+01	-4,57E+01	3,08E+01
consumo de água (CA)	m ³	3,42E-06	-	8,96E-07	-	-	-	-	4,32E-06

Etapa 1-Mineração do carvão, Etapa 2-Transporte do carvão, Etapa 3-Geração de energia, Etapa 4-Coleta da CzP, Etapa 5-Transporte estoque, Etapa 6-Transporte distribuição, Etapa 7-Aterro evitado.

Fonte: Autora

Na elaboração do gráfico apresentado na Figura 26, para melhor compreensão do peso dos processos de geração e coleta para uso benéfico da cinza pesada, os valores da contribuição de redução das cargas ambientais relacionadas ao aterro evitado não são considerados. A análise é feita separadamente no final (Figura 27).

Figura 26 – Resultado da AICV por tonelada de CzP

Fonte: Autora

Os resultados apresentados para as categorias de impacto selecionadas: acidificação (AC); eutrofização (EU); formação de ozônio fotoquímico (OF); toxicidade humana (TH) e; potencial de aquecimento global (AG), mostram que as etapas relacionadas ao processo primário de geração de energia que englobam as etapas: (1) mineração do carvão; (2) transporte do carvão e; (3) geração de energia, contribuem juntos com aproximadamente 2% para essas categorias. Isso se deve ao baixo valor de alocação definido, relacionado ao valor comercial da cinza pesada.

Em um cenário de maior valorização as cargas seriam mais significativas devido ao grande impacto que estes processos geram para o meio ambiente. Merecendo destaque as cargas relacionadas à categoria de impacto toxicidade humana (TH), devido às altas taxas de emissões atmosféricas que ocorrem durante o transporte do carvão e a operação de termelétricas, que englobam além dos GEE a emissão de elementos-traço incorporados no carvão.

No processo secundário relacionado ao uso benéfico da CzP, para estas categorias de impacto, a etapa de transporte é a que apresenta maior contribuição totalizando aproximadamente 75% do total.

Referente ao consumo de energia (CE) as etapas com maior contribuição são as relacionadas ao uso de equipamentos movidos à óleo diesel, devido a energia incorporada no combustível. O consumo energético atribuído a etapa de geração de energia representa menos de 1% do total. A categoria de impacto esgotamento de recursos abióticos

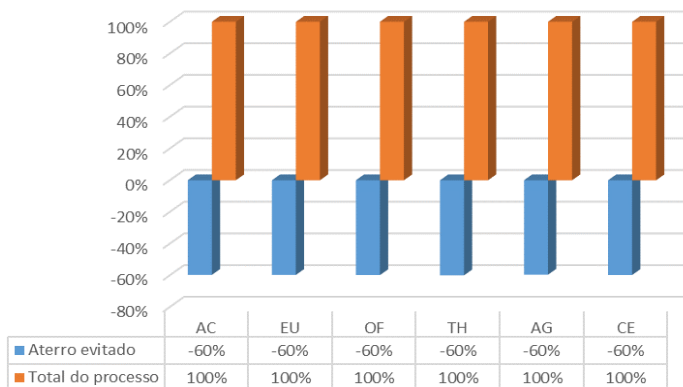
(ER) representa a extração de recursos minerais, portanto está atribuída apenas para a etapa de mineração do carvão.

Como o circuito de abastecimento da água utilizada para arraste da cinza pesada é fechado, o consumo de água (CA) para o cenário de uso benéfico da cinza pesada, não foi considerado neste ICV, sendo restrito aos totais atribuídos às etapas de mineração do carvão energético e de combustão do carvão. Desta forma, a carga atribuída pelo coeficiente de alocação está computada no inventário do processo primário.

Importante destacar que em um cenário de valorização da CzP, seria possível realizar a coleta diretamente na saída da fornalha, como ocorre com a CzL, evitando tanto o consumo de energia para operação de arraste das cinzas, como a necessidade de armazenagem temporária nas bacias de sedimentação.

Para a categoria de uso do solo (US) foi relacionado apenas ao impacto relacionado a área de ocupação do CTJL.

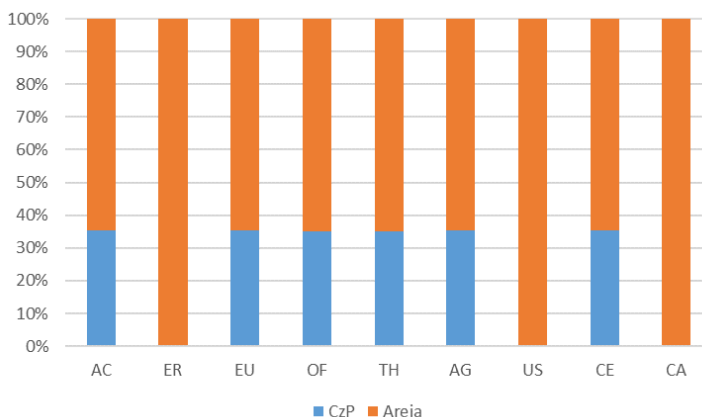
Figura 27 – Contribuição do aterro evitado



Fonte: Autora

Através da análise da Figura 27 é possível concluir que o crédito atribuído ao aterro evitado para o cenário de uso benéfico da cinza pesada contribui para redução de aproximadamente 60% das cargas ambientais das categorias: acidificação (AC); eutrofização (EU); formação de ozônio fotoquímico (OF); potencial de aquecimento global (AG) e toxicidade humana (TH). Essa contribuição está relacionada diretamente ao consumo de óleo diesel utilizado para a disposição em aterro. Não foi considerado crédito ambiental para as demais categorias analisadas.

Figura 28 – Resultado da AICV comparativa entre uma tonelada de areia e uma tonelada de cinza pesada



Fonte: Autora

A Figura 28 apresenta a relação percentual entre os impactos da areia e da cinza pesada, utilizadas neste estudo de caso. Para as categorias de impacto selecionadas: acidificação (AC); eutrofização (EU); formação de ozônio fotoquímico (OF); toxicidade humana (TH); potencial de aquecimento global (AG) e; consumo de energia (CE), é possível afirmar que o uso da cinza pesada apresenta melhor desempenho ambiental do que a areia. Importante destacar que neste AICV os impactos estão relacionados diretamente ao consumo de óleo diesel.

Através das análises individuais dos insumos, a etapa de transporte para distribuição recebe destaque. No entanto, apesar da distância considerada para distribuição da cinza pesada ser superior ao da areia, a carga de crédito do aterro evitado contribui para a redução do impacto global. Referente ao consumo de água (CA) e uso do solo (US), na AICV da cinza pesada, estão relacionadas apenas às cargas recebidas do processo industrial do CTJL. Não sendo atribuídos valores de crédito e, ou consumo para as etapas que envolvem o uso benéfico e o aterro evitado, portanto, estes fatores não serão aqui comparados.

4.1.4 AICV do sistema do produto dos cenários A e B

As Tabelas 47 e 48 apresentam os resultados dos impactos para a produção do sistema do produto dos cenários A e B. As Figuras 29 a 37

ilustram graficamente os resultados percentuais obtidos para cada categoria de impacto, permitindo análise comparativa.

Tabela 47 - Resultado da AICV do cenário A

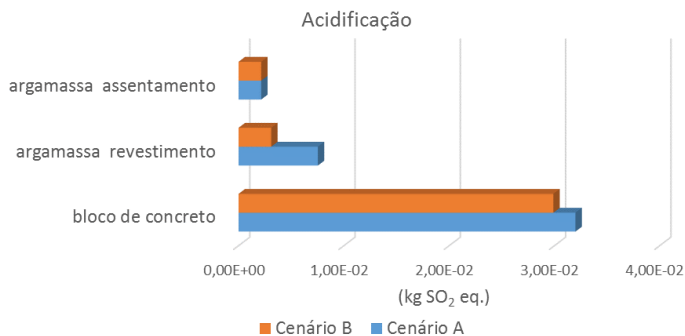
categoria de impacto	unidade	bloco de concreto	argamassa revestimento	argamassa assentamento	total
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	3,20E-02	7,53E-03	2,15E-03	4,17E-02
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	2,43E-03	3,52E-04	8,26E-04	3,61E-03
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	8,32E-03	1,96E-03	5,59E-04	1,08E-02
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	1,35E-03	3,17E-04	9,06E-05	1,76E-03
toxicidade humana (TH)	kg 1,4DB eq.	7,68E-02	1,81E-02	5,16E-03	1,00E-01
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	1,96E+01	3,12E+01	7,59E+00	5,84E+01
uso do solo (US)	m ² .ano	5,19E-02	8,99E-03	3,84E-03	6,47E-02
consumo de energia (CE)	MJ	7,27E+01	6,13E+01	1,64E+01	1,50E+02
consumo de água (CA)	m ³	1,51E-02	1,08E-02	3,40E-03	2,93E-02

Fonte: Autora

Tabela 48 - Resultado da AICV do cenário B

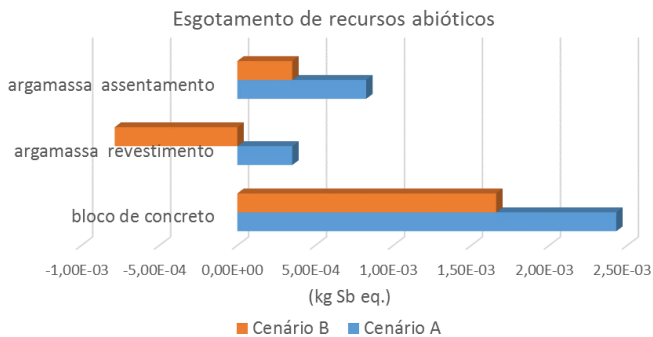
categoria de impacto	unidade	bloco de concreto (CzP)	argamassa revestimento (CzP)	argamassa assentamento	total
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	2,99E-02	3,10E-03	2,15E-03	3,52E-02
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	1,66E-03	-7,87E-04	3,52E-04	1,23E-03
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	7,77E-03	8,05E-04	5,59E-04	9,13E-03
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	1,26E-03	1,30E-04	9,06E-05	1,48E-03
toxicidade humana (TH)	kg 1,4DB eq.	7,17E-02	7,43E-03	5,16E-03	8,43E-02
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	1,94E+01	3,07E+01	7,59E+00	5,77E+01
uso do solo (US)	m ² .ano	4,33E-02	-8,99E-03	3,84E-03	3,82E-02
consumo de energia (CE)	MJ	7,06E+01	5,70E+01	1,64E+01	1,44E+02
consumo de água (CA)	m ³	1,54E-02	6,11E-03	3,40E-03	2,49E-02

Fonte: Autora

Figura 29 – Resultado da categoria acidificação para os cenários A e B

Fonte: Autora

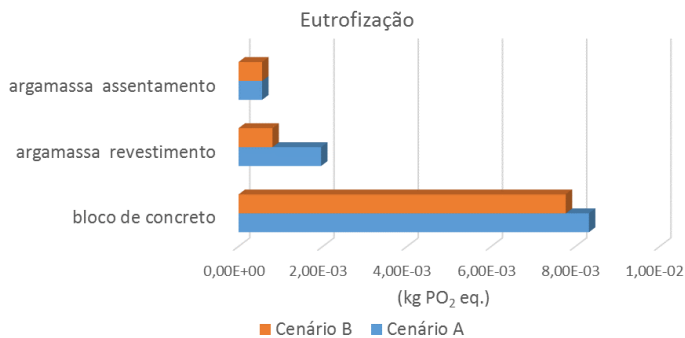
Na categoria de acidificação a maior contribuição de impacto ambiental, em kg de SO₂ equivalente, é referente ao uso do bloco de concreto, com percentual de 77% para o cenário A e de 85% para o cenário B. Para produção dos blocos de concreto o uso da cinza pesada contribuiu para redução de 7% na carga de impacto desta categoria. Para a argamassa de revestimento, o sistema convencional representa 18% para o sistema convencional e de 8% para o sistema com adição de CzP, sendo que o uso da CzP contribuiu para redução de 59% do impacto neste subsistema. Isto está relacionado tanto ao menor peso em massa da cinza pesada na produção do sistema do cenário B, quanto a menor carga ambiental desse insumo.

Figura 30 – Resultado da categoria esgotamento de recursos abióticos para os cenários A e B

Fonte: Autora

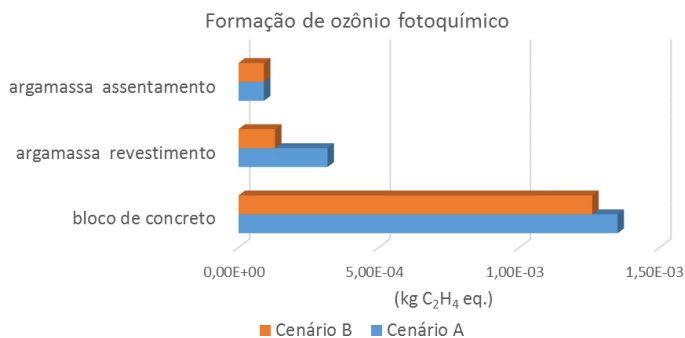
Na categoria de esgotamento de recursos abióticos a maior contribuição de impacto ambiental, em kg de Sb equivalente, é referente ao uso do bloco de concreto. Para esse subsistema, o cenário com uso de CzP apresenta uma redução de 32% do impacto, quando comparado ao cenário convencional. Para a argamassa de revestimento o uso da CzP gera um crédito ambiental superior a 100% do impacto gerado pelo cenário A. Isto está relacionado ao crédito referente a extração da areia. Como na argamassa de revestimento não há uso da brita, o crédito recebido apresenta maior peso na contribuição do impacto global. Vale destacar que para as matérias-primas de segundo plano, não foi atribuído valor de impacto para esta categoria.

Figura 31 – Resultado da categoria eutrofização para os cenários A e B



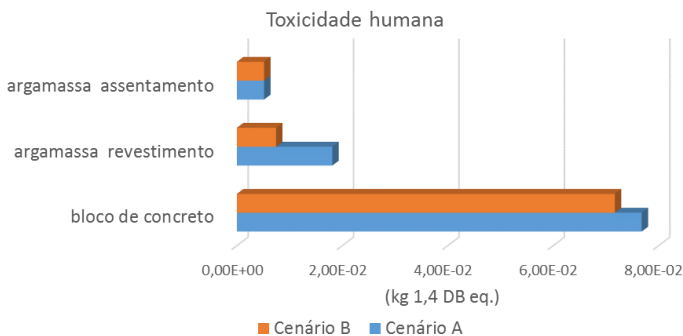
Fonte: Autora

Figura 32 - Resultado da categoria formação de ozônio fotoquímico para os cenários A e B



Fonte: Autora

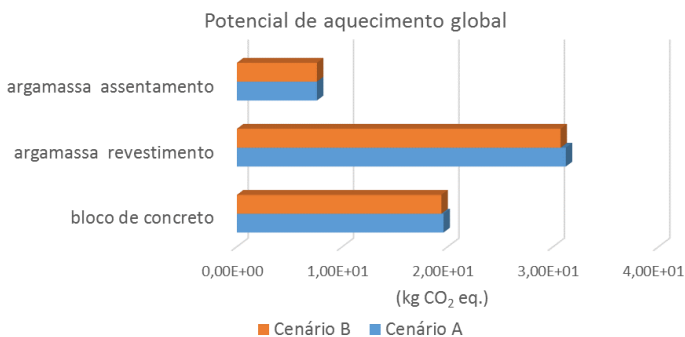
Figura 33 - Resultado da categoria toxicidade humana para os cenários A e B



Fonte: Autora

Nas categorias de impacto eutrofização; em kg de PO_4 equivalente; de formação de ozônio fotoquímico; em kg C_2H_4 equivalente e de toxicidade humana; em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente; o maior impacto se mantém relacionado ao uso do bloco de concreto, com proporção de 77% para o cenário A e de 85% para o cenário B. Através da análise dos resultados, conclui-se que o uso da cinza pesada contribui para redução de 7% para produção dos blocos de concreto e de 59% para produção da argamassa de revestimento. Isto se deve ao menor consumo de óleo diesel para produção da CzP em relação a produção da areia.

Figura 34 – Resultado da categoria potencial de aquecimento global para os cenários A e B

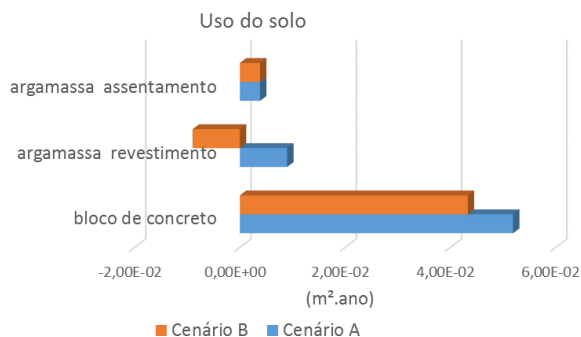


Fonte: Autora

Na categoria de potencial de aquecimento global a maior contribuição de impacto ambiental, em kg de CO_2 equivalente, é

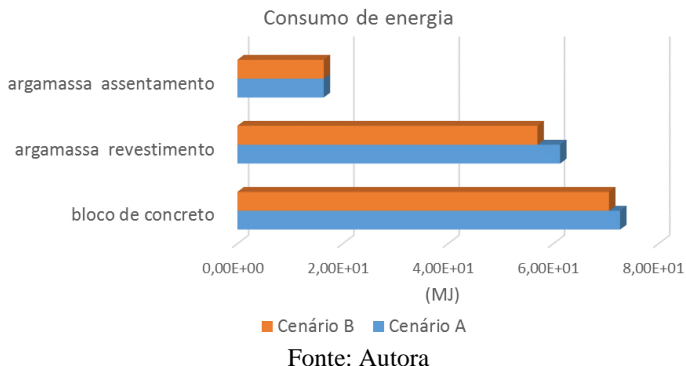
referente ao uso da argamassa de revestimento, com percentual de 53% para ambos cenários. Essa representatividade está diretamente relacionada ao consumo de CP e da cal hidratada, materiais com altas taxas de emissões de CO₂. Esses materiais representam 40% da mistura da argamassa de revestimento. Para o subsistema do bloco de concreto o peso referente ao cimento é de aproximadamente 8% e a contribuição do impacto global é de 33%.

Figura 35– Resultado da categoria uso do solo para os cenários A e B

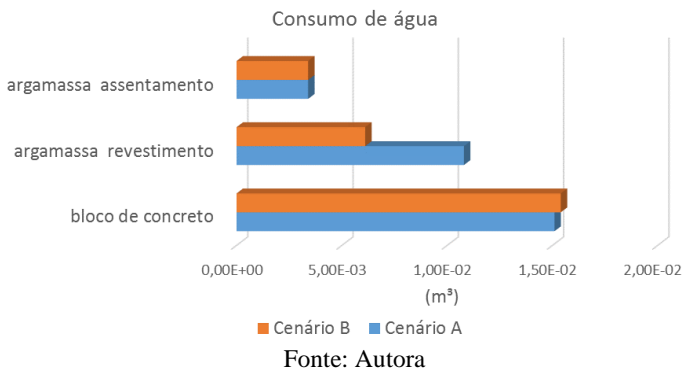


Fonte: Autora

Na categoria de uso do solo a maior contribuição de impacto ambiental, em m². ano, é referente ao uso do bloco de concreto. Para esse subsistema, o cenário B, apresenta redução de 17% do impacto quando comparado ao cenário convencional. Para a argamassa de revestimento a diferença é ainda mais significativa, alcançando 99%. Isto está relacionado ao crédito referente a extração da areia. Como na argamassa de revestimento não há uso de outros agregados, o crédito recebido apresenta maior peso na contribuição do impacto global. Vale destacar que para as matérias-primas de segundo plano, não foi atribuído valor de impacto para esta categoria.

Figura 36 – Resultado do consumo de energia para os cenários A e B

Na categoria de consumo de energia, a maior contribuição de impacto ambiental, em MJ, é referente ao bloco de concreto, com percentual de 48% para o cenário A e 49% para o cenário B. O uso da cinza pesada contribui para redução de 3% do impacto para o bloco de concreto e de 7% para a argamassa de revestimento. A baixa influência da substituição da cinza pesada na confecção dos subsistemas, está relacionada ao alto valor da energia embutida do cimento Portland e da cal hidratada, quando comparados a energia embutida do processo de extração da areia. Esses materiais representam 40% da mistura da argamassa de revestimento. Para o subsistema do bloco de concreto o peso referente ao cimento é de aproximadamente 8%.

Figura 37 – Resultado do consumo de água para os cenários A e B

Na categoria de consumo de água a maior contribuição de impacto ambiental, em m³, é referente ao uso do bloco de concreto, com percentual de 52% para o cenário A e de 62% para o cenário B. Isto se deve a quantidade de água adicional, adotada no traço base, dos materiais cimentícios com adição de CzP. A Tabela 49 ilustra o peso percentual da água incorporada nos insumos e da utilizada na mistura para confecção dos blocos.

Tabela 49 - Origem do consumo de água na AICV do bloco de concreto

origem	cenário A	cenário B
cimento Portland CP V-ARI	9%	9%
areia fina	-	10%
cinza pesada	0%	-
crédito extração de areia	-10%	-
areia média	11%	11%
pó de pedra	25%	26%
brita 0	2%	2%
mistura	62%	42%

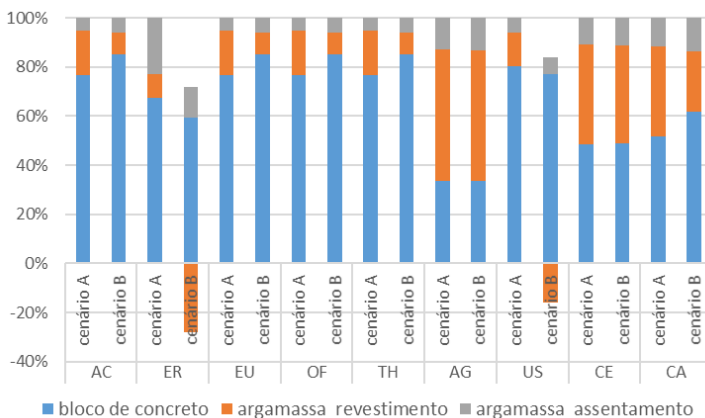
Fonte: Autora

No entanto, para a argamassa de revestimento esse fato não é evidenciado no resultado global do AICV, que o cenário A apresenta maior consumo de água do que o cenário B. Esse resultado é afetado pela aplicação da carga evitada relacionada a extração da areia. A Tabela 50 ilustra o peso percentual da água incorporada nos insumos e da utilizada na mistura para confecção da argamassa de revestimento.

Tabela 50 - Origem do consumo de água na AICV da argamassa de revestimento

origem	cenário A	cenário B
cimento Portland CP II-F	9%	16%
cal CH III	42%	75%
areia média	29%	-
cinza pesada	-	0%
crédito extração de areia	-	-51%
mistura	20%	60%

Fonte: Autora

Figura 38 – Comparação dos cenários A e B

Fonte: Autora

Através da análise global dos resultados, o cenário B com uso de CzP, apresenta melhor desempenho ambiental. Nas categorias relacionadas as emissões atmosféricas (AC, EU, OF e TH), há redução da carga ambiental de aproximadamente de 16% do valor total, exceto para a categoria de impacto que avalia o potencial de aquecimento global, em que a redução é de apenas 1%. Isso ocorre devido aos altos valores de emissões de CO₂ atribuídas ao cimento Portland e a cal hidratada.

Para as categorias de impacto de esgotamento de recursos naturais (ER) e de uso do solo (US), a contribuição do uso benéfico da CzP é mais evidente para o sistema do produto. Alcançando uma redução de 66% e 41% dos impactos respectivamente.

Na categoria de consumo de água (CA), apesar da maior necessidade de água incorporada na mistura para produção dos subsistemas, quando analisado o resultado global do consumo de água ao longo do ciclo de vida, o resultado final é positivo para o cenário B. A redução é de aproximadamente de 15% do volume total.

Na categoria de consumo de energia (CE) apesar da baixa contribuição (4%) a redução do impacto é percebida. Esse valor é atribuído ao crédito do aterro evitado, relacionado a energia embutida do óleo diesel.

4.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

No estudo de caso apresentado, o método da ACV foi utilizado para construir cenários que possibilitassem a aplicação prática do aproveitamento da CzP em um sistema construtivo.

Através da aplicação do método da ACV foi possível verificar as fases ao longo do ciclo de vida com maior relevância e que influenciaram os resultados finais. Esse conhecimento é importante para tomada de decisões que envolvam a substituição de agregados naturais por subprodutos.

Considerando os resultados obtidos na elaboração do ICV e da AICV, alguns pontos merecem destaque. Neste estudo, o consumo de óleo diesel se mostrou determinante nos resultados dos impactos globais nas análises dos agregados. Sendo a fase de transporte para distribuição a etapa mais significativa, representando 40% dos impactos relacionados ao consumo de óleo diesel no processo produtivo da areia, e de 75% para a cinza pesada.

Um ponto de destaque, é que apesar do maior consumo de óleo diesel atribuído ao ciclo de vida da CzP, o crédito da carga evitada para a sua disposição final contribuiu para redução dos impactos globais. Importante destacar que em um cenário de maior valorização da CzP, o crédito relacionado a sua disposição seriam ainda maiores. Considerando que seria possível eliminar a necessidade de armazenagem temporária em bacias de sedimentação, como ocorre com a cinza leve.

Entre as categorias de impacto consideradas neste estudo, merecem destaques o esgotamento de recursos abióticos e o de uso do solo. Uma vez, que a extração de materiais virgens estão relacionados a impactos irreversíveis para o ecossistema, tais como: alteração da geologia, alteração da fauna e da flora e mudança no microclima, estes impactos devem sempre serem considerados em estudos que envolvem a substituição de materiais minerais por subprodutos da indústria.

Outro ponto a ser discutido é referente a taxa de alocação, que envolve as cargas recebidas do processo primário de geração da cinza pesada. Mesmo com a baixa valorização da CzP, a influência é de aproximadamente 2% para as categorias de impacto relacionadas às emissões atmosféricas. Portanto, mesmo um baixo coeficiente de alocação em termos de valor econômico, afeta fortemente os indicadores ambientais.

Desta forma, se faz necessário verificar a influência do valor atribuído no resultado do estudo. A Tabela 51 apresenta os valores obtidos para as categorias de impacto considerando um cenário de valorização da CzP, com valor de ponderação igual a 100% do valor da CzL. Os valores são baseados em Pozzobon (1999) e constam no capítulo 3.

Tabela 51 - Resultado do AICV da cinza pesada com atribuição 100% do valor da CzL.

categoria de impacto	unidade	alocação (R\$ CzP)	alocação (R\$ CzL)	diferença
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	3,18E-02	3,23E-02	5,00E-04
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	5,73E-09	1,38E-07	1,32E-07
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	8,27E-03	8,27E-03	0,00E+00
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	1,34E-03	1,36E-03	2,00E-05
toxicidade humana (TH)	kg 1,4DB eq.	7,63E-02	7,64E-02	1,00E-04
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	3,46E+00	3,49E+00	3,00E-02
uso do solo (US)	m ² .ano	4,76E-09	1,22E-07	1,17E-07
consumo de energia (CE)	MJ	3,10E+01	3,10E+01	0,00E+00
consumo de água (CA)	m ³	4,31E-06	1,10E-04	1,06E-04

Fonte: Autora

Os valores obtidos para o AICV individual da CzP foram correlacionados aos fluxos de referência do sistema do produto, com objetivo de verificar a influência da carga do processo primário no resultado final do estudo de caso, conforme Tabela 52 e Figura 39.

Tabela 52 – Diferença entre os resultados obtidos para o cenário B.

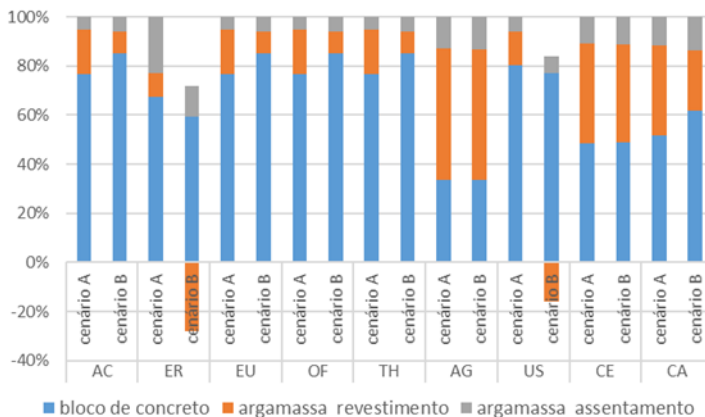
categoria de impacto	unidade	alocação (R\$ CzP)	alocação (R\$ CzL)	sensibilidade
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	3,52E-02	3,52E-02	0%
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	1,23E-03	1,23E-03	0%
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	9,13E-03	9,14E-03	0%
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	1,48E-03	1,48E-03	0%

...continuação tabela 52

toxicidade humana (TH)	kg 1,4DB eq.	8,43E-02	8,43E-02	0%
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	5,77E+01	5,77E+01	0%
categoria de impacto	unidade	alocação (R\$ CzP)	alocação (R\$ CzL)	sensibilidade
uso do solo (US)	m ² .ano	3,82E-02	3,82E-02	0%
consumo de energia (CE)	MJ	1,44E+02	1,44E+02	0%
consumo de água (CA)	m ³	2,49E-02	2,49E-02	0%

Fonte: Autora

Figura 39 – Comparação dos cenários A e B com atribuição de 100% do valor da CzL.



Fonte: Autora

Através da análise de sensibilidade apresentada na Tabela 52, é possível verificar o aumento da carga no AICV individual da cinza pesada para as categorias de impacto analisadas.

No entanto, a carga atribuída aos subsistemas no cenário B não interfere no resultado global do cenário B, conforme valores apresentados na Tabela 52. Portanto, não há interferência no resultado do estudo.

Como neste estudo a etapa de transporte para distribuição se mostrou determinante nos resultados obtidos, uma análise de sensibilidade da distância considerada foi realizada a fim de elucidar a aplicação deste material em habitações construídas em um raio de até 30 km a partir do CTJL, os resultados são apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 - Diferença entre os resultados obtidos para o cenário B.

categoria de impacto	unidade	distância (110km)	distância (30km)	diferença
acidificação (AC)	kg SO ₂ eq.	3,52E-02	-1,27E-02	-4,79E-02
esgotamento de recursos abióticos (ER)	kg Sb eq.	1,23E-03	1,23E-03	1,32E-07
eutrofização (EU)	kg PO ₄ eq.	9,13E-03	-3,27E-03	-1,24E-02
formação de ozônio fotoquímico (OF)	kg C ₂ H ₄ eq.	1,48E-03	-5,40E-04	-2,02E-03
toxicidade humana (TH)	kg 1,4DB eq.	8,43E-02	-3,07E-02	-1,15E-01
potencial de aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq.	5,77E+01	5,24E+01	-5,34E+00
uso do solo (US)	m ² .ano	3,82E-02	3,82E-02	3,49E-07
consumo de energia (CE)	MJ	1,44E+02	1,45E+02	1,07E+00
consumo de água (CA)	m ³	2,49E-02	2,49E-02	0,00E+00

Fonte: Autora

Através da análise dos resultados da Tabela 53, é possível verificar que os impactos gerados para o uso benéfico da cinza pesada há uma distância de até 30 km gera um crédito ambiental para a maior parte das categorias analisadas. Isso porque o crédito atribuído ao aterro evitado e à extração evitada da areia são superiores à carga ambiental da cinza pesada.

5 CONCLUSÃO

Este estudo aplicou em um estudo de caso a metodologia de avaliação do ciclo de vida para comparar um sistema vertical convencional com um sistema vertical com adição de cinza pesada. Para este fim, foram desenvolvidos os inventários com base em dados primários dos agregados naturais: areia e brita, do subproduto: cinza pesada e dos subsistemas bloco de concreto e argamassas de revestimento e de assentamento.

A análise das diferentes etapas do ciclo de vida levou a identificação dos pontos com maior contribuição para geração dos impactos globais. Os resultados demonstram que a etapa de transporte para distribuição dos agregados é um fator determinante para as categorias de impacto relacionadas às emissões atmosféricas e ao consumo energético.

No caso do uso de subprodutos, aterros são evitados e os impactos relacionados a mineração dos agregados naturais parcialmente descontados. No entanto, a carga atribuída ao processo primário de produção, bem como a relacionada a disposição e transporte para uso benéfico criam impactos que não podem ser negligenciados.

Com base nestes pressupostos, o inventário da cinza pesada foi elaborado considerando as cargas ambientais relacionadas aos processos de geração e de disposição para uso benéfico, enquanto as cargas ambientais da disposição para aterro foram subtraídas do sistema do produto. O mesmo princípio foi aplicado na elaboração dos inventários dos subsistemas, sendo a carga relativa a extração da areia adotada como crédito ambiental.

O estudo de caso demonstrou que a aplicação da cinza pesada contribuiu para a redução das cargas globais relacionadas as categorias de impacto analisadas. As reduções observadas em cada categoria são resumidas a seguir:

- a) nas categorias de impacto: acidificação, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico e toxicidade humana a redução da carga ambiental é de 16% do valor total. Esta redução é atribuída diretamente ao menor consumo de óleo diesel, considerado para o cenário B;
- b) na categoria de potencial de aquecimento global o resultado dos dois cenários são equivalente com redução de apenas 1% para o cenário B. Isto está relacionado as taxas elevadas de emissões de CO₂ dos insumos: cimento Portland e cal hidratada, o que torna a contribuição dos agregados baixa para o sistema do produto;

- c) nas categorias de impacto de esgotamento de recursos naturais e de uso do solo, a contribuição do uso benéfico da CzP contribui significativamente para o sistema do produto. Alcançando uma redução de 66% e 41% dos impactos respectivamente;
- d) na categoria de consumo de água, a redução é de aproximadamente de 15% do volume total. Importante destacar que a água utilizada para arraste da cinza pesada e manutenção das bacias de sedimentação é em circuito fechado, provenientes do rio, e portanto não foi computada;
- e) na categoria de consumo de energia apesar da baixa contribuição (4%) a redução do impacto é percebida. Esse valor é atribuído ao crédito do aterro evitado, relacionado a energia embutida do óleo diesel.

Uma análise de sensibilidade do coeficiente de alocação econômico adotado para elaboração do inventário da cinza pesada foi realizado, a fim de verificar a influência de um cenário de maior valorização da cinza pesada como material da construção civil. Os resultados demonstraram que apesar do aumento da taxa das cargas ambientais no inventário da cinza pesada, este fator não alterou os resultados globais do estudo.

Neste estudo de caso, o transporte para distribuição se mostrou determinante nos resultados obtidos. Assim, a análise de sensibilidade considerando uma distância de 30km para uso benéfico da cinza pesada, demonstrou que as cargas evitadas referente a extração da areia e ao aterro que seriam evitados são superiores às cargas para coleta e distribuição para uso da cinza pesada.

Com base nestas informações, o estudo de caso demonstrou que para as categorias de impacto selecionadas, o uso da cinza pesada como material substituto da areia é adequado. Importante destacar, que neste estudo o desempenho dos materiais com adição de cinza pesada apresentam desempenho comprovados através da construção e monitoramento do protótipo.

A principal contribuição deste trabalho é a elaboração do inventário da cinza pesada, e as definições dos procedimentos considerados na modelagem de sistemas que envolvem o uso de subprodutos em substituição de matérias-primas naturais.

6 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília: Aneel, 2008. p. 236.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Idetidade=8269&id_area=90>. Acesso em: 14 dez. 2014.
- AHMARUZZAMAN, M. *A review on the utilization of fly ash*. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 36. p. 327-363, 2010.
- AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION (ACAA). **Coal combustion by-product (CCB) production and use**. Disponível em: <http://acaaffiniscap.com/associations/8003/files/2010_CCP_Survey_FINAL_102011.pdf>. Acesso em: 03. out. 2014.
- ANASTASELOS, D.; GIAMA, E.; PAPADOULOS, A. M. *An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions*. *Energy and Buildings*. v. 41. p. 1165-1171, 2009.
- ANASTASIOU, E. K.; PAPAYANNI, A. L. *Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials*. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 101. p. 1-8, 2015.
- ANDRADE, L. B. **Análise da influência da substituição do agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais na fase plástica de concretos**. Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 2008. 287 p..
- ANDRADE, L. B. **Metodologia de Avaliação para uso de cinzas pesada de termelétrica como agregado natural para concreto**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 2004. 268p..
- ASIF, M.; MUNEER, T.; KELLEY, R. *Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland*. *Building and Environment*. Issue 3, v. 42, p. 1391-1394, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico da utilização do cimento Portland**. São Paulo: Boletim Técnico, BT 106, 2002.
- _____. ABCP. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/industria-do-cimento-brasileira-e-a-mais-ecoeficiente-do-mundo>>. Acesso em: 13 out. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA (ABNT). **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **ABNT NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Rio de Janeiro, 2013c.

_____. **ABNT NBR 9935: Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida –Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais - desempenho - parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE**. Rio de Janeiro, 2013.

BABBITT, C. W.; LINDNER, A. S. *A Life Cycle Comparison of Disposal and Beneficial Use of Coal Combustion Products in Florida*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, p. 202-211, 2008.

BALA, A.; RAUGEI, M.; BENVENISTE, G.; GANZULLA, C. *Simplified tools for global warming potential evaluation: when 'good enough' is best*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 15, p. 489-498, 2010.

BARE, J. C.; NORRIS, G. A.; PENNINGTON, D. W.; MCKONE, T. *TRACI: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts*. *International Journal of Industrial Ecology*, Issue 3, v. 6, p. 49-78, 2003.

BAUGARTNER, R. J. *Critical perspectives of sustainable development research and practice*. *Journal of Cleaner Production*, Issue 8, V. 19, p. 783-786, 2011.

BERARDI, U. *Beyond sustainability assessment systems: Upgrading topics by upscaling the assessment*. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. Issue 4, V. 2, p. 276-282, 2011.

BERARDI, U. *Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building*. *Sustainable Cities and Society*. Issue 8, p. 72-78, 2013.

BESSA, V. M. T. **Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de**

- edifícios de escritórios.** Tese de doutorado em Engenharia Civil. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2010.
- BLENGINI, G. A.; CARLO, T. D. *The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings.* *Energy and Buildings.* v. 42, p. 869-880, 2010.
- BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. *Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.* *Building and Environment.* Issue 5, v. 46, p. 1133-1140, 2011.
- BRIBIÁN, I. Z.; USÓN, A. A.; SCARPELLINI, S. *Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification.* *Building and Environment.* Issue 12, v. 44, p. 2510-2520, 2009.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE). Disponível em: <<http://www.bre.co.uk/page.jsp?id=2181>>. Acesso em: 14 fev. 2014.
- BUYLE, M.; BAET, J.; AUDENAERT, A. *Life cycle assessment in the construction sector: A review.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* v. 26, p. 379-388, 2013.
- CABEZA, L. F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. *Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review [Article] // Renewable and Sustainable Energy Reviews.* v. 29, p. 394-416, 2014.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL (CBIC). **Construção Civil:** Desempenho e Perspectivas. 2011. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br>>. Acesso em: 17 nov. 2013.
- CAVALETT, O.; CHAGASM, M. F.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. *Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil.* *International Journal of Life Cycle Assessment.* Issue 3, v. 18, p. 647-658, 2013.
- CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; JULLIEN, A.; VENTURA, A. *LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete.* *Resources, Conservation and Recycling.* v. 54, p. 1231-1240, 2010.
- CHOWDHURY, R.; APUL, D.; FRY, T. *A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction.* *Resources, Conservation and Recycling.* v. 54, p. 250-255, 2010.
- CICEK, T.; TANRIVERDI, M. *Lime based steam autoclaved fly ash bricks.* *Construction and Building Materials.* v. 21, p. 1295-1300, 2007.

CICIN-SAIN, B. *Earth summit implementation: progress since Rio. Marine Policy*, Issue 2, v. 20, p. 123-143, ,1996.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Inventário de emissões das fontes estacionárias do Estado de São Paulo: manual de preenchimento**. São Paulo, 2009.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). Disponível em:

<<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Facopel%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F49AF98E12E67716B032574A20048B955>>. Acesso em: 03 nov. 2014.

COMPETENCE CENTER IN ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF PRODUCT AND MATERIAL SYSTEMS (CPM). Disponível em: <<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/Start.asp>>. Acesso em: 11 fev. 2014.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CNUMAD). **Agenda 21**. Brasília : Senado Federal, 1996.

CURRAN, M. A. *Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. Current Opinion in Chemical Engineering*. Issue 3, v. 2, p. 273-277, 2013.

CURRAN, M. A.; MANN, M.; NORRIS, G. *The international workshop on electricity data for life cycle inventories. Journal of Cleaner Production*. v. 13, p. 853-862, 2005.

DIMOUDI, A.; TOMPA, C. *Energy and environmental indicators related to construction. Resources, Conservation and Recycling*. v. 53, p. 86-95, 2008.

DING, G. K. C. *Sustainable construction - The role of environmental assessment tools. Journal of Environmental Management*. v. 86, p. 451-464, 2008.

DREYER, L. A.; NIEMANN, A. L.; HAUSCHILD, M. Z. *Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML 2001 and Eco-indicator 99. The International Journal of Life Cycle Assessment*. Issue 4, v. 08, p. 191-200, 2003.

DUAILIBI, J. G. **Avaliação das propriedades hidrodinâmicas em materiais granulares e argamassas com cinza pesada e agregado reciclado**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 2008.141p..

EICKER, M. O.; HISCHIER, R.; HURNI, H.; ZAH, R. *Using non-local databases for the environmental assessment of industrial activities: The*

case of Latin America. Environmental Impact Assessment Review, v. 30, p. 145-157, 2010.

EUROPEAN REFERENCE LIFE CYCLE DATABASE (ELCD). Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

ELETOBRAS CGTEE. Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

EUROPEAN COAL COMBUSTION PRODUCTS ASSOCIATION (ECOBA). Production and Utilisation of CCPs in 2009 in Europe (EU 15). 2009. Disponível em: <<http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>>. Acesso em: 12 mar. 2014.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY (JRC-IES). ILCD Handbook: Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle. Luxemburgo : Publications Office of the European Union, 1° ed. 2010a.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY (JRC-IES). ILCD Handbook: General guide for life cycle assessment - Detailed guidance. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 1° ed., 2010b.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY (JRC-IES). ILCD Handbook: Recommendations for life cycle impact assessment in the european context. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 1° ed., 2011.

EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS (EFCA). EFCA Environmental declaration superplasticizing admixures. EFCA doc. 325 ETG. 2006. Disponível em: <<http://www.admixtures.org.uk>>. Acesso em: 06 abril. 2016.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R. **Recent developments in Life Cycle Assessment.** *Journal of Environmental Management*. v. 91, p. 1-21, 2009.

FRISCHKNECHT, R.; STEINER, R.; JUNGBLUTH, N. **The Ecological Scarcity Method - Eco-Factors 2006: A method for impact assessment in LCA.** Zurich: Federal Office for the Environment FOEN, 2009.

GAYARRE, F. L.; PÉREZ, J. G.; PÉREZ, C. L-C.; LÓPEZ, M. S.; MARTÍNEZ, A. L. **Life cycle assessment for concrete kerbs**

manufactured with recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*. v. 113, p. 41-53, 2016.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A.D.; STRUIJS, J.; ZELM, R.V. *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation*. 2013. Disponível em:

<www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation>. Acesso em: 12 fev. 2014.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, R. *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment*. Holanda: PRÉ Consultants, 2001.

GONCZ, E.; SHIRKE, U.; KLEIZEN, H.; BARBER, M. *Increasing the rate of sustainable change: a call for a redefinition of the concept and the model for its implementation*. *Journal of Cleaner Production*, Issue 6, v. 15, p. 525-537, 2007.

GUINÉE, J. B.; GORRÉE, M.; HEIJUNG, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A.; VAN OERS, L.; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE BAES, H. A.; BRUIJN, J. A.; VAN DUIN, R.; HUIJBREGT, M. A. J. *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science*. Universidade de Leiden. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2002.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. *Life cycle assessment: past, present, and future*. *Environmental Science and Technology*. v. 45, n. 01, p. 90-96, 2011.

GUINÉE, J.B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G. *Economic Allocation: Examples and Derived Decision Tree*. *International Journal of Life Cycle Assessment*. v. 9. p. 23-33, 2004.

HAAPIO, A.; VIITANIEMI, P. *A critical review of building environmental assessment tools*. *Environmental Impact Assessment Review*. Vol. 28, p. 469-482, 2008.

HAUSCHILD, M. Z.; POTTING, J. *Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology*. Danish Ministry of the Environment. Compenhague: Environmental Protection Agency, *Environmental News* n° 80, 2005.

HEEDE, V. P.; BELIE, N. *Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature*

- review and theoretical calculations. Cement and Concrete Composites. Issue 4, v. 34, p. 431-442, 2012.*
- HEIDRICH, C.; FEUERBORN, H-J.; WEIR, A. ***Coal combustion products: A global perspective.*** *World of Coal Ash (WOCA) Conference.* Lexington, Kentucky, 2013.
- HEIJUNGS, R; GUINÉE, J.B. ***Allocation and 'what-if' scenarios in life cycle assessment of waste management systems.*** *Waste Management. v. 27, p. 997-1005, 2007.*
- HISCHIER, R.; WEIDEMA, B.; ALTHAUS, H. J.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; FRISCHKNECHT, R.; HELLWEG, S., HUMBERT, S., JUNGBLUTH, N.; KÖLLNER, T., LOERINCIK, Y.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. ***Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods.*** Dübendorf (Suíça): *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, 2010.
- HUBERMAN, N.; PEARLMUTTER, D. ***A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert.*** *Energy and Buildings. v. 40, p. 837-848, 2008.*
- HUNT, R. G.; BOGUSKI, T. K.; WEITZ, K.; SHARMA, A. ***Case Studies Examining LCA Streamlining Techniques.*** *The International Journal of Life Cycle Assessment. Issue 1, v. 3, p. 36-42, 1998.*
- IFU HAMBURG. Disponível em: <<http://www.umberto.de/en/>>. Acesso em: 14 fev. 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). ***Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2011.*** Rio de Janeiro, Vol. 21, p. 1-98, 2011.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). ***2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.*** Japan:IGES, 2006.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). ***The Climate Change e the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Chapter 2).*** New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION (CIB). ***Agenda 21 on Sustainable Construction.*** Netherlands: CIB Report Publication, 120 p., 1999.
- INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION AND UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (CIB & UNEP-IETC). ***Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries.*** Pretoria, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TR 14047: Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations.** Genebra, Suíça, 2012a.

_____. **ISO/TS 14048: Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format.** Genebra, Suíça, 2002.

_____. **ISO/TR 14049: Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis.** Genebra, Suíça, 2012b.

_____. **ISO 15392: Sustainability in building construction - General principles.** Genebra, Suíça, 2008.

_____. **ISO 21929-1: Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings.** Genebra, Suíça, 2011.

_____. **ISO 21930: Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products.** Genebra, Suíça, 2007.

_____. **ISO 21931-1: Sustainability in building construction – Sustainability indicators – part1: framework for the development of indicators for buildings.** Genebra, Suíça, 2010.

_____. **ISO/TR 21932: Sustainability in buildings and civil engineering works - A review of terminology.** Genebra, Suíça, 2013.

ITSUBO, N.; INABA, A. **A New LCIA Method: LIME has been completed [Article] // International Journal of Life Cycle Assessment.** Vol. 8, 305 p., 2003.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas. Produção de cal. Relatório Final.** Ribeirão Preto, SP : Universidade de São Paulo. FUNDACE-BNDES, 2014.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. **IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment.** Issue 6, Vol. 8, p. 324-330, 2003.

KALBUSCH, A. **Método para avaliação do impacto ambiental da substituição de equipamentos convencionais por equipamentos economizadores de água a partir da avaliação do ciclo de vida.** Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 242 p., 2011.

KIM, H. K.; JEON, J. H.; LEE, H. K. *Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates*. *Construction and Building Materials*. Vol. 26, p. 249-256, 2012. KORONEOS, C.; DOMPROS, A. *Environmental assessment of brick production in Greece*. *Building and Environment*. Vol. 42, p. 2114-2123, 2007.

KREUZ, A. L. **Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: USFC, 195p., 2002.

KURAMA, H.; KAYA, M. *Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture*. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, p. 1922-1928, 2008.

LÉLÉ, S. M. *Sustainable Development: A Critical Review*. World Development, Vol. 19, p. 607-621, 1991.

LENZI, E. J. **Influencia do uso de cinzas da combustão de carvão mineral em argamassa de revestimento**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 132p., 2001.

MARGON, P. V. **Influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento: dosagem por curvas granulométricas**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 100p., 2002.

MARIINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALESEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. *Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete*. *Waste Management*. v. 30, p. 2255–2264, 2010.

MATEUS, R.; BRAGANÇA, L. *Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBTool PT – H*. *Building and Environment*. v. 46, p. 1962-1971, 2011.

MATEUS, R.; NEIVA, S.; BRAGANÇA, L.; MENDONÇA, P.; MACIEIRA, M. *Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls e Comparison with conventional technologies*. *Building and Environment*. Vol. 67, p. 147-159, 2013.

MEADOWS, D.H.; MEADOWS, D.L.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W.W. *The limits to growth*. New York: Universe Book, 1972.

MEAWAD, A. S.; BOJINOVA, D.; PELOVSKI, Y. G. *An overview of metals recovery from thermal power plant solid wastes*. *Waste Management*. Vol. 30, p. 2548-2559, 2010.

- MEDEIROS, A. M. **Bases metodológicas para a incorporação da variável ambiental no planejamento da expansão.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE. Rio de Janeiro, 2003.
- MENÉNDEZ, E.; ÁLVARO, A. M.; HERNÁNDEZ, M. T.; PARRA, J. L. *New methodology for assessing the environmental burden of cement mortars with partial replacement of coal bottom ash and fly ash.* *Journal of Environmental Management.* Vol. 113, p. 275-283, 2014.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT) <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora> [Online]. - 13 de 10 de 2015.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Relatório de Referência - Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Energético por Fontes Móveis.** Brasília, 2006.
- MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa. Relatório de Referência: Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – Produtos Mineraiis.** Parte I: Produção de cimento. Brasília, 2010a.
- MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Relatório de Referência: Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produtos Mineraiis.** Parte II: Produção de Cal, Outros Usos do Calcário e Dolomita; Produção e Uso de Barrilha. Brasília, 2010b.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos.** Brasília, 2014.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos.** Brasília, 2008.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Perfil da brita para construção civil - Relatório técnico 30.** Brasília, 2009a.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Perfil da areia para construção civil - Relatório técnico 31.** Brasília, 2009b.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Energia 2030, Geração Termelétrica - Carvão Mineral.** v. 6, Brasília: MME: EPE, 2007.
- MITCHAM, C. *The concept of sustainable development: its origins and ambivalence.* *Technology in Society,* Issue 3, Vol. 17, p. 311-326, 1995.
- MOEHLECKE, J. **Uma contribuição para o desenvolvimento de assentamentos humanos mais sustentáveis: Identificação de padrões**

urbanos relacionados aos princípios da sustentabilidade. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

MONTEIRO, H.; FREIRE, F. *Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods.* *Energy and Buildings*. Vol. 47, p. 572-583, 2012.

MUSTELIER, N. L. **Avaliação do desempenho de blocos e argamassas com cinzas de carvão mineral incorporada para aproveitamento em conjuntos habitacionais.** Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 127 p., 2002.

MUSTELIER, N. L. **Estimativa do comportamento de paredes no ensaio de penetração de água de chuva através das propriedades de transferência de umidade dos materiais constituintes.** Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 353 p., 2008.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). Disponível em: <<http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm>>. Acesso em: 14 dez. 2013.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). U.S. Life Cycle Inventory Database. 2012. Disponível em: <<https://www.lcacommons.gov/nrel/search>>. Acesso em: 19 nov 2013.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). Life Cycle Assessment of Coal-Fired Power Production. TP-570-25119. Colorado, US., 1999.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. *Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA.* *Construction and Building Materials*. Vol. 23, p. 28-39, 2009.

PE INTERNATIONAL. Disponível em: <<http://www.pe-international.com/brazil/ind>>. Acesso em: 14 fev. 2014.

PENNINGTON, D.W.; POTTING, J.; FINNVEDE, G.; LINDEIJER, E.; JOLLIET, O.; RYDBERG, T.; REBITZER, G. *Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice.* *Environment International*. Vol. 30, p. 721-739, 2004.

PIAIA, J. C. Z.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. *Measurements of water penetration and leakage in masonry wall: Experimental results and numerical simulation.* *Building and Environment*. Vol. 61, p. 18-26, 2013.

PIERAGOSTINI, C.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, P. *On process optimization considering LAC methodology*. *Journal Environmental Management*. Vol. 96, p. 43-54, 2012.

POZZOBON, C. E. **Aplicações Tecnológicas para a Cinza do Carvão Mineral Produzido no Complexo Terméletrico Jorga Lacerda**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 122 p., 1999.

PRÉ CONSULTANTS (PRé). *SimaPro Database Manual*. *Methods Library*. Holanda: PRé Consultants, 2016. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/simapro/>>. Acesso: 14 mar. 2016.

PROGRAMA DE TECNOLOGIA DE HABITAÇÃO (HABITARE). Disponível em: <http://www.habitare.org.br/prototipos_projeto2.aspx>. Acesso em: 01 nov. 2013.

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNENHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T. *Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*. *Environment International*. Vol. 30, p. 701-720, 2004.

RESTREPO, A.; BAZZO, E.; MIYAKE, R. *A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation*. *Journal of Cleaner Production*. v. 92, p. 179-186, 2015.

ROBICHAUD, L. B.; ANANTATMULA, V. S. *Greening Project Management Practices for Sustainable Construction*. *Journal of Management in Engineering*. Vol. 27, p. 48-57, 2011.

ROSEMBAUM, R. K.; BACHMANN, T. M.; GOLS, L. S.; HUIJBREGTS, M. A. J.; JOLLIET, O.; JURASKE, R.; KÖHLER, A.; LARSEN, H. F.; MACLEOD, M.; MARGNI, M.; MCKONE, T. E.; PAYET, J.; SCHUMACHER, M.; VAN DE MEENT, D.; HAUSCHILD, M. Z. *USEtox - the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 13, p. 532-546, 2008.

ROSSI, B.; MARIQUE, A.; GLAUMANN, M.; REITER, S. *Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool*. *Building and Environment*. Vol. 51, p. 395-401, 2012.

SAGHAFI, M. D.; TESHNIZI, Z. S. H. *Recycling value of building materials in building assessment systems*. *Energy and Buildings*, Vol. 43, p. 3181-3188, 2011.

- SANTOS, F. I. G. **Avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas.** Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: UFSC, 164 p., 2006.
- SCHNEIDER, C. H. **Controle da drenagem acida de minas na mineração de carvão de Santa Catarina: caso da mina UM II - Verdinho.** Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. USFC, 2006.
- SIDDIQUE, R. *Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. Resources, Conservation and Recycling.* Vol. 54, p. 1060-1066, 2010.
- SILVA, A. O. **Estudo comparativo do ciclo de vida e de custo de pilar com diferentes tarços de concreto.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2014.
- SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações.** Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia. USP, 2013.
- SILVA, R.; PIRES, M.; AZEVEDO, C. M. N.; FAGUNDES, L. *Monitoring light hydrocarbons in brazilian coal mines and in confined coal samples. International Journal of Coal Geology.* v. 14. p. 269-275, 2010.
- SILVEIRA, J. P.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Desenvolvimento de blocos de concreto com uso das cinzas de termelétricas.** In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo: Anais, 2004.
- SINGH, A.; BERGHORN, G.; JOSHI, S.; SYAL, M. *Review of Life-Cycle Assessment Applications in Building Construction. Journal of Architectural Engineering.* v. 17, p. 15-23, 2011.
- SINGH, M.; SIDDIQUE, R. *Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. Resources, Conservation and Recycling.* v. 72, p. 20-32, 2013.
- SONNEMANN, G.; VIGON, B.; BROADBENT, C.; CURRAN, M. A.; FINKBEINER, M.; FRISCHKNECHT, R.; INABA, A.; SCHANSSEMA, A. *Process on "global guidance for LCA databases". International Journal of Life Cycle Assessment, Issue 1, v. 16, p. 95-97, 2011.*
- SOUZA, D. M.; LAFONTAINE, M.; CHARRON-DOUCET, F.; BENGUA, X.; CHAPPERT, B.; DUARTE, F.; LIMA, L. *Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the*

Brazilian context. *Journal of Cleaner Production*, v. 89, p. 165-173, 2015.

STEEN, B. A **Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS)**. Version 2000 - Models and Data of the Default Method. Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1999.

SWISS CENTER FOI LIFE CYCLE INVENTORIES (SCLCI). **Ecoinvent Database v.2.2**. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/home/>> Acesso em: 13 out. de 2015.

TCPO. **Tabelas de composições de preços para orçamento**. São Paulo: PINI, 2009. 630 p.

TODD, J. A.; CURRAN, M. A. **Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup**. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Pensacola: Flórida, 31 p., 1999.

TORRES, V. F. N.; GAMA, C. D. **Engenharia ambiental subterrânea e aplicações**. Rio de Janeiro: CETEM/CYTED, 2005.

TRACTEBEL ENERGIA. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-termeletricas>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - SUSTAINABLE BUILDINGS & CLIMATE INITIATIVE (UNEP-SBCI). **Buildings and climate change: A summary for decision-makers**. Paris: UNEP DTIE Sustainable Consumption & Production Branch, 2009.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global guidance principles for Life Cycle Assessment databases. A basis for greener processes and products [Report]**. Paris, França: The UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Guidelines for social life cycle assessment of products**. France, 2009.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **The emissions gap report 2012: A UNEP Synthesis Report**. Nairobi, 2012.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Guidelines for the preparation of national communications by parties included in annex I to the convention, Part I: NCCC reporting guidelines on annual inventories (following in corporation of the provisions of decision. 13/CP.9)**, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/resources.html#Software>>. Acesso em: 11 fev. 2014.

VIEIRA, P. S.; HORVATH, A. *Assessing the End-of-Life Impacts of Buildings*. *Environmental Science & Technology*. Vol. 42, n°13, p. 4663-4669, 2008.

VINAI, R.; LAWANE, A.; MINANE, J. R.; AMADOU, A. *Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production*. *Construction and Building Materials*. Vol. 40, p. 1088-1096, 2013.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

ZACCAI, E. *Over two decades in pursuit of sustainable development: Influence, transformations, limits*. *Environmental Development*, Issue 1, Vol. 1, p. 79-90, 2012.

ZUO, J.; ZHAO, Z-Y. *Green building research-current status and future agenda: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, p. 271-281, 2014.

APÊNDICE A - Modelo de questionário para a coleta de dados

Mineradoras

1. Descrição da empresa

- 1.1. Nome da empresa: _____
- 1.2. Autoriza divulgação do nome:
 sim não
- 1.3. Localização (Município/Estado): _____
- 1.4. Área de lavra (ha): _____
- 1.5. Área edificada (m²): _____
- 1.6. Data do início da operação (ano): _____
- 1.7. Vida útil estimada (considerando a data de início da operação):
 _____ anos
- 1.8. Produção média anual (tonelada/ano): _____
- 1.9. Quais foram as atividades para o início da operação:
 retirada de fauna
 retirada de flora
 decapeamento
 outros, especificar: _____
- 1.10. Qual foi a quantidade de material removido: _____ (t)
- 1.11. Qual foi a destinação deste material:
 aterro
 recuperação de cava
 outros especificar: _____

2. Descrição dos produtos produzidos

- 2.1. Informar as características dos produtos produzidos, conforme tabela a seguir:

produto	descrição	massa unitária ()t/m ³ ()kg/dm ³

- 2.2. Informar os dados de produção (m³/mês), preço unitário de venda e informações das distâncias de distribuição, como segue:

produto	qtde. (m ³ /mês)	preço (R\$/t)	distância média distribuição (km)	distância máxima distribuição (km)

3. Processo Produtivo

Desenho do fluxograma do processo produtivo

4. Identificação dos equipamentos utilizados no processo produtivo

equipamento	fabricante	modelo	potência	consumo

4.1. Qual o consumo de água por mês: _____ (m³/mês)

4.2. Qual o consumo de energia por mês: _____ (kWh/mês)

*Se possível fornecer cópia das faturas mensais

5. Identificação dos veículos utilizados para transporte

fabricante	modelo	capacidade	distância	consumo

6. Identificação das emissões e resíduos gerados

6.1. Há controle das emissões atmosféricas:

() sim () não

6.2. Há controle das emissões para água/solo:

() sim () não

6.3. Há controle dos resíduos sólidos:

() sim () não

Em caso afirmativo preencher:

<i>emissão para o ar</i>		
<i>gás</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>emissão para a água</i>		
<i>poluente</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>emissão para o solo</i>		
<i>poluente</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>geração de resíduos</i>		
<i>tipo</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>

3. Processo Produtivo

Desenho do fluxograma do processo produtivo

4. Identificação das matérias-primas:

Fornecedor do cimento: _____

Fornecedor da areia: _____

Fornecedor da brita: _____

Receita base para produção dos blocos de concreto Classe A, com resistência a compressão igual a 6MPa, modelo EI1460:

5. Identificação dos equipamentos utilizados no processo produtivo

equipamento	fabricante	modelo	potência	consumo

5.1. Qual o consumo de água por mês: _____ (m³/mês)

5.2. Qual o consumo de energia por mês: _____ (kWh/mês)

*Se possível fornecer cópia das faturas mensais

6. Identificação dos veículos utilizados para transporte

fabricante	modelo	capacidade	distância	consumo

7. Identificação das emissões e resíduos gerados

7.1. Há controle das emissões atmosféricas:

 sim não

7.2. Há controle das emissões para água/solo:

 sim não

7.3. Há controle dos resíduos sólidos:

 sim não

Em caso afirmativo preencher:

<i>emissão para o ar</i>		
<i>gás</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>emissão para a água</i>		
<i>poluente</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>emissão para o solo</i>		
<i>poluente</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>geração de resíduos</i>		
<i>tipo</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>

Usina termelétrica

1. Descrição da empresa

- 1.1. Nome da empresa: _____
- 1.2. Autoriza divulgação do nome:
 sim não
- 1.3. Localização (Município/Estado): _____
- 1.4. Data do início da operação (ano): _____
- 1.5. Vida útil estimada (considerando a data de início da operação):
 _____ anos
- 1.6. Produção média anual (MWh/ano): _____

2. Características do carvão energético

- 2.1. Origem do carvão utilizado: _____ (região da jazida).
- 2.2. Características do carvão utilizado no processo produtivo:
- Poder calorífico _____ (kcal/kg)
- Granulometria: _____ (mm)
- Umidade máxima total: _____ (%)
- Conteúdo máximo de enxofre: _____ (%)
- Composição química:
- _____ % Carbono, _____ % Hidrogênio, _____ % Enxofre,
 _____ % Oxigênio, _____ % Nitrogênio, _____ % Cinza

3. Processo industrial

Desenho do fluxograma do processo industrial

3.1. Descrição dos dados de produção, ano base 2014, como segue:

usina	carvão energético (t)	cinza produzidas (t)		óleo diesel (l)	água (m ³)	geração (MWh)
		leve	pesada			
UTLA						
UTLB						

UTLC						
Total						

3.2. Qual é o consumo médio mensal de água para arraste da cinza pesada:
 _____ (m³/ t).

3.3. Qual é o consumo médio mensal de energia no processo industrial:
 _____ (kWh), ano base 2014.

3.4. Percentual de venda dos subprodutos:

cinza leve: _____ %

cinza pesada: _____ %

3.5. Valor de venda dos subprodutos:

Cinza leve: R\$ _____ /tonelada

Cinza pesada: R\$ _____ /tonelada

3.6. Destino de descarte das cinzas leves:

() Silos para reaproveitamento _____ %

() Aterro _____ %

() Bacia de sedimentação _____ %

() Outros _____ % Quais: _____

3.7. Destino de descarte das cinzas pesadas:

() Aterro _____ %

() Bacia de sedimentação _____ %

() Outros _____ % Quais: _____

3.8. Dimensão das bacias de sedimentação: _____ (m²)

3.9. Capacidade das bacias de sedimentação: _____ () m³ () t

3.10. Percentual das bacias já utilizado: _____ %

4. Identificação dos veículos utilizados no processo de coleta para aproveitamento da cinza pesada

fabricante	modelo	capacidade	distância	consumo

5. Identificação das emissões e resíduos gerados

5.1. Há controle das emissões atmosféricas:

() sim () não

5.2. Há controle das emissões para água:

() sim () não

Em caso afirmativo preencher:

<i>emissão para o ar</i>		
<i>gás</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>emissão para a água</i>		
<i>poluente</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>
<i>emissão para o solo</i>		
<i>poluente</i>	<i>quantidade</i>	<i>unidade</i>

APÊNDICE B - Cálculo emissões atmosféricas CTJL

Este item descreve o procedimento de cálculo adotado para realizar as estimativas das emissões de GEE, decorrentes da operação do CTJL, ano base 2013.

Nesta estimativa foram considerados os GEE diretos: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), e os GEE indiretos: dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e material particulado (MP).

Os valores de SO₂, NO_x e MP foram obtidos a partir dos relatórios de monitoramento das emissões atmosféricas fornecidos pela empresa, conforme apresentado na Tabela B.1.

Tabela B.1 - Fatores de emissão por MWh de energia gerada na UTLC, 2013.

emissão (kg/MWh)			
gás	NO _x	SO ₂	MP
emissão	2,53	16,32	0,33

Fonte: Adaptado de Tractebel Energia S.A

Para o cálculo dos gases (CO₂, CH₄, N₂O e CO) foi adotada a metodologia proposta pelo IPCC (IPCC, 2006), que de forma resumida, baseia-se na determinação do consumo aparente dos combustíveis queimados em um ano, convertendo este valor para uma unidade de energia comum (TJ) e multiplicando pelo fator de emissão para determinar o total de emissões de cada gás, conforme equação AB.1.

$$E_{gás} = CC * PC * FE \quad \text{AB (1)}$$

Onde,

$E_{gás}$ = Emissão de cada gás, t_{gás}/MWh

CC = consumo de combustível, em t;

PC = quando o consumo é expressa em unidades de massa ou volume, o factor de conversão é o poder calorífico inferior do combustível, em TJ/t;

FE = fator de emissão de cada gás, kg gás/TJ.

Segundo MCT (2010) os fatores de emissão (FE) de carbono representam a quantidade de carbono contida no combustível por unidade de energia. Devido ao processo de combustão não ser completo, sempre ocorre um percentual de carbono que não é oxidado. Para descontar o

carbono não oxidado, basta multiplicar o valor das emissões por um fator que representa a fração de carbono oxidado.

Os dados utilizados para o cálculo dos GEE diretos encontram-se nas Tabelas AB.1 e AB.2.

Tabela AB.1 - Fatores de emissão de carbono

combustíveis fósseis	poder calorífico (TJ/Gg)	conteúdo de carbono (kg/GJ)	fator de oxidação	fator de emissão CO₂ (kg/TJ)
óleo diesel	43,0	20,2	1	74100
carvão vapor	25,8	25,8	1	94600

Fonte: IPCC (2006)

Tabela AB.2 - Fatores de emissão do setor de energia

combustíveis fósseis	fator de emissão CH₄ (kg/TJ)	fator de emissão N₂O (kg/TJ)
óleo diesel	3	0,6
carvão vapor	1	1,5

Fonte: IPCC (2006)

O fator de emissão de CO foi baseado no estudo de LA ROVERE, 1999, conforme tabela AB.3.

Tabela AB.3 - Fatores de emissão do setor de energia

combustíveis fósseis	fator de emissão CO (kg/TJ)
óleo diesel	16
carvão vapor	14

Fonte: LA ROVERE, AMERICANO (1999)

REFERÊNCIAS

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan:IGES, 2006.

LA ROVERE, E.L.; AMERICANO, B.B. *Greenhouse gas emissions avoid by procel: 1990 -2020. Final Report. Project Assessment of Global Environmental Impacts of Procel.* Rio de Janeiro: PPE/COPPE/UFRJ, 1999.

APÊNDICE C - Cálculo de conversão para o valor presente do preço mínimo para comercialização das CCCs.

Variação do índice INCC-DI

entre Junho de 1994 a Dezembro de 2015

Em fator de multiplicação: 0,003540

Os valores do índice utilizados neste cálculo foram:

Julho-1994 = 4,33%; Agosto-1994 = 3,94%; Setembro-1994 = 1,75%;
 Outubro-1994 = 1,82%; Novembro-1994 = 2,85%; Dezembro-1994 = 0,84%;
 Janeiro-1995 = 0,92%; Fevereiro-1995 = 1,39%; Março-1995 = 1,12%;
 Abril-1995 = 2,10%; Maio-1995 = 0,58%; Junho-1995 = 2,46%;
 Julho-1995 = 1,82%; Agosto-1995 = 2,20%; Setembro-1995 = -0,71%;
 Outubro-1995 = 0,52%; Novembro-1995 = 1,20%; Dezembro-1995 = 0,71%;
 Janeiro-1996 = 1,73%; Fevereiro-1996 = 0,97%; Março-1996 = 0,40%;
 Abril-1996 = 0,32%; Maio-1996 = 1,55%; Junho-1996 = 1,02%;
 Julho-1996 = 1,35%; Agosto-1996 = 0,28%; Setembro-1996 = 0,10%;
 Outubro-1996 = 0,19%; Novembro-1996 = 0,20%; Dezembro-1996 = 0,73%;
 Janeiro-1997 = 1,77%; Fevereiro-1997 = 0,43%; Março-1997 = 1,15%;
 Abril-1997 = 0,68%; Maio-1997 = 0,21%; Junho-1997 = 0,74%;
 Julho-1997 = 0,09%; Agosto-1997 = 0,09%; Setembro-1997 = 0,48%;
 Outubro-1997 = 0,37%; Novembro-1997 = 0,64%; Dezembro-1997 = 0,84%;
 Janeiro-1998 = 0,96%; Fevereiro-1998 = 0,18%; Março-1998 = 0,19%;
 Abril-1998 = 0,13%; Maio-1998 = 0,14%; Junho-1998 = 0,38%;
 Julho-1998 = -0,17%; Agosto-1998 = -0,16%; Setembro-1998 = -0,08%;
 Outubro-1998 = 0,08%; Novembro-1998 = -0,32%; Dezembro-1998 = 0,45%;
 Janeiro-1999 = 0,84%; Fevereiro-1999 = 3,61%; Março-1999 = 2,83%;
 Abril-1999 = 0,71%; Maio-1999 = -0,29%; Junho-1999 = 0,36%;
 Julho-1999 = 1,55%; Agosto-1999 = 1,56%; Setembro-1999 = 1,45%;
 Outubro-1999 = 1,70%; Novembro-1999 = 2,39%; Dezembro-1999 = 1,81%;
 Janeiro-2000 = 1,24%; Fevereiro-2000 = 0,35%; Março-2000 = 0,15%;
 Abril-2000 = 0,23%; Maio-2000 = 0,31%; Junho-2000 = 0,85%;
 Julho-2000 = 1,57%; Agosto-2000 = 2,39%; Setembro-2000 = 1,16%;
 Outubro-2000 = 0,38%; Novembro-2000 = 0,29%; Dezembro-2000 = 0,63%;
 Janeiro-2001 = 0,62%; Fevereiro-2001 = 0,23%; Março-2001 = 0,56%;
 Abril-2001 = 1,00%; Maio-2001 = 0,86%; Junho-2001 = 0,98%;
 Julho-2001 = 1,48%; Agosto-2001 = 1,38%; Setembro-2001 = 0,31%;
 Outubro-2001 = 1,18%; Novembro-2001 = 1,10%; Dezembro-2001 = 0,22%;
 Janeiro-2002 = 0,36%; Fevereiro-2002 = 0,06%; Março-2002 = 0,09%;
 Abril-2002 = 0,56%; Maio-2002 = 0,83%; Junho-2002 = 1,54%;
 Julho-2002 = 1,95%; Agosto-2002 = 2,32%; Setembro-2002 = 2,40%;

Outubro-2002 = 3,87%; Novembro-2002 = 5,19%; Dezembro-2002 = 3,75%; Janeiro-2003 = 2,33%; Fevereiro-2003 = 2,28%; Março-2003 = 1,53%; Abril-2003 = 0,92%; Maio-2003 = -0,26%; Junho-2003 = -1,00%; Julho-2003 = -0,42%; Agosto-2003 = 0,38%; Setembro-2003 = 1,18%; Outubro-2003 = 0,38%; Novembro-2003 = 0,49%; Dezembro-2003 = 0,61%; Janeiro-2004 = 0,88%; Fevereiro-2004 = 0,69%; Março-2004 = 1,13%; Abril-2004 = 1,21%; Maio-2004 = 1,31%; Junho-2004 = 1,38%; Julho-2004 = 1,31%; Agosto-2004 = 1,22%; Setembro-2004 = 0,69%; Outubro-2004 = 0,39%; Novembro-2004 = 0,82%; Dezembro-2004 = 0,74%; Janeiro-2005 = 0,39%; Fevereiro-2005 = 0,30%; Março-2005 = 0,85%; Abril-2005 = 0,86%; Maio-2005 = -0,22%; Junho-2005 = -0,44%; Julho-2005 = -0,34%; Agosto-2005 = -0,65%; Setembro-2005 = -0,53%; Outubro-2005 = 0,60%; Novembro-2005 = 0,40%; Dezembro-2005 = -0,01%; Janeiro-2006 = 0,92%; Fevereiro-2006 = 0,01%; Março-2006 = -0,23%; Abril-2006 = -0,42%; Maio-2006 = 0,38%; Junho-2006 = 0,75%; Julho-2006 = 0,18%; Agosto-2006 = 0,37%; Setembro-2006 = 0,29%; Outubro-2006 = 0,47%; Novembro-2006 = 0,75%; Dezembro-2006 = 0,32%; Janeiro-2007 = 0,50%; Fevereiro-2007 = 0,27%; Março-2007 = 0,34%; Abril-2007 = 0,04%; Maio-2007 = 0,04%; Junho-2007 = 0,26%; Julho-2007 = 0,28%; Agosto-2007 = 0,98%; Setembro-2007 = 1,29%; Outubro-2007 = 1,05%; Novembro-2007 = 0,69%; Dezembro-2007 = 1,76%; Janeiro-2008 = 1,09%; Fevereiro-2008 = 0,53%; Março-2008 = 0,74%; Abril-2008 = 0,69%; Maio-2008 = 1,61%; Junho-2008 = 1,98%; Julho-2008 = 1,76%; Agosto-2008 = -0,32%; Setembro-2008 = 0,11%; Outubro-2008 = 0,98%; Novembro-2008 = 0,38%; Dezembro-2008 = -0,13%; Janeiro-2009 = -0,44%; Fevereiro-2009 = 0,26%; Março-2009 = -0,74%; Abril-2009 = -0,15%; Maio-2009 = -0,07%; Junho-2009 = -0,10%; Julho-2009 = -0,43%; Agosto-2009 = -0,36%; Setembro-2009 = 0,42%; Outubro-2009 = 0,05%; Novembro-2009 = 0,10%; Dezembro-2009 = -0,26%; Janeiro-2010 = 0,63%; Fevereiro-2010 = 1,18%; Março-2010 = 0,94%; Abril-2010 = 0,77%; Maio-2010 = 1,19%; Junho-2010 = 0,85%; Julho-2010 = 0,15%; Agosto-2010 = 0,77%; Setembro-2010 = 1,15%; Outubro-2010 = 1,01%; Novembro-2010 = 1,45%; Dezembro-2010 = 0,69%; Janeiro-2011 = 0,79%; Fevereiro-2011 = 1,00%; Março-2011 = 0,62%; Abril-2011 = 0,45%; Maio-2011 = 0,43%; Junho-2011 = -0,18%; Julho-2011 = -0,12%; Agosto-2011 = 0,44%; Setembro-2011 = 0,65%; Outubro-2011 = 0,53%; Novembro-2011 = 0,50%; Dezembro-2011 = -0,12%; Janeiro-2012 = 0,25%; Fevereiro-2012 = -0,06%; Março-2012 = 0,43%; Abril-2012 = 0,85%; Maio-2012 = 1,02%; Junho-2012 =

0,66%; Julho-2012 = 1,34%; Agosto-2012 = 1,43%; Setembro-2012 = 0,97%; Outubro-2012 = 0,02%; Novembro-2012 = -0,03%; Dezembro-2012 = 0,68%; Janeiro-2013 = 0,34%; Fevereiro-2013 = 0,29%; Março-2013 = 0,21%; Abril-2013 = 0,15%; Maio-2013 = 0,00%; Junho-2013 = 0,75%; Julho-2013 = 0,26%; Agosto-2013 = 0,15%; Setembro-2013 = 1,50%; Outubro-2013 = 0,86%; Novembro-2013 = 0,29%; Dezembro-2013 = 0,60%; Janeiro-2014 = 0,48%; Fevereiro-2014 = 0,38%; Março-2014 = 1,67%; Abril-2014 = 0,78%; Maio-2014 = -0,13%; Junho-2014 = -0,74%; Julho-2014 = -0,61%; Agosto-2014 = -0,27%; Setembro-2014 = 0,20%; Outubro-2014 = 0,28%; Novembro-2014 = 0,98%; Dezembro-2014 = 0,62%; Janeiro-2015 = 0,76%; Fevereiro-2015 = 0,27%; Março-2015 = 0,98%; Abril-2015 = 1,17%; Maio-2015 = 0,41%; Junho-2015 = 0,67%; Julho-2015 = 0,69%; Agosto-2015 = 0,28%; Setembro-2015 = 0,95%; Outubro-2015 = 1,89%; Novembro-2015 = 1,52%.

As variações de moeda listadas abaixo também foram consideradas no cálculo da variação:

01/07/94, de cruzeiro real para real, dividindo o valor por 2.75

APÊNDICE D - Consumo de água do CTJL

A água utilizada para operação do CTJL são classificadas de acordo com a aplicação.

- a) água clarificada: É captada do rio e passa pelo processo de clarificação. É utilizada para o sistema fechado de resfriamento (para repor as perdas por evaporação na torre de resfriamento, para produção de água potável, para lavagem de pisos, para antiincêndio e também para produção de água desmineralizada).;
- b) água de resfriamento: É captada do rio e não passa por nenhum tipo de tratamento. Serve como fluído de troca térmica no condensador das unidades. Ou seja, serve para resfriar o vapor que sai da turbina para que ele vire novamente condensado e volte para caldeira. Esta água é utilizada, porém, não é consumida, passa pelo condensador e é devolvida para o rio;
- c) água do sistema de cinzas: É a água utilizada para arraste da CzP para as bacias de sedimentação. Nas bacias, a CzP decanta e a água volta para o sistema, ou seja, esta água recircula no sistema. O cálculo é feito pela vazão das bombas e as horas de operação.

Esses totais representam toda água que participa do processo de geração de energia. No entanto, a água realmente consumida pelo processo, ou seja, que não retorna para o rio é o total referente a água clarificada.

Tabela AC.1 – Consumo de água para operação do CTJL, ano 2013.

tipo	quantidade (m³)
água clarificada	5.632.452
água de resfriamento	572.494.980
água do sistema de cinzas	19.987.091

Fonte: Autora

No CTJL o sistema para arraste das cinzas é fechado, desta forma que é consumido do rio é apenas a reposição do sistema. No entanto, se o sistema não fosse fechado, o consumo seria exatamente o valor de 19.987.091 m³.

